

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Куроп'ятник Олексій Сергійович



УДК 625.57

**ФОРМУВАННЯ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРИВОДИ
ПІДВІСНИХ КАНАТНИХ ДОРІГ З УРАХУВАННЯМ
ВПЛИВУ НЕСУЧЕ-ТЯГОВИХ СИСТЕМ**

05.22.12 – промисловий транспорт

Автореферат
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник –

доктор технічних наук, професор
Ракша Сергій Васильович,
завідувач кафедри прикладної механіки
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна МОН України

Офіційні опоненти –

доктор технічних наук, професор
Ловейкін В'ячеслав Сергійович,
завідувач кафедри конструювання машин і
обладнання Національного університету
біоресурсів і природокористування України
МОН України

кандидат технічних наук, ст. наук. співробітник
Ільїн Сергій Ростиславович,
завідувач лабораторії проблем діагностики
та випробувань шахтних підйомних комплексів
Інституту геотехнічної механіки
ім. М. С. Полякова НАН України

Захист відбудеться « 16 » червня 2016 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий « 14 » травня 2016 року.

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



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвісні канатні дороги (ПКД) є універсальним транспортним засобом, який має суттєві переваги над існуючими машинами, що забезпечують перевезення вантажів та людей, зокрема, в межах промислових об'єктів. Обсяги витрат на спорудження та утримання ПКД є значно меншими, ніж відповідні величини, що характеризують інші види транспорту. При цьому тривалість циклу транспортування скорочується за рахунок реалізації можливості поєднання кінцевих (і проміжних, за необхідності) пунктів призначення за найкоротшою відстанню, що пояснюється малою залежністю траси ПКД від особливостей рельєфу місцевості. Сукупне врахування вказаних переваг підтверджує техніко-економічну доцільність використання канатних доріг як засобу промислового транспорту.

Під час моделювання канатних систем більшості ПКД несучі канати представляються як багатопрогонні гнучкі нитки, що перебувають у статичній рівновазі на всіх опорних точках каната. При цьому умовою такої рівноваги вважається рівність і постійність горизонтальних складових натягу ділянок каната в усіх прогонах. Таке припущення призводить до суттєвого зниження точності результатів моделювання ПКД з прогонами великої довжини, які на сьогодні є доволі поширеними. Тому для забезпечення можливості більш точного формування зовнішніх навантажень на приводи ПКД як засобів промислового транспорту актуальною задачею є розробка нових та уточнення існуючих моделей, які дозволяють визначати зусилля в елементах несуче-тягових систем за будь-яких вихідних даних, що сприятиме підвищенню ефективності ПКД.

При моделюванні приводів ПКД як складних динамічних систем виділяються два підходи. Перший з них полягає у дискретизації тягового каната шляхом його заміни системою зосереджених мас, послідовно з'єднаних між собою пружними невагомими елементами сталої жорсткості. Такий підхід є доволі простим з точки зору математичного апарату, що використовується для дослідження динаміки приводу, однак його точність суттєво знижується у разі використання з метою розрахунку ПКД з прогонами значної довжини. Другий підхід до моделювання передбачає представлення приводу як дискретно-континуальної системи, у якій тяговий канат розглядається як елемент з розподіленими параметрами. Такий підхід є більш точним за попередній, однак на сьогодні його реалізовано лише у вигляді математичних моделей, що дозволяють досліджувати канатні установки, які мають по одному вагону на кожній з віток тягового каната. Зазначена особливість значно обмежує галузь використання таких моделей, тому розробка і використання нових, універсальних моделей, які є прийнятними для аналізу ПКД будь-якого типу з довільною кількістю одиниць рухомого складу на вітках тягового каната сприятиме підвищенню функціональної безпеки ПКД за рахунок забезпечення можливості більш точного формування зовнішніх навантажень, що є актуальним.

Таким чином, розробка та обґрунтування універсальних моделей процесів, які супроводжують експлуатацію ПКД, із залученням точних методів дослідження та сучасних технологій з метою формування зовнішніх навантажень є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, відповідає пріоритетним напрямкам розвитку транспортної інфраструктури, які визначені Транспортною стратегією України на період до 2020 року. Автор дисертації є співвиконавцем держбюджетної науково-дослідної роботи № ДР 0112U003560 «Удосконалення методів оцінки та підвищення функціональної безпеки в експлуатаційній роботі на залізницях».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності та функціональної безпеки підвісних канатних доріг шляхом формування зовнішніх навантажень на приводи з урахуванням впливу несуче-тягових систем.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких задач:

- аналіз відомих математичних моделей процесів, що супроводжують експлуатацію ПКД;
- уточнення математичних моделей шляхом врахування впливу несуче-тягових систем на навантаженість елементів ПКД;
- удосконалення математичної моделі для визначення власних частот тягових контурів ПКД;
- експериментальне підтвердження адекватності математичної моделі для визначення власних частот тягових контурів ПКД;
- формування зовнішніх навантажень, які діють на приводи ПКД, на основі аналізу розроблених математичних моделей та методик.

Об'єкт дослідження – процеси у тяговому контурі, що супроводжують експлуатацію підвісних канатних доріг.

Предмет дослідження – закономірності формування зовнішніх навантажень, які діють на приводи підвісних канатних доріг.

Методи дослідження. У роботі використовувалися теоретичні та експериментальні методи дослідження. Моделювання навантаженості несучих і тягових канатів здійснювалося з використанням методів, що ґрунтуються на положеннях теорії гнучких ниток. Частотний аналіз приводів виконувався з урахуванням методів хвильової механіки. Для розв'язання систем трансцендентних рівнянь, які є основою математичних моделей, використовувалися числові методи, реалізовані в програмному середовищі автоматизованих математичних розрахунків MathCAD. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах з використанням систем реєстрації коливань елементів досліджуваної установки з подальшою розшифровкою осцилограм та математичною обробкою отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено методику побудови частотних діаграм тягових контурів ПКД як дискретно-континуальних систем, що дозволило підвищити безпеку транспортування шляхом встановлення проектних значень швидкості руху вагонів з урахуванням необхідності попередження і обмеження резонансних явищ;
- удосконалено математичну модель тягового контуру приводу з канатоведучим шківом, яка, на відміну від існуючих, ґрунтується на представленні тягового

контур, як замкненої дискретно-континуальної динамічної системи з довільною кількістю зосереджених мас, внаслідок чого з'явилася можливість враховувати вплив несуче-тягових систем на зовнішні навантаження приводів ПКД;

- удосконалено математичні моделі навантаженості несучих канатів багатопрогонних ПКД шляхом уточнення умов спряження розрахункових ділянок несучого каната, які розташовані у суміжних прогонах, що дало можливість підвищити ефективність ПКД за рахунок раціонального профілювання траси;
- уточнено залежності для визначення окружного зусилля приводів ПКД шляхом урахування зміщення несучого каната на опорах на етапі побудови діаграм окружних зусиль, що дозволило враховувати вплив несуче-тягових систем при формуванні зовнішніх навантажень приводів ПКД.

Практичне значення одержаних результатів. Основні результати дисертації реалізовані у вигляді «Методики визначення раціональних значень швидкості руху транспортних засобів ПКД» та рекомендацій щодо вибору параметрів приводів ПКД, які можуть бути використані під час проектування канатних доріг різних типів, конструктивного виконання та призначення, а також для дослідження процесів, що виникають під час експлуатації ПКД.

