

Розроблено систему інноваційної діагностики хрестовин стрілочних переводів. Проведено експериментально-теоретичні дослідження позовжнього профілю хрестовин стрілочних переводів залізничної колії, укладених на залізобетонних брусах. Установлено характерні траєкторії руху центра мас колеса по хрестовині залежно від зносу вузовиків та осердя хрестовини. Розроблено математичну модель прогнозування зносу профілю хрестовин залежно від пропущеного тоннажу

Ключові слова: хрестовина, стрілочний перевід, позовжній профіль, траєкторія руху, рухомий склад залізниць

Разработана система инновационной диагностики крестовин стрелочных переводов. Проведены экспериментально-теоретические исследования продольного профиля крестовин стрелочных переводов железнодорожного пути, установленных на железобетонных брусках. Установлены характерные траектории движения центра масс колеса по крестовине в зависимости от износа усовиков и сердечника крестовины. Разработана математическая модель прогнозирования износа профиля крестовин в зависимости от пропущенного тоннажа

Ключевые слова: крестовина, стрелочный перевод, продольный профиль, траектория движения, подвижный состав железных дорог

РОЗРОБКА ПЕРСПЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ХРЕСТОВИН СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФІЛЮ

В. В. Ковальчук

Кандидат технічних наук*

E-mail: kovalchuk.diiit@gmail.com

М. П. Сисин

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра «Проектування залізничної інфраструктури»

Дрезденський Технічний Університет

Гетнерштрассе, 3/353, м. Дрезден, Німеччина, D-01069

E-mail: mykola.sysyn@tu-dresden.de

Ю. М. Гнатів

Кандидат фізико-математичних наук, доцент

Кафедра «Транспортні технології»**

E-mail: yuhnativ@gmail.com

О. М. Баль

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: olenabal79@gmail.com

Б. З. Парнета

Кандидат технічних наук, доцент***

E-mail: f_termit@yahoo.com

А. Я. Пенцак

Кандидат технічних наук, доцент***

E-mail: apentsak1963@gmail.com

*Кафедра «Рухомий склад і колія»**

**Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. І. Блажкевич, 12а, м. Львів, Україна, 79052

***Кафедра «Будівельне виробництво»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

На залізницях України у теперішній час експлуатуються більше, ніж 50 тис. стрілочних переводів та глухих пересічень. Більшість з них (98 %) – це поодинокі звичайні стрілочні переводи.

Основними переводами, що найбільш розповсюджені на дорогах Укрзалізниці після 1990 року, є переводи, що укладаються на залізобетонних брусах, типу Р65 марок 1/11 та 1/9 проектів ПТКБ ЦП МПС – 1740 та 2215 [1]. У теперішній час ці базові моделі переводів суттєво модифіковані. Модифікації стосувались окремих

конструктивних вузлів при збереженні основних геометричних розмірів [2, 3]. В експлуатації є багато дослідних проектів стрілочних переводів, які мають нові конструкторські рішення. Це впровадження косоного з'єднання, подовження рейкових закінчень та виконання безударної поверхні кочення на хрестовині [4].

У результаті обробки статистичних даних за показником пропущеного тоннажу було виявлено, що діючий профіль ГОСТ 28370-89 не відповідає експлуатаційним умовам, оскільки середнє напрацювання хрестовин на всіх дослідних напрямках Укрзалізниці не досягає гарантійного терміну напрацювання [3]. У більшості випадків

напрацювання хрестовин не досягає терміну напрацювання на відмову практично вдвічі.

Аналіз вилучених хрестовин за пропущеним тоннажем показав, що найбільший відсоток відмов хрестовин здійснюється з причин викришування та зносу осердя хрестовин і вусовиків. Якщо проаналізувати розподіл дефектів за найпоширенішими проектами стрілочних переводів, то можна побачити, що найбільша кількість відмов хрестовин спостерігається у проекті 1740 (рис. 1).

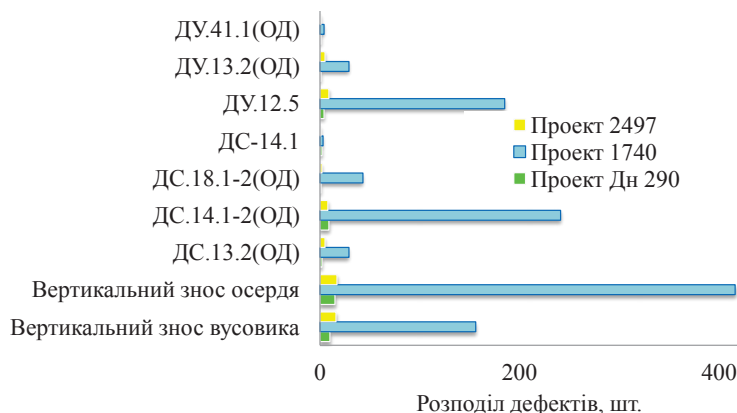


Рис. 1. Гістограма розподілу дефектів за проектами стрілочних переводів

Дослідженнями особливостей взаємодії колії та рухомого складу в зоні стрілочних переводів установлено [5, 6], що вертикальна нерівність у зоні поверхні кочення хрестовини [7] зумовлює додаткові динамічні сили рухомого складу на хрестовину.

Для визначення динамічних сил взаємодії на хрестовинах, установлених на залізобетонній основі, необхідно в першу чергу встановити види і параметри вертикальних нерівностей хрестовин при різних рівнях зношеності.

Відомий пристрій для вимірювання зносу сердечника і вусовиків хрестовин – лінійка А. К. Янковського [9], містить горизонтальну сталеву планку із нанесеною міліметровою шкалою, рухома і нерухома опори. Недоліком проведення вимірювань є значна трудомісткість, оскільки при одному переміщенні лінійки отримуємо тільки одне значення зносу сердечника чи вусовика хрестовини. Крім того є вплив людського фактору на результати вимірювань, які залежать від правильності встановлення лінійки і взяття відліку.

Відомий у Росії механічний хрестовинний профілограф (Патент RU № 89120), для вимірювання поперечного профілю хрестовин не дає можливість перенесення зображення профілю на папір при атмосферних опадах, а також має обмежену область застосування, оскільки працює на механічному принципі дії. Додатковими недоліками профілографа є обмеженість виміру профілю хрестовини тільки в одному поперечному напрямку, залежність результатів від поперечного розташування вимірювального колеса та його профілю, а також необхідність зміни профілю вимірювального колеса для виміру траєкторії руху коліс із зносом металу на поверхні кочення.