Методика визначення раціональних значень швидкості руху транспортних засобів підвісних канатних доріг прийнята до використання у ТОВ «Проектно-конструкторське підприємство «Союзпромеханізація» (м. Харків), яке є головною організацією по проектуванню пасажирських та вантажних ПКД в Україні. Розроблені математичні моделі, розрахункові схеми та методики впроваджені в навчальний процес під час викладання дисциплін «Машини безперервного транспорту», «Динаміка машинного агрегату» на кафедрі «Прикладна механіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Постановку задач, аналіз і трактовку основних результатів, формування висновків і рекомендацій виконано спільно з науковим керівником.

Основні результати дисертації отримані автором особисто. Публікації [8–11] є одноосібними. Усі математичні моделі, наведені в друкованих працях, розроблені здобувачем самостійно. Щодо інших аспектів робіт, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – аналіз результатів математичного моделювання та формування рекомендацій щодо модернізації досліджуваної ПКД; [2] – розробка методики побудови діаграм окружних зусиль приводів ПКД аналітичним шляхом та порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних діаграм; [3] – формування принципів модульного компонування для математичного моделювання навантаженості несучих канатів та чисельний аналіз математичних моделей; [4, 16] – чисельний аналіз математичних моделей та формування загальних рекомендацій щодо раціонального розташування опори ПКД; [5, 7, 17] – побудова та аналіз частотних діаграм приводів ПКД; [6, 18] – чисельний аналіз математичних моделей; [12] – чисельний аналіз математичних моделей та формування рекомендацій щодо визначення раціональних параметрів приводів ПКД; [13] – обґрунтування доцільності використанням діаграм окружних зусиль

під час моделювання навантаженості елементів приводу ПКД та формування принципів їх складання; [14] – обґрунтування принципів визначення раціональних швидкісних режимів приводів ПКД, складання і аналіз частотних діаграм; [15, 21] – формування принципів визначення резервів енергії приводів ПКД; [19, 20] – розробка підходів до визначення енергоспоживання ПКД та обґрунтування способів його зниження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації були представлені на Міжнародній науково-практичній конференції «Нові досягнення в галузі проектування і експлуатації підйомно-транспортних, будівельних і дорожніх машин» (м. Харків, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової школи транспортної механіки» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Производство и эксплуатация стальных канатов – проблемы и решения» (м. Одеса, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы развития дорожно-транспортного и строительного комплексов» (м. Кіровоград, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Новые технологии, оборудование, материалы в строительстве и на транспорте» (м. Харків, 2014 р.); 70-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); 72-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (м. Дніпропетровськ, 2012 р.); 73-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.); 74-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (м. Дніпропетровськ, 2014 р.); засіданні кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, 11 квітня 2012 р.). В повному обсязі дисертація доповідалася на науковому міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано у двадцять одній друкованій праці, серед яких: 12 статей – у фахових виданнях України, в т. ч. у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз – [6, 15, 19] (бази Index Copernicus, Google Scholar, DOAJ та ін.), та 9 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 132 найменувань на 17 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 207 сторінок, в т. ч. 128 сторінок основного тексту, 49 рисунків, 8 таблиць і додатки на 54 сторінках. Рисунки, розташовані на окремих сторінках, займають 8 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, формулюється мета і задачі дослідження, подається загальна характеристика роботи.

У першому розділі аналізується сучасний стан питання навантаженості елементів підвісних канатних доріг, виділяються основні напрями досліджень.

Теоретичні основи досліджень та проектування ПКД були закладені відомими спеціалістами у галузях канатного транспорту, підйомно-транспортних машин та теорії розрахунків сталевих канатів. До таких відносяться М. Г. Адамовський, М. Б. Беркман, Н. М. Белая, Г. Н. Бовський, О. О. Горошко, О. В. Денищенко, А. І. Дукельський, А. А. Короткий, Г. Г. Куйбіда, М. П. Мартинців, Д. І. Патарая, С. В. Ракша, Г. М. Савін, Б. В. Сологуб, Л. О. Тисовський, G. A. Koranakis, K. Hoffmann, M. Knapa, R. Petrova та інші.

Однією з характерних особливостей використання канатів як елементів ПКД є їх навішування на багатопрогонній трасі. Таким чином, кожен з канатів має декілька опорних точок, які змінюють форму кривої провисання канатів у залежності від довжин прогонів та перепадів висот опорних точок. Тому під час досліджень канати, особливо несучі, моделюють як багатопрогонні, а їх загальну криву провисання розраховують як послідовне сполучення кривих у кожному з прогонів. Загальним недоліком таких моделей є припущення про те, що горизонтальна складова натягу несучого каната є однаковою для всіх прогонів. Точність таких моделей є достатньою лише для розрахунку канатів з малими стрілами провисання на прогонах малої довжини, що на сьогодні майже не використовуються під час проектування ПКД.

Моделювання канатів як елементів з розподіленими параметрами здійснюється, здебільшого, під час розрахунку шахтних підйомних установок через їх суттєву глибину, а отже, й велику довжину тягових канатів. Базовою науковою роботою в цьому питанні може вважатися монографія Г. Н. Савіна та О. А. Горошка, особливістю якої є представлення приводу у взаємодії з тяговим канатом, рухомих складом (клітями, скіпами) та натяжним пристроєм (за наявності такого), які разом утворюють тяговий контур, що моделюється як дискретно-континуальна динамічна система. При цьому враховується наявність лише одного вагона (кліті, скіпу) на кожній з віток каната. Така модель за структурою відповідає тяговому контуру ПКД маятникового типу і не може бути використана (в чистому вигляді) для дослідження динамічних процесів, що супроводжують експлуатацію приводів транспортних засобів з кількома одиницями рухомого складу на одній вітці тягового каната.

Виходячи з сучасного стану проблеми, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи, результати розв'язання яких викладено в наступних розділах.

У другому розділі представлено математичні моделі навантаженості та форми кривої провисання несучого каната ПКД з урахуванням його зміщення на опорних башмаках, отримано залежності для визначення зусилля в тяговому канаті та окружного зусилля, які є зовнішніми навантаженнями для приводу.

Особливістю складання математичної моделі навантаженості та форми кривої провисання несучого каната є використання принципу модульного компонування, згідно якого профіль ПКД являє собою сукупність послідовно з'єднаних ділянок з характерними умовами навантаження. Такі ділянки названо модулями, для кожного з них розроблено математичні описи. Такий підхід дозволяє складати мате-

математичні моделі для ПКД з профілем будь-якої складності шляхом поєднання математичних описів відповідних модулів.

Математичний опис кожного з модулів ґрунтується на дотриманні умови рівноваги несучого каната на опорному башмаку в будь-який момент часу при переміщенні вагона. Така рівновага описується формулою Ейлера, яка дозволяє враховувати опір руху каната на опорному башмаку.

Характерним з точки зору умов навантаження та математичного опису є модуль, що відповідає ділянці профілю ПКД, в якій на момент моделювання рухається вагон (рис. 1).

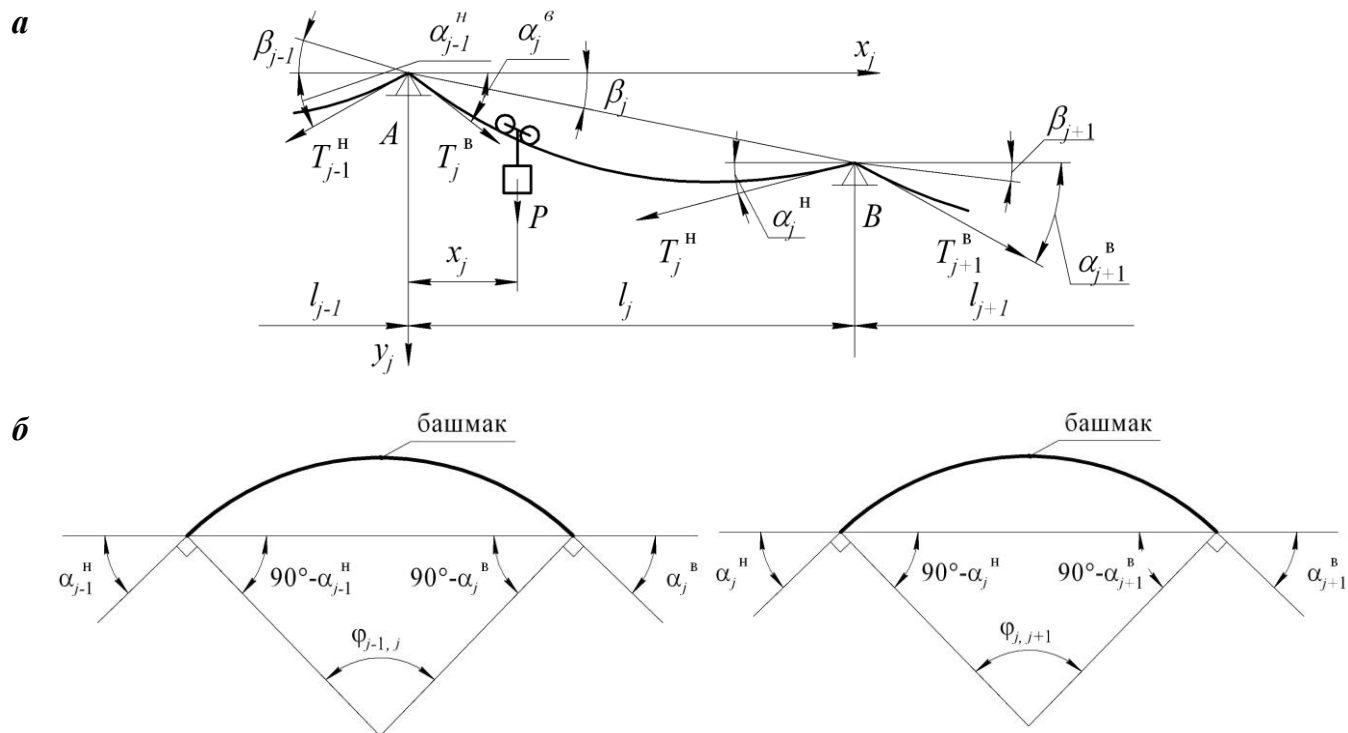


Рис. 1. Ділянка траси ПКД, в якій рухається вагон:
а – розрахункова схема; б – схеми до визначення кутів $\varphi_{j-1,j}$ та $\varphi_{j,j+1}$

Рівновага несучого каната на опорних башмаках в точках А і В забезпечується дотриманням таких умов:

$$T_j^B = T_{j-1}^H \cdot e^{\mu\varphi_{j-1,j}}; \quad T_j^H = T_{j+1}^B \cdot e^{\mu\varphi_{j,j+1}}, \quad (1)$$

де T_{j-1}^H , T_j^B – натяги каната біля опори, яка розділяє $(j-1)$ -ий та j -ий прогони;

$\varphi_{j-1,j}$ – кут охоплення канатом башмака, розміщеного на опорі, яка розділяє $(j-1)$ -ий та j -ий прогони;

T_j^H , T_{j+1}^B – натяг каната біля опори, яка розділяє j -ий та $(j+1)$ -ий прогони;

$\varphi_{j,j+1}$ – кут охоплення канатом башмака, розміщеного на опорі, яка розділяє j -ий та $(j+1)$ -ий прогони.

Кути $\varphi_{j-1,j}$ та $\varphi_{j,j+1}$ визначаються за співвідношеннями:

$$\varphi_{j-1, j} = \alpha_j^B - \alpha_{j-1}^H; \quad \varphi_{j, j+1} = \alpha_{j+1}^B - \alpha_j^H. \quad (2)$$

У виразах (1) та (2) величини з індексом «в» відповідають характеристикам верхньої опори прогону (опори *A*), а величини з індексом «н» відповідають характеристикам нижньої опори прогону (опори *B*).

Після здійснення перетворень виразів (1) отримуємо математичний опис до модуля:

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^B} = H_{j-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j-1}^H} \cdot \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_j^B - \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_j^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}); \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^B = \operatorname{tg} \beta_j + \frac{q_H l_j}{2H_j \cos \beta_j} [1 + 2k_j (1 - \delta_j)]; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{j-1} - \frac{q_H l_{j-1}}{2H_{j-1} \cos \beta_{j-1}}; \quad (5)$$

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^H} = H_{j+1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j+1}^B} \cdot \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B - \operatorname{tg} \alpha_j^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_j^H}); \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^H = \operatorname{tg} \beta_j - \frac{q_H l_j}{2H_j \cos \beta_j} \cdot (1 + 2k_j \cdot \delta_j); \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B = \operatorname{tg} \beta_{j+1} + \frac{q_H l_{j+1}}{2H_{j+1} \cos \beta_{j+1}}; \quad k_j = \frac{P}{ql_j} \cos \beta_j, \quad (8)$$

де H_{j-1} , H_j – горизонтальні складові натягів каната біля опори, яка розділяє $(j-1)$ -ий та j -ий прогони;

β_{j-1} , β_j – кути нахилу хорд $(j-1)$ -ого та j -ого прогонів відповідно;

l_{j-1} , l_j – довжини $(j-1)$ -ого та j -ого прогонів відповідно;

H_j , H_{j+1} – горизонтальні складові натягів каната біля опори, яка розділяє j -ий та $(j+1)$ -ий прогони;

β_j , β_{j+1} – кути нахилу хорд j -ого та $(j+1)$ -ого прогонів відповідно;

l_j , l_{j+1} – довжини j -ого та $(j+1)$ -ого прогонів відповідно;

P – розрахункова вага вагона;

q_H – погонна вага несучого каната;

$\delta_j = x_j / l_j$ – відносна координата, яка характеризує положення вагона в j -ому прогоні ($\delta_j = \operatorname{var}(0;1)$).

Аналогічним чином формуються математичні описи до інших модулів.

Використання розроблених за вказаними принципами математичних моделей дозволяє визначати горизонтальні складові натягів несучого каната біля опор з урахуванням його зміщення на башмаках.

Особливістю визначення зусилля в тяговому канаті ПКД є необхідність врахування взаємного впливу несучого і тягового канатів, який проявляється через залежність опору руху вагона від кута його підйому, величина якого визначається зі співвідношення

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta + \frac{P \cos \beta + (q_H + q_T)l}{2H \cos \beta} \left(1 - 2 \frac{x}{l}\right), \quad (9)$$

де β – кут нахилу хорди прогону;

q_H – погонна вага несучого каната;

q_T – погонна вага тягового каната;

l – довжина прогону;

H – горизонтальна складова натягу несучого каната;

x – відстань від верхньої опори прогону до точки прикладання ваги вагона.

Зусилля в тяговому канаті визначається за формулою

$$T = P \sin \gamma \pm P C_p \cos \gamma + W, \quad (10)$$

де C_p – коефіцієнт опору руху вагона;

W – складова натягу тягового каната від власної ваги.

У формулі (10) знак «+» відповідає руху вагона вгору, а знак «–» – руху вниз.

Під час експлуатації існуючих та при проектуванні нових канатних доріг виникає потреба у побудові діаграм окружних зусиль приводу, які відображають зміну окружного зусилля у часі або як функцію положення вагонів на трасі за різних режимів навантаження. Такі діаграми дозволяють визначати середні та пікові значення навантаженості елементів приводу, його потужності, оцінити стан обладнання після тривалої експлуатації, а також формувати зовнішні навантаження на елементи приводів шляхом встановлення максимальних значень окружних зусиль та положень вагонів у прогонах, які відповідають цим значенням.