На даний час у країнах Європейського союзу для діагностики стрілочних переводів використовується багато механічних та інерційних систем [3]. Дані системи спря-

мовані на вимірювання параметрів динамічної взаємодії хрестовин під час проходження рухомого складу залізниць. Найбільш широко використовується на залізницях ЄС механічний профілограф Miniprof-Switch для вимірювання поперечного профілю сердечника хрестовини (рис. 2). Проте система дозволяє отримати поперечний профіль хрестовини тільки в конкретному перетині сердечника, а не поверхню вздовж сердечника, що не дає можливості об'єктивно оцінити технічний стан хрестовини.

У Німеччині діагностика хрестовин проводиться із використанням системи ESAH-M та ESAH-F. Система ESAH-M (рис. 3) являє собою пристрій для запису прискорень і пристрій для визначення швидкості руху рухомого складу.

Проведенні багаторічні вимірювання прискорень у сердечнику хрестовини показали, що дана система дає значний розкид виміряних значень прискорень. Це пов'язано насамперед із неврахуванням факторів, що виникають при взаємодії колеса рухомого складу і хрестовини: врахування напрямку руху рухомого складу, ідентифікація місця удару, що має значний вплив на значення прискорень.



Рис. 2. Хрестовинний профілограф Miniprof-Switch



Рис. 3. Інерційна система діагностики хрестовин стрілочних переводів ESAH-M

Відома система діагностики хрестовин стрілочних переводів ESAH-F (рис. 4), що складається із датчика прискорень та системи збору даних, розташованих на рейковому транспортному засобі, швидкостеміру та навігаційного пристрою оцінює граничні значення виміряних вібраційних прискорень. У тому випадку, якщо задані

граничні значення вібраційних прискорень перевищені, проводиться подальше ретельне контрольне вимірювання стану елементів стрілки, пересічення або стрілочного переводу. У результаті цього можна прогнозувати необхідний термін ремонтних робіт і відповідні витрати на ремонтні роботи.



Рис. 4. Інерційна система діагностики хрестовин стрілочних переводів ESAH-F

Проте при проїзді рейковим транспортним засобом через стрілку, хрестовину, стрілочний перевід, або рейковий стик неможливо встановити їх фактичний знос з такою точністю, що навіть без наявності пошкодженого стану можна було б прогнозувати потрібний вид ремонтних робіт. Можливо лише встановити, що при перевищенні певного граничного значення відповідна ділянка колії вже є пошкодженою. Також за допомогою даного пристрою неможливо встановити технічний стан всіх хрестовин на залізничній станції, велика кількість зібраної інформації із ділянки руху поїзда та важкість ідентифікації експлуатаційних хрестовин.

Тому розробка систем вимірювань параметрів геометричних нерівностей, які виникають на хрестовинах стрілочних переводів, надасть можливість прогнозувати термін служби. Проведений відповідний моніторинг вертикального зносу хрестовин дозволить прийняти своєчасні інженерні рішення для підвищення несучої здатності хрестовин стрілочних переводів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Основним фактором, який впливає на рівень динамічних сил на хрестовинах, є нерівність у вертикальній площині, яка викликана профілем вусовиків та осердя [8, 9]. Унаслідок цього поздовжній і поперечний профілі хрестовини впливають на інтенсивність зносу елементів, утворення дефектів і в кінцевому результаті на термін її служби.

У роботі [10] встановлено, що найбільш розповсюдженими є нерівності синусоїдальної форми, а також впадини та горби. Найбільш несприятливими відносно силової взаємодії є нерівності у вигляді впадин та синусоїдальні [11].

Найбільші сили взаємодії реалізуються на ділянках нерівності у зоні вкочування коліс на ухили зустрічного напрямку [12].

У роботі [13] доведено, що вертикальна траєкторія руху центра нового колеса при перекочуванні по нерівності практично повністю ідентична самій вертикальній нерівності на поверхні кочення хрестовини. Таким чином,

вертикальна траєкторія перекочування незношеного колеса характеризує вертикальну нерівність на хрестовині. На основі цієї залежності запропонована конструкція вимірювального приладу – траєкторіографа для запису реальної форми нерівностей на хрестовинах.

Великий обсяг експериментальних досліджень траєкторій перекочування коліс по хрестовинах різної конструкції та марок для стрілочних переводів як магістрального, так і промислового транспорту [8, 9]. У даних роботах отримані середньостатистичні нерівності, що характеризують хрестовини стрілочних переводів різної конструкції у станах середньої зношеності та допустимого максимального зносу. При цьому враховано напрям руху поїздів (пошерстний (ПШ), або протишерстний (ПРШ) рух). Для середньостатистичних нерівностей кожна ордината дорівнює математичному очікуванню ординати нерівності в даній точці у прийнятій до обробки кількості нерівностей хрестовин даної конструкції, типу та марки.

Слід зауважити, що практично всі попередні дослідження проводилися для стрілочних переводів, укладених на дерев'яних брусах. І лише в останні 10–15 років з'явилися дослідження у напрямку визначення залежності сил взаємодії від параметрів вертикальних нерівностей на хрестовинах для переводів, укладених на залізобетонних брусах.

Зокрема, на початку 90-х років у роботі [14] отримано перші характерні траєкторії для хрестовин, укладених на залізобетонних брусах. Але автором не проводився аналіз залежності форми нерівності від строку служби та переважного напрямку руху поїздів. Наведені траєкторії мають вигляд несиметричних синусоїд, які недостатньо точно відображають реальний обрис нерівностей, що безпосередньо може впливати на аналіз величин сил взаємодії.

Більш ретельні дослідження нерівностей на стрілочних переводах, установлених на залізобетонних брусах, були проведені в середині 1990-х–2005 рр. спочатку в ДПТі (на Придніпровській залізниці) [15], а пізніше в ДЕТУТі (на Південно-Західній залізниці) [16].

Проте встановлені залежності вертикального зносу хрестовин від пропущеного тоннажу не можуть бути використані, як для сучасних конструкцій стрілочних переводів, так і для сучасних умов експлуатації. Для сучасних конструкцій стрілочних переводів на залізобетонних брусах необхідно провести додаткові дослідження формування вертикальних нерівностей у залежності від пропущеного тоннажу та швидкостей руху рухомого складу.