Діаграми окружних зусиль будуються двома способами: за експериментальними даними або за результатами математичного моделювання.

Під час побудови діаграм окружних зусиль за результатами математичного моделювання для ПКД маятникового типу враховується зустрічний синхронний рух вагонів. Оскільки вони з'єднані між собою тяговим канатом, переміщення вагона з верхньої станції до нижньої (надалі – верхній вагон) уздовж траси s_B дорівнює переміщенню вагона з нижньої станції до верхньої s_H (надалі – нижній вагон). Положення вагона, який рухається вниз, визначає зусилля у збігаючій з приводного шківів вітці тягового каната T_{36} , а положення вагона, який рухається вверх, – зусилля у набігаючій на приводний шків вітці тягового каната T_{H6} .

Окружне зусилля визначається за формулою

$$F = T_{H6} - T_{36}. \quad (11)$$

Величини T_{H6} і T_{36} визначаємо згідно формули (10) з урахуванням напрямку руху вагонів (вверх або вниз):

$$T_{H6} = P_H C_p \cos \gamma_H + P_H \sin \gamma_H + W_H; \quad (12)$$

$$T_{36} = -P_B C_p \cos \gamma_B + P_B \sin \gamma_B + W_B, \quad (13)$$

де P_H , P_B – складові ваги нижнього та верхнього вагонів відповідно, які сприймаються одним тяговим канатом;

γ_H , γ_B – кути підйому нижнього та верхнього вагонів відповідно;

W_H , W_B – складові натягу віток тягового каната від власної ваги з боку нижнього та верхнього вагонів відповідно.

Для порівняння результатів математичного моделювання з експериментальними даними було використано діаграми окружних зусиль, складені спеціалістами ТОВ «Стартінвест» для маятникової ПКД «Місхор – Ай-Петрі». На рис. 2 зіставлено теоретичні та експериментальні діаграми. Відхилення експериментальних значень від результатів математичного моделювання є систематичним і пов'язане з неврахуванням деяких вихідних даних через обмеження доступу до них.

Особливу увагу слід звернути на різку зміну окружного зусилля під час проходження вагонами опор (відмітки $x = 480$ м та $x = 800$ м на рис. 2) через суттєву зміну траєкторії їх руху, що є властивим для канатних доріг усіх типів і може призводити до захлестування тягових канатів за несучі, а інколи – до сходження вагонів з несучих канатів. Рациональне профілювання ПКД, що передбачає обґрунтоване розташування опор вздовж траси з урахуванням отриманих результатів, дозволяє попередити виникнення аварійних ситуацій, тим самим підвищуючи безпеку процесу транспортування. В дисертації наведено порядок розв'язання двох практичних задач, які показують особливості використання розроблених моделей і розрахункових залежностей для визначення раціонального розміщення опор.

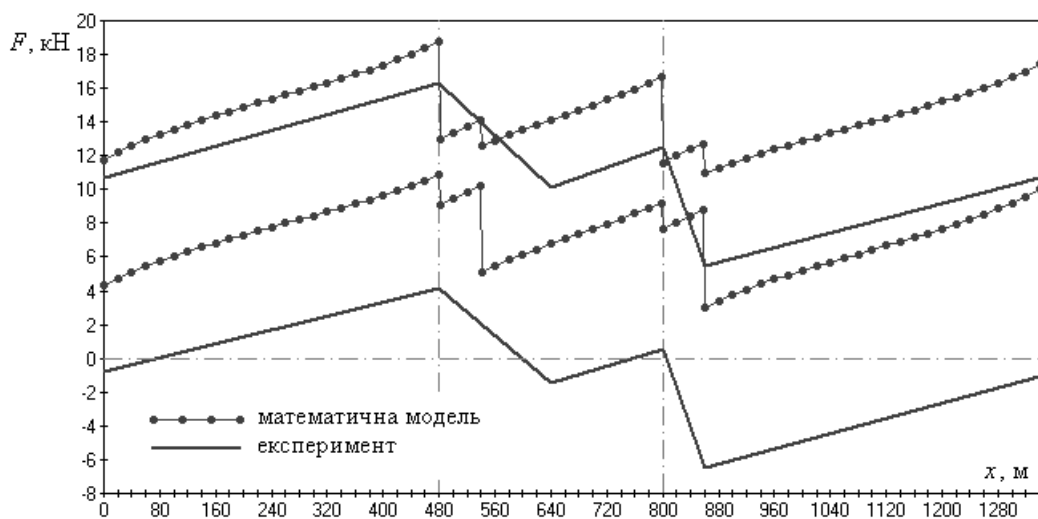


Рис. 2. Приклад діаграм окружних зусиль

У третьому розділі здійснюється математичне моделювання тягового контуру підвісної канатної дороги як дискретно-континуальної динамічної системи, визначаються його власні частоти та формуються рекомендації щодо необхідності побудови частотних діаграм на етапі проектування ПКД.

Будь-який транспортний засіб з гнучким тяговим органом, і зокрема, підвісна канатна дорога є досить складною системою з точки зору математичного моделювання динаміки її елементів. Вона характеризується наявністю зосереджених мас та елементів з розподіленими параметрами (рис. 3). Зосередженими масами буде-

мо вважати ротор електродвигуна 1, маси деталей редуктора, приведені до вихідного вала 2, приводний шків 3, реальну або умовну масу 5, що характеризує робоче зусилля натяжного пристрою тягового каната (поняття умовної маси вводиться для натяжних пристроїв не вагової дії, наприклад, гідравлічних; надалі – натяжний вантаж тягового каната) та вагони 6. Ділянки тягового каната 4 є елементами з розподіленими параметрами. Таке представлення ПКД визначає математичну модель руху її елементів у вигляді системи диференціальних рівнянь у звичайних та часткових похідних, яка є досить громіздкою та складною для аналізу.

В межах дисертаційної роботи було розроблено спрощену схему, згідно якої зосереджені маси приводу приводяться до приводного шківа (рис. 4), що дає можливість моделювати динаміку тягового контуру на основі положень хвильової механіки. Така схема характеризується наявністю як обертальних мас, так і мас, що рухаються поступально. Тому для подальшого моделювання було складено схему заміщення тягового контуру (рис. 5), згідно якої всі види руху приводяться до поступальних.

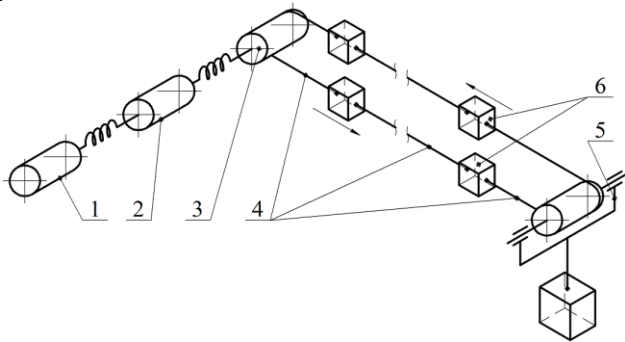


Рис. 3. Схема тягового контуру ПКД як системи зосереджених мас та елементів з розподіленими параметрами

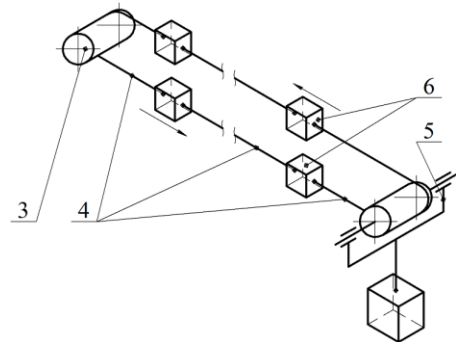


Рис. 4. Спрощена схема тягового контуру ПКД

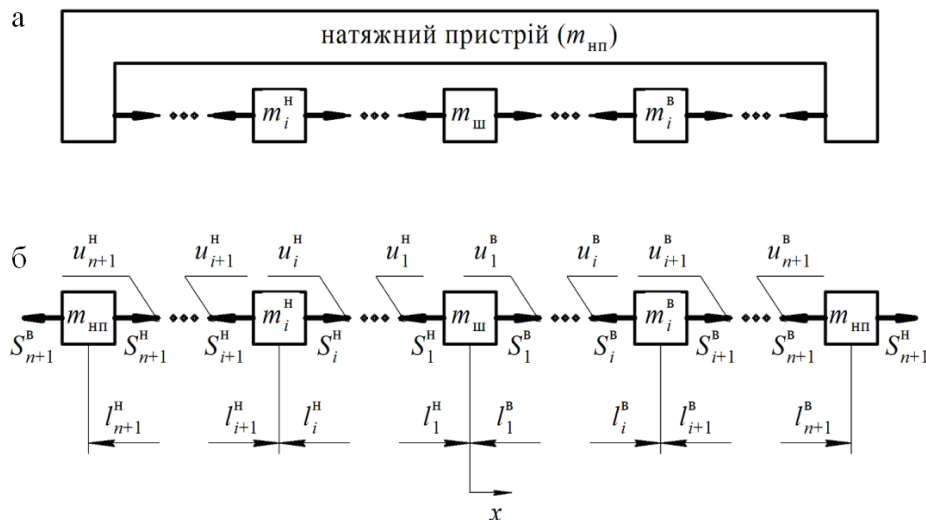


Рис. 5. Схема заміщення тягового контуру:
а – загальний вигляд; б – з прикладанням додаткових сил

На рис. 5 прийнято такі позначення:

$m_{ш}$ – маса шківа (маса всіх рухомих елементів приводу, приведена до приводного шківа);

$m_{\text{НП}}$ – маса (еквівалент робочого зусилля) натяжного пристрою тягового каната;

$m_i^{\text{Н}}$ – маса i -ого нижнього вагона ($i = \overline{1, n}$);

$m_i^{\text{В}}$ – маса i -ого верхнього вагона ($i = \overline{1, n}$);

$u_1^{\text{Н}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між шківом та першим вагоном на нижньому напрямку руху;

$u_i^{\text{Н}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між $(i-1)$ -им та i -им вагонами на нижньому напрямку руху ($i = \overline{2, n}$);

$u_{n+1}^{\text{Н}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між i -им вагоном на нижньому напрямку руху та натяжним пристроєм;

$u_1^{\text{В}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між шківом та першим вагоном на верхньому напрямку руху;

$u_i^{\text{В}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між $(i-1)$ -им та i -им вагонами на верхньому напрямку руху ($i = \overline{2, n}$);

$u_{n+1}^{\text{В}}$ – пружна деформація ділянки тягового каната між i -им вагоном на верхньому напрямку руху та натяжним пристроєм);

$S_1^{\text{Н}}, S_i^{\text{Н}}, S_{n+1}^{\text{Н}}, S_1^{\text{В}}, S_i^{\text{В}}, S_{n+1}^{\text{В}}$ – пружні сили, які відповідають деформаціям $u_1^{\text{Н}}, u_i^{\text{Н}}, u_{n+1}^{\text{Н}}, u_1^{\text{В}}, u_i^{\text{В}}, u_{n+1}^{\text{В}}$.

Згідно наведених позначень математична модель, яка описує динамічний стан приводу, складається з рівнянь у формі деформацій ділянок тягового каната з використанням положень хвильової механіки:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^{\text{Н}} = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^{\text{Н}}; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} U^{\text{В}} = a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} U^{\text{В}}, \end{cases} \quad (14)$$

де $U^{\text{Н}} = \begin{bmatrix} u_i^{\text{Н}} \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового каната на нижньому напрямку руху вагонів ($i = \overline{1, n+1}$);

$U^{\text{В}} = \begin{bmatrix} u_i^{\text{В}} \end{bmatrix}$ – вектор деформацій ділянок тягового каната на верхньому напрямку руху вагонів ($i = \overline{1, n+1}$);

a – швидкість розповсюдження пружної хвилі у поздовжньому напрямку коливань.

Оскільки математичну модель складено у загальному формалізованому вигляді, вона є універсальною і дозволяє досліджувати динаміку тягових контурів ПКД різних типів.

Граничні умови до рівнянь системи (14) є основою для складання частотної функції, за якою визначаються власні частоти тягового контуру ПКД зі співвідношення

$$\omega = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{EF}{q}}, \quad (15)$$

де λ – власне число частотної функції;

l – довжина тягового каната на одному напрямку руху;

E , F , q – модуль пружності, площа поперечного перерізу та погонна маса тягового каната.

За значеннями, отриманими в кількох точках розташування вагонів на трасі, будуються частотні діаграми, які відображають зміну власних частот тягового контуру ПКД під час руху вагонів. Такі діаграми різняться за своїм характером та значеннями власних частот в залежності від параметрів канатної дороги та ступеню завантаженості вагонів.

На рис. 6 наведено приклад частотної діаграми для ПКД маятникового типу. Трьома кривими відображено зміну перших трьох власних частот тягового контуру (ω) під час руху вагонів між станціями (x – координата вагона, який рухається від верхньої станції до нижньої). Перша частота визначається приведеною масою приводного шківів і є постійною. Друга та третя частоти характеризують вплив мас вагонів та змінюються в доволі широкому діапазоні через значну зміну довжин ділянок тягового каната під час руху вагонів (див. рис. 4).

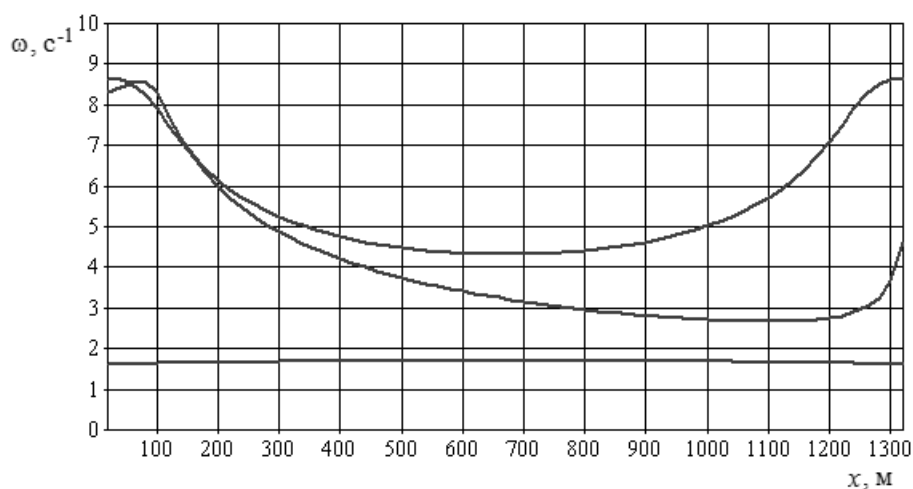


Рис. 6. Приклад частотної діаграми для ПКД маятникового типу

На відміну від маятникових доріг, динаміка власних частот тягових контурів ПКД кільцевого типу є незначною (рис. 7). Перша частота так само є постійною. Друга частота не змінюється, оскільки відстань між вагонами, а отже, й довжини відповідних ділянок тягового каната є фіксованими.