У дослідженні [15] автор провів вимірювання близько сорока нерівностей на хрестовинах типу Р65 марки 1/11, укладених на залізобетонних брусах. При цьому автором відмічається наявність відмінностей між нерівностями хрестовин, установлених на залізобетонних і дерев'яних брусах. Також встановлено характерні форми та параметри нерівностей з урахуванням переважного напрямку руху та пропущеного тоннажу. Проте, автором не даються рекомендації щодо прогнозування формування вертикальних нерівностей на хрестовині у залежності від умов експлуатації.

У роботі [16] автором за даними натурних вимірювань (більше, ніж 130 траєкторій) встановлено середньостатистичні вертикальні нерівності на поверхні кочення хрестовин типу Р65 марки 1/11, укладених на залізобетонних брусах. Виявлено, що вертикальні нерівності на поверхні кочення хрестовин, установлених на залізо-

бетонних брусах, і відповідні нерівності на хрестовинах, укладених на дерев'яних брусах, відрізняються суттєво як за формою, так і за основними параметрами. Зокрема, встановлено, що нерівності на хрестовинах, укладених на залізобетонних брусах, носять більш локальний характер і мають меншу довжину і мають більш круті ухили. Зустрічні ухили $i_{\text{зустр}}$ в 1,2 рази і сумарні ухили Σi в 1,6 рази більші при пошерстному русі та відповідно в 1,17 та 1,03 рази більші при протишерстному русі поїздів. Проте у даній роботі залишається невирішеним питання формування зносу та нерівностей на поверхні кочення стрілочних переводів на залізобетонних брусах та їх впливу на вертикальну динаміку взаємодії колії та рухомого складу. Також не вирішеним залишається питання формування нерівностей у початковий період експлуатації хрестовини, коли відбувається зминання металу, що значно впливає на формування вертикальної нерівності.

Узагальнюючи, слід сказати, що обсяг досліджень нерівностей для стрілочних переводів, установлених на залізобетонних брусах, до теперішнього часу є значно менший, ніж відповідний обсяг досліджень, що стосується дерев'яних брусів. При цьому слід підкреслити, що на теперішній час саме залізобетонні бруси є основним видом підстрілочної основи як на залізницях України, так і на більшості залізниць світу. Також слід зазначити, що в практиці досліджень фактично відсутні результати вимірювання нерівностей на хрестовинах стрілочних переводів марки 1/9, укладених на залізобетонних брусах. А саме такі переводи разом з переходами марки 1/11, є найбільш розповсюдженими на мережі українських залізниць.

Крім того, впродовж останніх років з'явилася низка нових конструкцій хрестовин, особливості роботи яких під експлуатаційними навантаженнями також потребують всебічного вивчення. Тому дослідження у вказаному напрямку є необхідними для забезпечення безпеки руху поїздів по стрілочних переходах і підвищення їх середнього ресурсу експлуатації.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальна оцінка стану поздовжнього профілю хрестовин стрілочних переводів і розробка математичної моделі прогнозування закономірностей розвитку нерівностей на поверхнях катання вузовиків і сердечника хрестовини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити інноваційну систему вимірювань поздовжнього профілю хрестовин стрілочних переводів;
- провести експериментальні вимірювання поздовжнього профілю хрестовин при різних значеннях пропущеного тоннажу;
- розробити методику визначення траєкторії руху центра мас колеса по хрестовині;
- розробити математичну модель прогнозування зносу хрестовин залежно від пропущеного тоннажу.

4. Розробка пристрою для проведення вимірювань поздовжнього профілю хрестовин

Із метою вимірювань та контролю поздовжнього профілю хрестовин було розроблено пристрій – профілограф

хрестовинний [17]. Складається із рами з лівою і правою стійками, бічних опор, прямокутної рамки з верхнім горизонтальним стрижнем, головки, що має можливість переміщення по горизонтальному стрижню (рис. 5, 6). При проведенні вимірювань розробленим програмним забезпеченням дається команда щодо виміру від персонального комп'ютера (1) через програмований мікроконтролер (2). Мікроконтролер керує кроковим двигуном (3) та переміщає по горизонтальному направляючому стрижні лазер (5) і фотокамеру (6) на задану відстань. У результаті цього відбувається зйомка профілю з певним кроком руху камери та лазера. Фотокамера реєструє графічне зображення перетину площиною лазера поверхні хрестовини. Із використанням розроблених алгоритмів автоматичного розпізнавання та вимірювання растрових зображень визначаються параметри вимірюваного перетину поверхні хрестовини. При задовільній точності вимірювання розробленим програмним забезпеченням дається команда від персонального комп'ютера щодо виміру перетину поверхні хрестовини на наступному кроці переміщення вимірювальної системи. Після виконання вимірів поперечного профілю поверхні хрестовини на заданій кількості кроків поздовжнього руху вимірювальної системи, результати окремих вимірів з'єднуються та формується математична модель поверхні хрестовини. Для забезпечення роботи лазера використовується блок живлення (7), що живиться за допомогою розробленої автономної системи живлення [18].

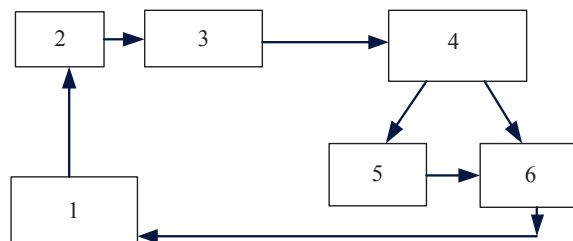


Рис. 5. Структурна схема проведення вимірювань профілю (поверхні) хрестовин

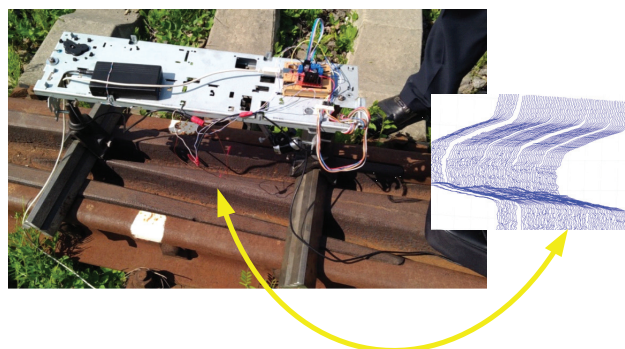


Рис. 6. Практичне вимірювання профілю (поверхні) хрестовин у п'ятдесяти точках

Розроблений пристрій вимірює профіль хрестовин за допомогою використання високороздільної фотокамери та лазерної площини. У результаті вимірів отримується просторове розташування точок поверхні хрестовини. Оскільки зйомка поперечного профілю хрестовини здійснюється контролювано за допомогою керування програмованим мікроконтроллером, який за складеним

програмним забезпеченням керує кроковим двигуном, та переміщає по горизонтальному направляючому стержні лазер та фотокамеру на задану відстань, то можна отримати профіль хрестовини будь-якої марки, змінюючи тільки довжину переміщення лазера та фотокамери. При цьому точність вимірювань поперечного профілю не зміниться.