У разі співпадання частоти обертання приводного шківів з однією з власних частот приводу можуть спостерігатися резонансні явища, пов'язані з неточністю виготовлення та монтажу елементів приводу. Під час пуску ПКД долання резонансної зони за першою власною частотою уникнути неможливо, однак подальше обмеження частоти обертання приводного шківів, а отже, й швидкості руху ваго-

нів дозволить попередити виникнення резонансних явищ за другою та третьою власними частотами. Таким чином, побудова частотних діаграм на етапі проектування ПКД дозволяє уникнути тривалого руху вагонів зі швидкістю, що відповідає критичним значенням або є близькою до них. В такий спосіб можна формувати зовнішні навантаження на привід, зменшуючи їх шляхом уникнення резонансних явищ за рахунок призначення раціональних швидкісних режимів руху вагонів.

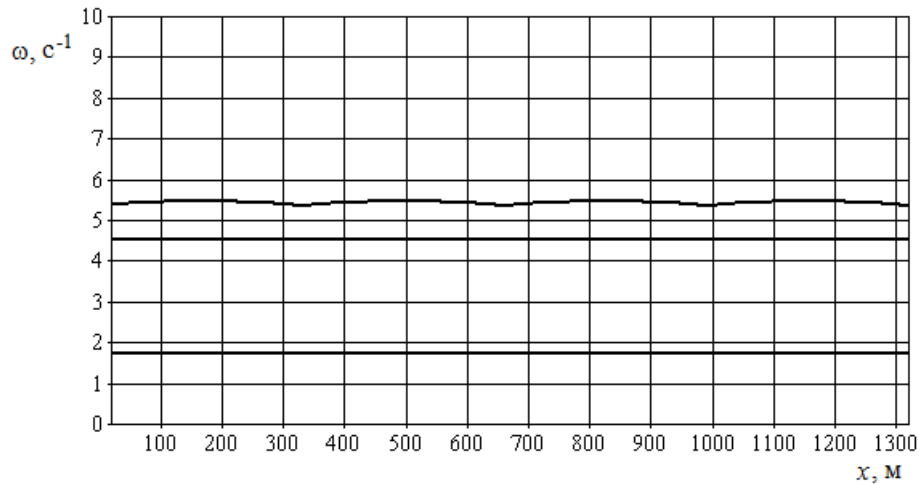


Рис. 7. Приклад частотної діаграми для ПКД кільцевого типу

Результати досліджень, відображені в третьому розділі, знайшли своє практичне втілення у вигляді «Методики визначення раціональних значень швидкості руху транспортних засобів підвісної канатної дороги», яка була прийнята до використання ТОВ «ПКП «Союзпроммеханізація» (м. Харків).

У **четвертному розділі** представлені результати експериментальних досліджень частотного спектра підвісної канатної дороги. Метою було підтвердження адекватності математичної моделі, за якою визначаються власні частоти тягового контуру ПКД.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалася лабораторна установка, яка була розроблена та змонтована в приміщеннях лабораторії кафедри прикладної механіки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (рис. 8).

Для здійснення реєстрації зміни прискорення руху елементів тягового контуру використовувалася вимірювальна система, яка містить таке обладнання:

- акселерометр (датчик прискорення) АТ 1105-05; діапазон вимірювання – (0...5) g; діапазон частот – (0...500) Гц; похибка вимірювання – 2,5 %;
- восьмиканальний універсальний підсилювач QuantumX MX840A; клас точності – 0,05;
- комп'ютер з програмним забезпеченням Catman Easy 3.2.3.

В результаті виконання експерименту отримуємо ряд осцилограм, за якими визначаємо частоти зміни прискорення як полігармонійної функції. Ці величини дорівнюють власним частотам тягового контуру, а отже, здійснюючи заміри у кількох дискретних положеннях вагонів на трасі, можна побудувати частотні діаграми.

Подальшою метою був пошук на осцилограмі гармонік досліджуваного процесу, які за частотами близькі до визначених аналітичним шляхом. Для цього бу-

ло проаналізовано фрагмент осцилограми від моменту збудження коливань тягового контуру як динамічної системи внаслідок дії одиничного імпульсу. На цьому фрагменті встановлювалися періоди хвиль (T), що виражені достатньою мірою, за якими визначалися їх частоти

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ с}^{-1}. \quad (16)$$

Приклад такого фрагмента наведено на рис. 9.

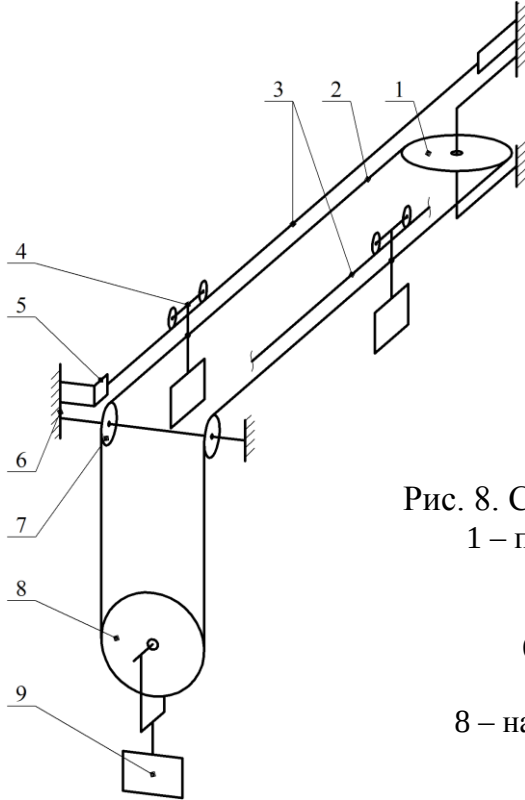


Рис. 8. Схема експериментальної установки:

- 1 – приводний шків; 2 – тяговий канат;
- 3 – несучий канат; 4 – вагон;
- 5 – якір несучого каната;
- 6 – опорна металоко́нструкція;
- 7 – відхиляючий блок;
- 8 – натяжний шків; 9 – натяжний вантаж