За результатами вимірювань профілю хрестовин стрілочних переводів, можна прийняти науково-обґрунтовані рішення щодо потреби у відновлювальному ремонті хрестовин.

Профілограф хрестовинний можна використовувати та для вимірювань вертикального зносу хрестовин типу Р65 марки 1/18, 1/11 та ін.

5. Результати експериментальних вимірювань профілю хрестовин на залізницях України

Натурні обміри поздовжнього профілю хрестовин ГОСТ 28370-89 проводились на хрестовинах марки 1/11 типу Р65, укладених на залізобетонних брусах. Кількість обміряних хрестовин – 50 шт. Вимірювання проводились як по прямому, так і по боковому напрямках. За даними вимірами побудовано середньостатистичні профілі хрестовин. Зміни поздовжнього профілю після пропуску 50–65 млн. тонн вантажу подані на рис. 7, а після пропуску 80–95 млн. тонн – на рис. 8. На цих рисунках синім кольором показано рух по прямому напрямку хрестовини, жовтим – по боковому напрямку й оранжевим – по сердечнику.

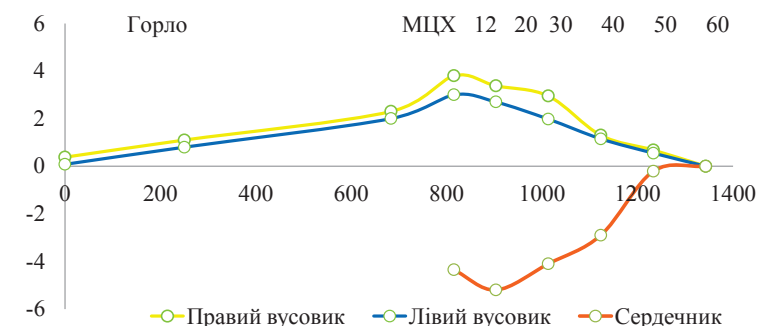


Рис. 7. Середньостатистичний поздовжній профіль хрестовини марки 1/11 після пропуску 50–65 млн. тонн вантажу

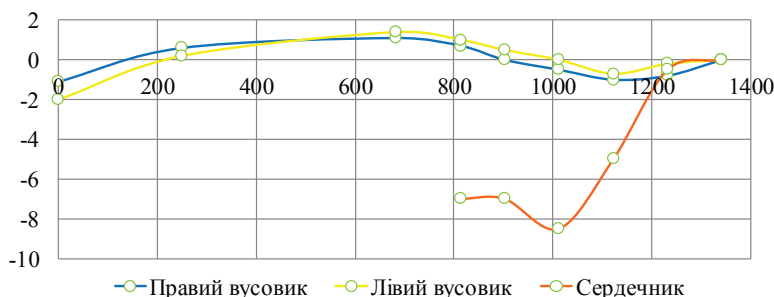


Рис. 8. Середньостатистичний поздовжній профіль хрестовини марки 1/11 після пропуску 80–95 млн. тонн вантажу

На основі наведених графіків можна зробити висновок, що найбільш інтенсивно зношується осереддя хрестовини. Виміри показали, що 60 % хрестовин у перерізі 20 мм мають висоту сердечника у межах від –2,1 до –6,1 мм відносно головки рейкових вусовиків при нормі 1,5 мм та

–0,5 мм. Найбільш інтенсивно зношується осереддя у перерізах від 12 мм до 30 мм. Уклони профілю вусовиків від горла до математичного центру хрестовини при збільшенні величини пропущеного тоннажу часто стають більш положими, ніж при середньому ступені пропущеного тоннажу.

Для аналізу зміни нерівності залежно від пропущеного тоннажу всі нерівності розбивалися на декілька груп. Поділ на групи здійснювався таким чином, щоб в одну групу потрапили переводи із різницею пропущеного тоннажу, не більшою, ніж 15 млн. тонн.

Для вибору характерних нерівностей при середньому та максимально допустимому ступені зносу експериментальний матеріал був згрупований у дві великі групи (50–65 млн. тонн та 80–95 млн. тонн).

6. Методика визначення траєкторії руху по хрестовинах стрілочних переводів

У теперішній час широко застосовуються два способи визначення траєкторії: графічний і аналітичний.

Графічний спосіб оснований на використанні спеціального пристрою – траєкторіографа і його застосування описано в роботах [6, 19].

У цій роботі був застосований аналітичний метод визначення траєкторії руху колеса по хрестовині [3]. На основі цього методу була встановлена залежність між впливовими параметрами і вихідною траєкторією руху колеса по хрестовині.

Колесо незалежно від пройденого шляху моделюється одним поперечником бандажа колеса. Базою для визначення вертикальних координат поперечника є вісь обертання колеса.

Визначення нерівності зводиться до визначення функції $y(x)$ [20–22]. У вузлах функція повинна набувати значення, що відповідають розміщенню центра колеса у вертикальній площині відносно розташування центра колеса, розрахованого для першої точки.

Для цього в єдиній системі координат для моделей колеса і хрестовини визначаються координати поперечників хрестовини та поперечника колеса. Точка контакту колеса з хрестовиною на певному поперечнику знаходиться в тому місці, де різниця аплікату поперечного профілю колеса і поперечника хрестовини найменша. Одержана різниця є тою відстанню, на яку необхідно опуститись колесу до контакту з хрестовиною. Для визначення нерівності необхідно відняти отримані відстані від відповідної відстані на початку нерівності.

У загальному вигляді траєкторію руху колеса по хрестовині можна записати у вигляді залежності:

$$y(x) = f\{P(x), W(x), \delta\}, \quad (1)$$

де $y(x)$ – траєкторія перекошування колеса по хрестовині у вертикальній площині; $P(x)$ – профіль хрестовини; $W(x)$ – поперечний профіль бандажа колеса; δ – величина зазору між робочою гранню колеса та робочою гранню вусовика (сердечника).

Профілем хрестовини вважається поздовжній профіль поверхні катання вусовиків та сердечника. Поздовжній профіль хрестовини подамо у вигляді двох лінійних функцій: $P_v(x)$ – поздовжній профіль вусовиків і $P_c(x)$ – поздовжній профіль сердечника.

На рис. 9 подані абсциси функцій $\Pi_B(x)$ і $\Pi_C(x)$, які були прийняті для розрахунку хрестовини марки 1/11.

На траєкторію перекошування центра маси колеса по хрестовині значний вплив має величина відгину вусовиків у плані $y(x)$, яка визначається конструктивними розмірами хрестовини (рис. 10).

Для хрестовини марки 1/11, відгин вусовика обчислюємо за формулами:

$$z(x) = 0,067x \text{ при } 0 < x < 683, \quad (2)$$

$$z(x) = 45 + 0,0909x \text{ при } 683 < x < 1068. \quad (3)$$

Поперечний профіль бандажа колеса поданий у вигляді функції $W(x)$. Ця функція показує зміну профілю колеса залежно від величини його прокату (рис. 11).

У цьому випадку величина прокату колеса, відповідно і поперечний профіль бандажа колеса, є випадковою величиною. Крива розподілу ймовірностей величини прокату колеса, яка була побудована на основі масових обмірів колісних пар, наведена у роботі [5]. Математичне очікування величини прокату колеса $W=0,83$ мм, середнє квадратичне відхилення $\sigma=1,54$ мм. Середньостатистичні характеристики зносу колеса наведені у табл. 1. Таким чином, ми маємо всі вихідні дані для визначення вертикальної траєкторії руху колеса по хрестовині. Розрахунок траєкторії виконуємо за наступними залежностями:

$$z(x) = \Pi_B(x) - W\{y(x) + \delta\} \quad \text{при } x < x', \quad (4)$$

$$z(x) = \Pi_c(x) - W\{\delta\} \text{ при } x > x', \quad (5)$$

де x' – абсциса точки переходу колеса із вусовика на сердечник.

Результати отриманих середньостатистичних траєкторій руху по хрестовинах марок 1/11 залежно від пропущеного тоннажу наведені на рис. 12 та рис. 13.

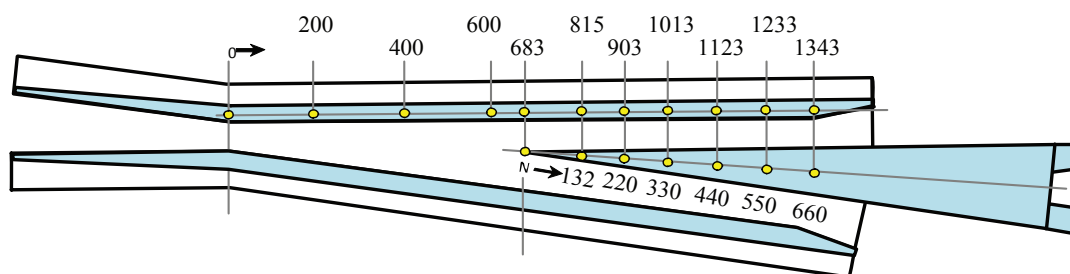


Рис. 9. Поздовжній профіль хрестовин марки 1/11

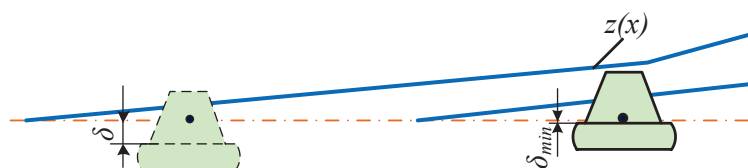


Рис. 10. Схема руху колеса по хрестовині у плані

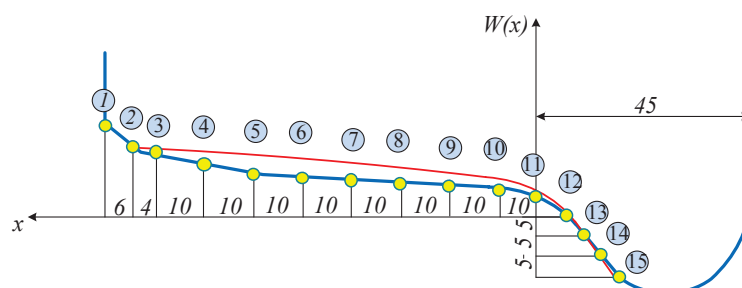


Рис. 11. Подання поперечного профілю бандажа колеса

Таблица 1

Характеристики среднеозношенного колеса

Статистичні характеристики зносу колеса	Номер перерізу профілю колеса														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Середнє значення прокату W , мм	0,83	1,44	2,57	2,72	2,72	2,68	2,38	1,66	1,17	0,87	0,87	1,51	1,49	0,74	0,43
Стандартне відхилення, σ	1,54	1,74	2,04	2,06	2,02	2,01	1,90	1,64	1,47	1,42	1,19	1,39	1,08	1,03	0,90

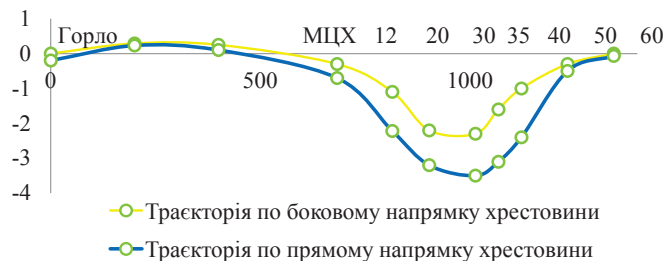


Рис. 12. Середньостатистичні траєкторії руху по фактичних поздовжніх профілях хрестовин марки 1/11 після пропуску 50–65 млн. тонн