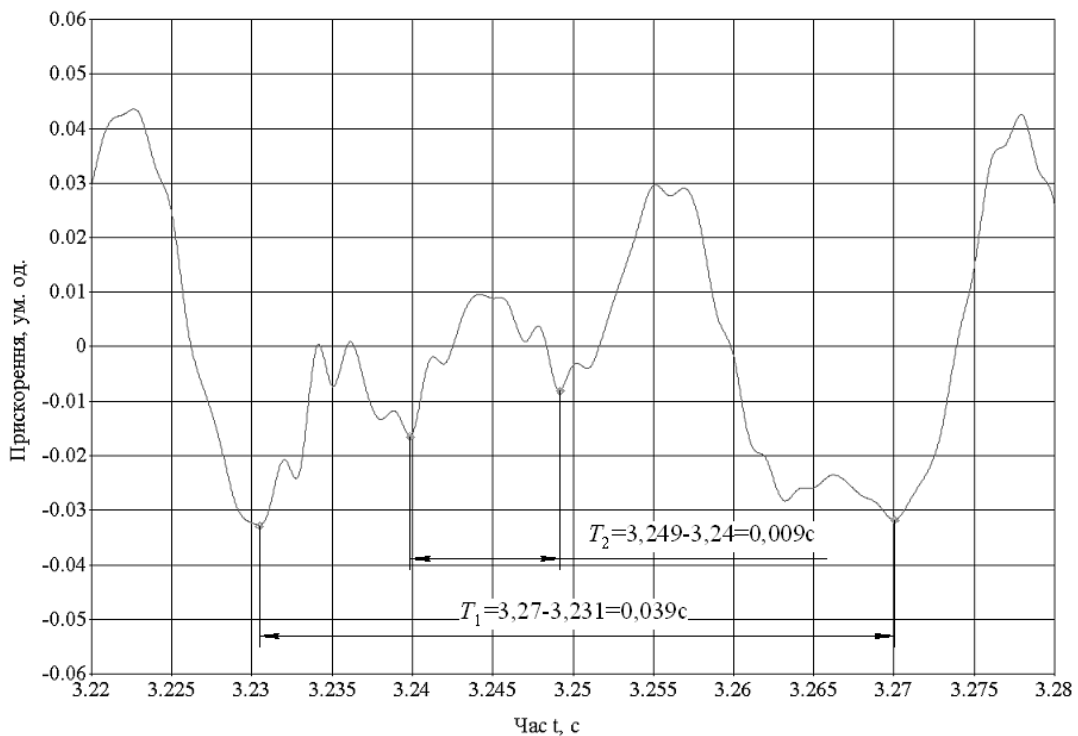


Рис. 9. Фрагмент осцилограми для визначення періодів хвиль

Збіжність результатів, отриманих аналітичним шляхом та експериментально, є задовільною та характеризується відхиленням експериментальних значень власних частот від теоретичних в межах до 14 %, що є прийнятним та свідчить про адекватність математичної моделі, розробленої в розділі 3.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішено актуальне науково-технічне завдання – розробка та обґрунтування універсальних моделей процесів, які супроводжують експлуатацію ПКД, із залученням точних методів дослідження та сучасних технологій з метою формування зовнішніх навантажень.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Виконано аналіз відомих математичних моделей процесів, що супроводжують експлуатацію ПКД, який дозволив виділити проблемні питання, пов'язані з проектуванням та використанням ПКД, сформулювати тему дисертації, мету і задачі досліджень.
2. Використання уточнених математичних моделей під час проведення теоретичних досліджень по визначенню впливу несуче-тягових систем на умови виникнення аварійно небезпечних явищ захлестування тягового каната за несучий та сходження вагонів з несучого каната дозволило встановити раціональні значення параметрів профілю ПКД. Для багатьох ПКД маятникового типу доцільно планувати профіль з прогонами однакової довжини, забезпечуючи при цьому різницю довжин несучого каната в прогонах за рахунок зміни висот опор. Зокрема, для двопрогонних ПКД маятникового типу, параметри яких відповідають найбільш розповсюдженим значенням, висоти опор слід вибирати таким чином, щоб відношення перепадів висот першого та другого прогонів складало 1:4.
3. Аналіз отриманих аналітичних залежностей свідчить про те, що розробка профілю ПКД з прогонами однакової довжини, кратної кроку навішування вагонів, є небажаним через суттєве збільшення навантаженості елементів приводу (до 30 % за діаграмою окружних зусиль під час проходження вагонами опор). Однак такий профіль є допустимим у разі техніко-економічного обґрунтування (зокрема, з урахуванням можливості підвищення продуктивності ПКД) за умови використання натяжного пристрою до несучого каната, що призводить до збільшення навантаженості елементів приводу лише на 8 %.
4. Теоретичні дослідження щодо визначення власних частот тягових контурів ПКД та складання за ними частотних діаграм дозволили встановити критичні значення частоти обертання приводного шківів та швидкості руху вагонів, за яких спостерігаються резонансні явища. Зокрема, для ПКД маятникового типу, параметри тягових контурів яких відповідають найбільш розповсюдженим значенням, критична швидкість руху вагонів в прогонах дорівнює 8,5 м/с, а під час проходження вагонами опор – 6,5 м/с. Для ПКД кільцевого типу з характерними параметрами тягового контуру критична швидкість руху вагонів в прогонах встановлена на рівні 6,5 м/с, а під час

проходження вагонами опор – 6 м/с. Для більшості ПКД перехідні режими розгону та сповільнення рекомендовано реалізовувати під час роботи приводу в дорезонансній та першій міжрезонансній зонах власних частот тягового контуру. Усталений рух вагонів ПКД маятникового типу слід здійснювати під час роботи приводу в другій міжрезонансній зоні частот, а для ПКД кільцевого типу – у першій міжрезонансній зоні. Такий підхід дозволяє збільшити продуктивність ПКД та зменшити навантаження на її елементи, що сприяє підвищенню ефективності ПКД (для окремого випадку отримано збільшення продуктивності до 20 %).

5. У лабораторних умовах на фізичній моделі ПКД проведено перевірку адекватності математичної моделі динаміки тягового контуру та визначені його власні частоти. Збіжність є задовільною і не перевищує 14 %.

Основний зміст дисертації опублікований у наукових працях

Основні роботи

1. Горячев Ю. К. До питання про раціональне розміщення опор підвісної канатної дороги маятникового типу / Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 2 (33). – С. 30–37.
2. Горячев Ю. К. Построение диаграмм окружных усилий привода маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, Л. Г. Сванидзе, А. С. Куропятник, В. Ф. Супрунов // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 4. – С. 56–63.
3. Горячев Ю. К. Применение принципа модульной компоновки к математическому моделированию нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава. – 2010. – № 2 (27). – С. 205–214.
4. Горячев Ю. К. Рациональное размещение опоры двухпролетной маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Подъемно-транспортная техника. – 2010. – № 2. – С. 87–93.
5. Ракша С. В. Анализ влияния подвижных масс подвесной канатной дороги на спектр собственных частот привода / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2013. – № 1 (30). – С. 110–116.
6. Ракша С. В. Аналіз впливу пружних деформацій несучого каната на зусилля в тяговому канаті підвісної дороги / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 110–119.
7. Ракша С. В. Застосування частотних діаграм для вивчення динаміки приводів підвісних канатних доріг / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Подъемно-транспортная техника. – 2014. – № 3 (43). – С. 38–53.

Додаткові роботи

8. Куроп'ятник О. С. Особливості визначення тягового зусилля приводу маятнкової підвісної канатної дороги / О. С. Куроп'ятник // Матеріали 70 Міжнародної научно-практичної конференції «Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта» (посвящается 80-летию ДИИТа) (Днепропетровск, 15–16 апреля 2010 г.). – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железнодорож. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 32–33.
9. Куроп'ятник О. С. Поліпшення профілю підвісної канатної дороги маятникового типу / О. С. Куроп'ятник // Materiály VIII Mezinárodní vědecko-praktická konference «Dny vědy – 2012». Díl 90 «Technické vědy» (Praha, 27.03–05.04.2012). – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2012. – Р. 56–58.
10. Куроп'ятник О. С. Розробка профілю підвісної канатної дороги з урахуванням діаграм окружних зусиль / О. С. Куроп'ятник // Тези доповідей 72 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 19–20 квітня 2012 р.). Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 123–124.
11. Куроп'ятник А. С. Расчет несущих канатов многопролетных маятниковых подвесных дорог [Электронный ресурс] / А. С. Куроп'ятник // Матеріали VI Міжнародної научно-практичної конференції «Актуальные проблемы современных наук» (7–9 июня 2010 г.). – Режим доступа : http://www.rusnauka.com/Page_ru.htm.
12. Ракша С. В. Визначення раціональних параметрів приводу підвісної канатної дороги / С. В. Ракша, О. С. Куроп'ятник // Проблеми розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів : збірник статей і тез доповідей (Кіровоград, 03–05 жовтня 2013 р.). – С. 116–119.
13. Ракша С. В. Моделювання навантаженості елементів приводу підвісної канатної дороги з використанням діаграм окружних зусиль / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Тези доповідей 73 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 23–24 травня 2013 р.). Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 130–131.
14. Ракша С. В. Обоснование рациональных скоростных режимов приводов подвесных канатных дорог / С. В. Ракша, А. С. Куроп'ятник // Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті : матеріали конференції (Харків, 26–28 листопада 2014 р.). – Харків, 2014. – С. 14–15.
15. Горячев Ю. К. Исследование возможности использования резервов энергии приводов подвесных канатных дорог с учетом диаграмм окружных усилий / Ю. К. Горячев, А. С. Куроп'ятник, М. Р. Измайлов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – № 3 (51). – С. 109–116.