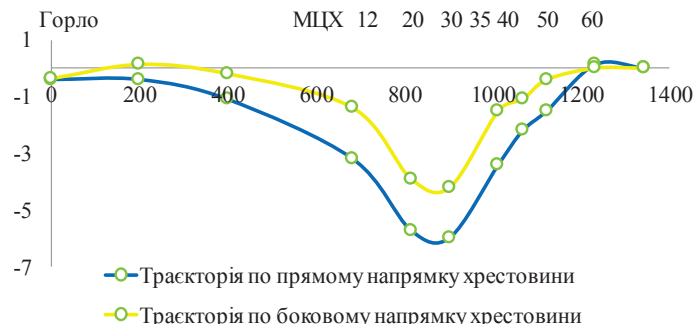


Рис. 13. Середньостатистичні траєкторії руху по фактичних поздовжніх профілях хрестовин марки 1/11 після пропуску 80–95 млн. тонн

Із рис. 12 та рис. 13 видно, що після пропуску 50–65 млн. тонн (відповідає середньому ступеню зносу) траєкторія має вигляд бугра. На залізобетонній основі у зоні перекочування колеса з вусовика на сердечник помічаються гострі впадини, які характеризуються значним сумарним уклоном. У подальшому при збільшенні пропущеного тоннажу збільшується кількість синусоподібних нерівностей. При зносі, близькому до максимального (пропуску 80–95 млн. тонн), збільшується відсоток неблагополучних траєкторій (синусоїдальних і впадин). При малих зносах вони становлять 49,8 %, при зносах 5–6 мм і більших – 88,3 %. Інколи спостерігається перехід синусоподібних нерівностей на хвиляподібні.

Впадина нерівності при збільшенні пропущеного тоннажу збільшується у розмірах (цим і пояснюється перехід від нерівності, яка має вигляд бугра, до синусоподібної), разом із цим збільшується глибина нерівності, а висота бугра зменшується.

Глибина нерівності змінюється незначно (2–4 мм після пропуску 50–65 млн. тонн і 5–6 мм при пропусканні 80–95 млн. тонн).

Максимальний уклон із збільшенням пропущеного тоннажу часто зменшується, нерівності стають більш пологими.

7. Математична модель траєкторій руху по хрестовині

Нехай у точках $x = x_1, x = x_2, \dots, x = x_n$ функція, за допомогою якої визначається траєкторія руху колеса по хрестовині, має значення $y_1, y_2, \dots, y_n$. Побудуємо рівняння поліноміальної регресії величин y_i на величини x_i . Це рівняння подамо у вигляді:

$$Y_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_6x_i^6. \quad (6)$$

Параметри a_j ($j=0,1,\dots,6$) визначимо методом найменших квадратів, згідно з яким сума квадратів відхилень $Y_i - y_i$ повинна бути мінімальною. Ця сума є функцією:

$$F(a_0, a_1, \dots, a_6) = \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_6x_i^6 - y_i)^2. \quad (7)$$

Тоді частинні похідні запишемо у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a_0} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_2} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i^2 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_3} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i^3 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_4} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i^4 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_5} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i^5 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_6} &= 2 \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + \dots + a_6x_i^6 - y_i) x_i^6 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Прирівнявши до нуля частинні похідні $\partial F/\partial a_0, \partial F/\partial a_1, \dots, \partial F/\partial a_6$ та виконавши елементарні перетворення, отримаємо систему лінійних рівнянь для визначення $x_0, x_1, \dots, x_6$:

$$\begin{aligned}
 & na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_6 = \sum_{i=1}^n y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^8 \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^8 \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^9 \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^8 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^9 \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{10} \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i^4 y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i^5 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^8 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^9 \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{10} \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{11} \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i^5 y_i, \\
 & \left(\sum_{i=1}^n x_i^6 \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^7 \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^8 \right) a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^9 \right) a_3 + \\
 & + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{10} \right) a_4 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{11} \right) a_5 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{12} \right) a_6 = \sum_{i=1}^n x_i^6 y_i.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Результати математичного моделювання траєкторії руху центра мас колеса по хрестовині наведені на рис. 14, рис. 15.

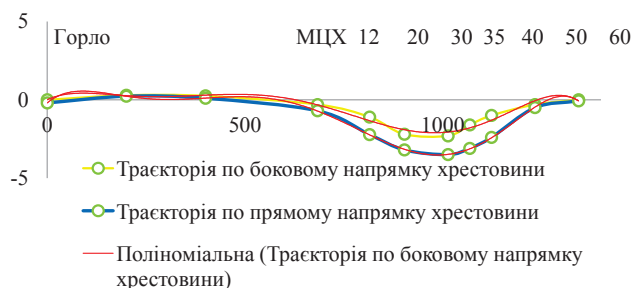


Рис. 14. Математична інтерпретація траєкторій руху поліноміальною функцією після пропуску хрестовиною 50–65 млн. тонн вантажу

Коефіцієнти полінома, за допомогою якого визначається середньостатистична траєкторія руху колеса по поздовжніх профілях хрестовин марки 1/11 після пропуску 50–65 млн. тонн, для бокового напрямку руху мають зна-

чення $a_0=0,0039$, $a_1=0,0116$, $a_2=-0,0001$, $a_3=4 \cdot 10^{-7}$, $a_4=-6 \cdot 10^{-10}$, $a_5=5 \cdot 10^{-13}$, $a_6=-1 \cdot 10^{-16}$, а для прямого напрямку руху – $a_0=-0,1993$, $a_1=0,0207$, $a_2=-0,0002$, $a_3=7 \cdot 10^{-7}$, $a_4=-1 \cdot 10^{-9}$, $a_5=8 \cdot 10^{-13}$ та $a_6=-2 \cdot 10^{-16}$.

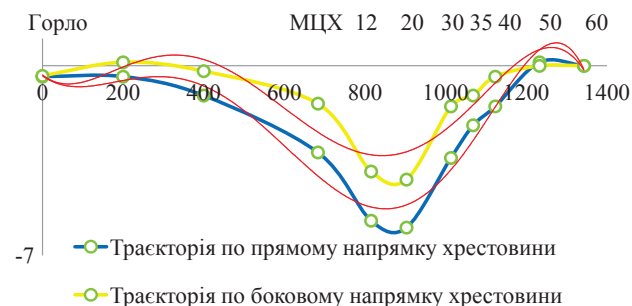


Рис. 15. Математична інтерпретація траєкторій руху поліноміальною функцією після пропуску хрестовиною 80–95 млн. тонн вантажу

Коефіцієнти полінома, за допомогою якого визначається середньостатистична траєкторія руху колеса по поздовжніх профілях хрестовин марки 1/11 після пропуску 80–95 млн. тонн, для бокового напрямку руху мають значення $a_0=-0,3422$, $a_1=-0,0115$, $a_2=0,0001$, $a_3=-3 \cdot 10^{-7}$, $a_4=4 \cdot 10^{-10}$, $a_5=-1 \cdot 10^{-13}$, $a_6=1 \cdot 10^{-17}$, а для прямого напрямку руху – $a_0=-0,377$, $a_1=-0,0102$, $a_2=8 \cdot 10^{-5}$, $a_3=-2 \cdot 10^{-7}$, $a_4=1 \cdot 10^{-10}$, $a_5=5 \cdot 10^{-14}$ та $a_6=-4 \cdot 10^{-17}$.

8. Обговорення результатів дослідження з метою формування оцінки стану хрестовин стрілочних переводів

Запропонована система діагностики хрестовин стрілочних переводів, що базується на використанні сучасних мікроконтролерів типу ESP із спільним використанням інформаційних технологій Iot (Internet of Things) має переваги над механічними системами, щодо точності отриманих даних, їх оперативної обробки і відправлення користувачу для аналізу технічного стану хрестовин стрілочних переводів. За результатами вимірювань поперечного профілю хрестовин стрілочних переводів можна прийняти науково-обґрунтовані рішення, щодо потреби у відновлювальному ремонті хрестовин методом наплавки і контролю поступового зниження їх несучої здатності, встановленні їх фактичного технічного стану та залишкового ресурсу.

За допомогою проведення високоточних вимірювань поперечного профілю хрестовин стрілочних переводів запропонованою системою встановлено, що після пропуску 50–65 млн. тонн (відповідає середньому ступеню зносу) траєкторія має вигляд бугра. На залізобетонній основі в зоні перекошування колеса з вусовика на сердечник помічаються гострі впадини, які характеризуються значним сумарним уклоном. У подальшому при збільшенні пропущеного тоннажу збільшується кількість синусоподібних нерівностей. При зносі, близькому до максимального (пропуску 80–95 млн. тонн), збільшується відсоток неблагополучних траєкторій (синусоїдальних і впадін). При малих зносах вони становлять 49,8 %, при зносах 5–6 мм і більших – 88,3 %. Інколи спостерігається перехід синусоподібних нерівностей на хвиляподібні. Кількість

отриманих нерівностей (особливо при малому і середньому пропущеному тоннажі) не дозволяє зробити висновки, побудовані на закономірностях теорії ймовірностей та математичної статистики. Тому при аналізі розглядалась сукупність окремих нерівностей у групі і на основі цього робилися висновки про закономірності розвитку.

Дослідження силової взаємодії рухомого складу на хрестовинах стрілочних переводів повинні проводитись із врахуванням параметрів вертикальних нерівностей. Вони, в свою чергу залежать від технічних і конструктивних параметрів хрестовин і коліс рухомого складу.

Таким чином, для вирішення задач визначення динамічних сил взаємодії на хрестовинах, установлених на залізобетонній основі, необхідно в першу чергу встановити види і параметри вертикальних нерівностей таких хрестовин при різних рівнях зношеності.

З метою прогнозування зношення хрестовин стрілочних переводів необхідно продовжити вимірювання поперечного профілю хрестовин сучасних перспективних проектів стрілочних переводів таких, як Дн 290, Дн 345, що дасть змогу встановити типи вертикальних нерівностей та їх геометричні параметри у залежності від пропущеного тоннажу.

Одним із недоліків запропонованої системи є неможливість проведення вимірювань при наявності снігового покриття на хрестовині, яке має вплив на результати вимірювань. Також слід зазначити, що у даній роботі наведені результати досліджень вертикальних нерівностей тільки для хрестовин марки 1/11. Тому у подальших науково-дослідних роботах, із метою формування критеріїв надійності та функціональної безпеки стрілочних переводів залізничної колії, потрібно зробити оцінку ступеня зносу хрестовин різних типів і марок хрестовин.

9. Висновки

1. Із використанням запропонованої системи діагностики хрестовин стрілочних переводів можна попередити передчасний вихід хрестовин із експлуатації та забезпечити при цьому безпеку руху поїздів. Дана система діагностики базується на використанні сучасних

мікроконтролерів типу ESP із високими технічними характеристиками з одночасним використанням інформаційних технологій Iot (Internet of Things). Вимір параметрів поперечного профілю хрестовини, здійснюватиметься на основі програмованих мікроконтролерів типу ESP. Крім того, системою виконується попередня обробка зібраних даних та підготовка у зручний для користувача вигляд і їх збереження для забезпечення довготривалого моніторингу хрестовин стрілочних переводів.

За результатами довготривалих вимірювань поперечного профілю хрестовин стрілочних переводів можна прийняти науково-обґрунтовані рішення, щодо потреби у відновлювальному ремонті хрестовин методом наплавки і контролю поступового зниження їх несучої здатності, встановленні їх фактичного технічного стану та залишкового ресурсу.

2. Результати експериментальних даних дозволили встановити, що основними параметрами, які характеризують нерівність на поверхні катання хрестовини, є форма, глибина та ухили цієї нерівності. Після пропуску хрестовиною більше ніж 50 млн. тонн, базова форма нерівності на хрестовині змінюється мало, а змінюються в основному глибина та ухили нерівності, що характеризують крутизну.