16. Горячев Ю. К. Улучшение профиля маятниковой подвесной канатной дороги / Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник // Збірник наукових праць ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – 2011. – № 18. – С. 24–28.
17. Ракша С. В. Аналіз спектра власних частот приводу підвісної канатної дороги / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Сб. научн. трудов «Строительство. Материаловедение. Машиностроение». – 2012. – № 66. – С. 249–256.
18. Ракша С. В. Моделювання навантаженості приводу канатної дороги з урахуванням зміщення несучого каната на опорах / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, О. С. Куроп'ятник // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2012. – № 57. – С. 75–84.
19. Ракша С. В. Обоснование способов снижения энергопотребления подвесных канатных дорог / С. В. Ракша, А. С. Куропятник, А. А. Курка // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2014. – № 1 (49). – С. 125–131.
20. Ракша С. В. Раціональне проектування підвісних канатних доріг з урахуванням ресурсозберігаючих технологій / С. В. Ракша, О. С. Куроп'ятник, А. О. Курка // Тези Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової школи транспортної механіки» (Дніпропетровськ, 05 грудня 2013 р.). – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – С. 44–45.
21. Ракша С. В. Формализация подходов к определению резервов энергии приводов подвесных канатных дорог / С. В. Ракша, Ю. К. Горячев, А. С. Куропятник, М. Р. Измайлов // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : Тезисы 74 Международной научно-практической конференции (Днепропетровск, 15–16 мая 2014 г.). – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железнодорож. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2014. – С. 141–142.

АНОТАЦІЯ

Куроп'ятник О. С. Формування зовнішніх навантажень на приводи підвісних канатних доріг з урахуванням впливу несуче-тягових систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.12 – промисловий транспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2016 р.

Дисертація присвячена формуванню зовнішніх навантажень на приводи підвісних канатних доріг з урахуванням впливу несуче-тягових систем шляхом вдосконалення математичних моделей процесів, що супроводжують експлуатацію ПКД.

У дисертації отримано нові науково обґрунтовані результати, які дозволяють удосконалити методики проектного розрахунку підвісних канатних доріг. Уточнено умови взаємодії несучих канатів з опорними башмаками та їх вплив на навантаженість приводу. Відмічено наявність стрибкоподібної зміни окружного зу-

силля, що може призвести до виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних зі сходженням вагонів з несучих канатів та захлестуванням тягових канатів за несучі.

Дослідження динаміки тягових контурів підвісних канатних доріг на предмет визначення їх власних частот дозволило рекомендувати виконання побудови частотних діаграм на етапі проектування доріг з метою визначення раціональних швидкостей руху вагонів.

Ключові слова: підвісна канатна дорога, несучий канат, тяговий канат, тяговий контур, зовнішні навантаження.

АННОТАЦИЯ

Куропятник А. С. Формирование внешних нагрузок на приводы подвесных канатных дорог с учетом влияния несущо-тяговых систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.12 – промышленный транспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2016 г.

Диссертация посвящена формированию внешних нагрузок на приводы подвесных канатных дорог с учетом влияния несущо-тяговых систем путем усовершенствования математических моделей процессов, сопровождающих эксплуатацию ПКД.

В диссертации выполнен анализ существующих подходов к моделированию нагруженности элементов ПКД, в частности, несущо-тяговых систем, включающих в себя несущие и тяговые канаты, и приводов. Эти составляющие находятся во взаимодействии с вагонами, образуя тяговый контур, поэтому в ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований было учтено влияние несущо-тяговых систем при формировании внешних нагрузок на приводы ПКД как промышленного транспорта.

В диссертации получены новые научно обоснованные результаты, позволяющие усовершенствовать методики проектного расчета подвесных канатных дорог. Уточнены условия взаимодействия несущих канатов с опорными башмаками и их влияние на нагруженность привода. Отмечено наличие скачкообразного изменения окружного усилия, что может привести к возникновению аварийных ситуаций, связанных со сходом вагонов с несущих канатов и захлестыванием тяговых канатов за несущие.

С целью обеспечения возможности учета влияния несущо-тяговой системы на формирование внешних нагрузок на привод профиль ПКД был представлен в виде последовательно соединенных пролетов с характерными параметрами нагружения – модулей. Эти модули классифицированы в зависимости от положения вагона на трассе; так были выделены пролеты, не содержащие вагонов и расположенные выше пролета, в котором движется вагон, а также пролеты, не содержащие вагонов, но расположенные ниже пролета, в котором движется вагон. Отдельно рассматривался пролет, в котором движется вагон в конкретный момент времени. Как частные случаи выделялись первый и последний пролеты трассы, если в них находились вагоны.

Для каждого модуля составлена система уравнений, описывающих равновесие несущего каната на опорных башмаках с учетом сопротивления его перемещению в процессе движения вагонов. Сочетание математических описаний различных модулей позволило разработать математические модели формирования кривой провисания несущего каната, а также учесть влияние его смещения на опорах на нагруженность привода.

Исследование динамики тяговых контуров подвесных канатных дорог на предмет определения их собственных частот позволило рекомендовать выполнение построения частотных диаграмм на этапе проектирования дорог с целью определения рациональных скоростей движения вагонов.

Особенностью формирования математического аппарата, используемого при выполнении исследований, является представление тягового контура ПКД в виде дискретно-континуальной динамической системы, которая включает в себя сосредоточенные массы, соединенные между собой элементами с распределенными параметрами. При этом сосредоточенными принимались массы элементов привода, приведенные к приводному шкиву, массы вагонов, а также масса, эквивалентная рабочему усилию натяжного устройства тягового каната. Элементами с распределенными параметрами считались участки тягового каната, соединяющие сосредоточенные массы. Такой подход позволил составить математические модели, используемые для исследования спектра собственных частот тягового контура, в виде системы граничных условий к волновым уравнениям, описывающим динамическое состояние ПКД. Адекватность таких моделей была подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: подвесная канатная дорога, несущий канат, тяговый канат, тяговый контур, внешние нагрузки.

SUMMARY

Kuropyatnik A. S. Formation of external loads on drives of ropeways with the influence of carrier-traction systems. – Manuscript.

A thesis for the degree of Candidate of Technical Science in the specialty 05.22.12 – industrial transport. – Dnipropetrovsk national university of railway transport named after the academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, 2016.

Dissertation is devoted to the formation of the external loads on the drives of ropeways with the influence of carrier traction systems by improving mathematical models of processes accompanying the operation of the ropeways.

The dissertation received the new scientifically grounded findings allowing improved design calculation methods of ropeways. Conditions of interaction of the cable to the support and their influence on the loading of drive were clarified. Availability of hopping of driving force was noted. This phenomenon can result in accidents associated with the carriages departure from the track cables and traction ropes entanglement for the track cables.

Study of the dynamics of traction circuits of ropeways to determine their natural frequencies allowed to recommend the drawing of the frequency diagrams on the stage of designing the ropeways to determine rational speeds of the cars.

Keywords: ropeway, track cable, hauling rope, traction circuits, external loads.

Куруп'ятник Олексій Сергійович

ФОРМУВАННЯ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРИВОДИ
ПІДВІСНИХ КАНАТНИХ ДОРІГ З УРАХУВАННЯМ
ВПЛИВУ НЕСУЧЕ-ТЯГОВИХ СИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку «_____» _____ 20____ р.

Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 пр.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
ДК № 1315 від 31.03.03

Адреса видавця і дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010