3. Коефіцієнти полінома сьомого степеню, за допомогою якого визначається середньостатистична траєкторія руху колеса по поздовжніх профілях хрестовин марки 1/11 після пропуску 50–65 млн. тонн, для бокового напрямку руху мають значення $a_0=0,0039$, $a_1=0,0116$, $a_2=-0,0001$, $a_3=4 \cdot 10^{-7}$, $a_4=-6 \cdot 10^{-10}$, $a_5=5 \cdot 10^{-13}$, $a_6=-1 \cdot 10^{-16}$, а для прямого напрямку руху – $a_0=-0,1993$, $a_1=0,0207$, $a_2=-0,0002$, $a_3=7 \cdot 10^{-7}$, $a_4=-1 \cdot 10^{-9}$, $a_5=8 \cdot 10^{-13}$, $a_6=-2 \cdot 10^{-16}$. Після пропуску 80–95 млн. тонн, для бокового напрямку руху коефіцієнти полінома сьомого степеню мають значення $a_0=-0,3422$, $a_1=-0,0115$, $a_2=0,0001$, $a_3=-3 \cdot 10^{-7}$, $a_4=4 \cdot 10^{-10}$, $a_5=-1 \cdot 10^{-13}$, $a_6=1 \cdot 10^{-17}$, а для прямого напрямку руху – $a_0=-0,377$, $a_1=-0,0102$, $a_2=8 \cdot 10^{-5}$, $a_3=-2 \cdot 10^{-7}$, $a_4=1 \cdot 10^{-10}$, $a_5=5 \cdot 10^{-14}$, $a_6=-4 \cdot 10^{-17}$. Вибраний поліном сьомого степеню найбільш точно описує вертикальну траєкторію руху центра мас колеса хрестовиною стрілочного переводу.

Література

1. Рибкін В. В., Панченко П. В., Токарев С. О. Історичний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень динаміки колії, стрілочних переводів та рухомого складу // Збірник наукових праць Донецького ін-ту заліз. тр-ту. 2012. № 32. С. 277–288.
2. Ковальчук В. В., Каленик К. Л., Орловський А. М. Дослідження поздовжнього профілю жорстких хрестовин на залізобетонних брусах // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. 2011. № 41. С. 130–135.
3. Geometrische Optimierung von Weichenherzstücken / Gerber U., Sysyn M. P., Kowaltschuk W. W., Nabotschenko O. S. // EIK Eisenbahningieur kompendium. Euralpres, Deutschland, Hamburg, 2017. P. 229–240.
4. Evaluation of the stressed-strained state of crossings of the 1/11 type turnouts by the finite element method / Kovalchuk V., Bolzhelarskyi Y., Parneta B., Pentsak A., Petrenko O., Mudryi I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Issue 7 (88). P. 10–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.107024
5. Крысанов Л. Г., Тейтель А. М. О влиянии жесткости основания на виброускорения крестовинных узлов стрелочных переводов // Вестник ВНИИЖТ. 1982. № 4. С. 1–6.
6. Dynamical response of railway switches and crossings / Salajka V., Smolka M., Kala J., Plásek O. // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 107. P. 00018. doi: 10.1051/mateconf/201710700018
7. Бойко В. Д. Исследования вертикальных неровностей на крестовинах стрелочных переводов с железобетонными брусьями // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Сер.: Наука и транспорт. 2003. № 1 (6). С. 18–20.

8. Даниленко Е. І., Бойко В. Д. Вертикальні нерівності на хрестовинах в зоні перекочування за різних умов експлуатації // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: Тези доповідей другої наук.-прак. конф. Ч. 1. Сер.: Техніка, технологія. К.: КУЕТТ, 2004. С. 91–92.
9. Даниленко Е. І., Бойко В. Д. Система діагностики взаємодії рухомого складу та стрілочних переводів з використанням вимірювань граничних нерівностей // 36. наук. праць КУЕТТ. 2006. Вип. 10. С. 52–60.
10. Даниленко Е. І., Бойко В. Д., Вербицький В. Г. Графоаналітичний метод визначення динамічних сил взаємодії в зоні нерівностей на хрестовинах з залізобетонними брусами на основі аналізу їх параметрів // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: Тези доповідей третьої наук.-прак. конф. Сер.: Техніка, технологія. К.: КУЕТТ, 2005. С. 56–57.
11. Яковлев В. Ф. Влияние расчетных характеристик элементов пути и подвижного состава на уровень динамических сил в контакте колеса и рельса // Труды ЛИИЖТ. 1964. Вып. 233.
12. Армстронг Д. А. Железобетонные шпалы на железных дорогах Северной Америки // Железные дороги мира. 1985. № 11. С. 23–25.
13. Lehnhardt U. Weichenschwelle aus Spannbeton // Signal und Schiene. 1984. Issue 6. P. 202.
14. Глюзберг Б. Э. Исследование воздействия колес подвижного состава на крестовины стрелочных переводов // Вестник ВНИИЖТ. 1977. № 2. С. 37–39.
15. Уравнения пространственных колебаний при движении экипажа по пути с детерминированными неровностями / Рыбкин В. В., Трякин А. П., Маковский В. А., Рабинович А. В. // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава. 1978. С. 97–110.
16. Орловский А. Н., Клименко В. Н. Обоснование выбора расчетной схемы для исследования взаимодействия колеса и пути в зоне неровностей // Труды ДИИТ. 1965. Вып. 57. С. 42–49.
17. Пристрій для вимірювання профілю (поверхні) хрестовин стрілочних переводів: Пат. № 116412. МПК G01B 5/30 (2006.01), E01B 35/04 (2006.01) / Ковальчук В. В., Сисин М. П., Ульф Гербер, Набоченко О. С.; заявник Ковальчук В. В. № u201610264; заявл. 10.10.2016, опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.
18. Пристрій для живлення системи діагностики технічного стану хрестовин стрілочних переводів: Пат. № 118124. МПК B61K 9/00, H02K 35/00 / Ковальчук В. В., Сисин М. П., Возняк О. М., Семець В. М.; заявник Ковальчук В. В. № u201700768; заявл. 27.01.2017, опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
19. Даниленко Э. И., Тараненко С. Д., Кутах А. П. Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатация в пути, расчеты и проектирование) / под ред. Э. И. Даниленко. К., 2001. 296 с.
20. Даниленко Е. І., Карпов М. І., Бойко В. Д. Положення про нормативні строки служби стрілочних переводів у різних експлуатаційних умовах: ЦП – 0101. К.: Транспорт України, 2003. 30 с.
21. Гарантійні строки служби та умови забезпечення гарантійної експлуатації металевих елементів стрілочних переводів: ЦП – 0162 / Даниленко Е. І., Карпов М. І., Бойко В. Д., Молчанов В. М. К.: Транспорт України, 2007. 56 с.
22. Даниленко Е. І., Бойко В. Д. Особливості формування нерівностей в зоні перекочування на хрестовинах, які укладені на дерев'яних і залізобетонних брусах // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: Тези доповідей першої наук.-прак. конф. Ч. 1. Сер.: Техніка, технологія. К.: КУЕТТ, 2003. С. 47–48.