

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Михалків Сергій Васильович

УДК 629.488.27:621.822.614:620.179

**Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних
двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту на кафедрі "Експлуатація та ремонт рухомого складу" Міністерства транспорту і зв'язку України

Науковий керівник

– доктор технічних наук, професор
Бабанін Олександр Борисович,
Українська державна академія залізничного транспорту,
кафедра "Експлуатація та ремонт рухомого складу",
професор кафедри

Офіційні опоненти

– доктор технічних наук, професор
Боднар Борис Євгенович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна,
перший проректор, кафедра "Локомотиви",
завідувач кафедри

– кандидат технічних наук, доцент
Погребняк Андрій Валерійович,
Українська державна академія залізничного транспорту,
кафедра "Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні
машини", доцент кафедри

Захист відбудеться "25" жовтня 2007 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7 в залі засідання вченої ради

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий "14" вересня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Д.В. Ломотько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із розповсюджених елементів будь-якої механічної системи є підшипникові вузли, різновид конструктивних виконань яких дає змогу успішно застосовувати їх у всіх галузях промисловості, в т.ч. на залізничному транспорті. Підшипникові вузли є відповідальними елементами, від технічного стану яких безпосередньо залежать надійність локомотиву та безпека руху. Зважаючи на важкі умови роботи даних вузлів на тяговому рухомому складі (ТРС), який вичерпав свій термін служби і експлуатується після вжитих заходів щодо подовження ресурсу, існує необхідність проведення періодичного контролю стану усіх елементів шляхом комплексного нерозбірного діагностування.

Підвищення ефективності, надійності, а також тривалості безпечної експлуатації електричних двигунів локомотивів пов'язане із необхідністю оцінки технічного стану підшипникових вузлів. Одним з ефективних засобів технічного діагностування є вібродіагностичні методи. Встановлено, що вібросигнал надає велику кількість інформації про технічний стан елементів підшипників кочення і може бути достовірним показником його працездатності.

Попередні дослідження переважно стосувалися спектральних методів аналізу вібросигналів, які базуються на Фур'є-перетворенні. Поряд із перевагами, це перетворення характеризується певними недоліками, основні з яких полягають в отриманні усереднених коефіцієнтів для всього досліджуваного сигналу нестационарного процесу. Це вимагає використання додаткових методів і пристроїв для якісної постановки діагнозу. Тому своєчасне виявлення виникнення та розвитку пошкоджень підшипників кочення і, як наслідок, підвищення якості проведення технічного обслуговування (ТО) та поточного ремонту (ПР) ТРС є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі „Експлуатація та ремонт рухомого складу” Української державної академії залізничного транспорту у межах науково-дослідних робіт за участю автора: „Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками” (ДР 0107U003276, архів № 0307U001779), „Участь у попередніх та приймальних випробуваннях тепловозу ТЕП150, обробка результатів випробувань з наданням висновку Головної організації” (ДР 0105U000070, архів № 0205U006535).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності технології вібродіагностування пошкоджень елементів підшипників кочення електричних двигунів тепловозів на різних стадіях розвитку, забезпечення принципу нерозривності технології вібродіагностування.

Виходячи з цього, в дисертації поставлені наступні завдання:

– провести аналіз відмов вузлів тягових електричних двигунів (ТЕД) тепловозів із визначенням характерних несправностей, ідентифікація яких можлива із залученням засобів вібродіагностування;

– теоретично обґрунтувати методи вібродіагностування підшипникових вузлів ТЕД тепловозів із використанням стохастичного та детермінованого підходів аналізу вібраційних сигналів;

– розробити функціонально-логічну модель технології вібродіагностування із залученням елементів існуючих підходів та вейвлет-аналізу для отримання додаткових діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення ТЕД;

– провести розрахунки коефіцієнтів ексцесу у частотних діапазонах підшипникових вібрацій, виділених із використанням алгоритму швидкого вейвлет-перетворення;

– дослідити зв'язок між розвитком вібраційних процесів у підшипникових вузлах ТЕД залежно від виду пошкодження елементів підшипників кочення, а також їх вплив на спектральні енергетичні складові;

– розробити та запропонувати до впровадження програмно-апаратний комплекс для вібродіагностування підшипникових вузлів ТЕД.

Об'єкт досліджень – процес вібродіагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів.

Предмет досліджень – технологія вібродіагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів.

Методи досліджень. Вирішення науково-прикладної задачі проводиться із залученням математичного апарату цифрової обробки вібраційних сигналів підшипникових вузлів ТЕД, дослідження вібраційних характеристик підшипників кочення – із використанням вейвлет-аналізу і статистичних методів.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертації:

– вперше розроблено функціонально-логічну модель технології вібродіагностування, що об'єднує стохастичні, детерміновані підходи з елементами вейвлет-аналізу. Реалізація цієї моделі дає змогу збільшувати показник достовірності вібродіагностування та значно розширити перелік ідентифікованих пошкоджень підшипників кочення;

– вперше досліджено вплив алгоритмів швидкого та безперервного вейвлет-перетворень на підвищення ефективності технології вібродіагностування в рамках розробленої моделі;

– вперше формалізовано комплексний характер технології вібродіагностування за допомогою використання найбільш інформативних методів, які дають змогу визначати технічний стан елементів підшипників кочення на підставі єдиного підходу;

– доопрацьовано технологію вібродіагностування підшипників кочення шляхом залучення в межах стохастичного підходу складових теорії перевірки статистичних гіпотез для класифікації пошкоджень за їх видами;

– доопрацьовано метод кількісного оцінювання технічного стану підшипників кочення в результаті визначення ексцесів у частотних діапазонах відновлених компонентів сигналу, які відповідають розрахованим вейвлет-коефіцієнтам.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення роботи полягає у використанні розробленої моделі і засобів вирішення науково-прикладної задачі підвищення ефективності технології вібродіагностування підшипників кочення під час виконання ТО та ПР ТЕД тепловозів у локомотивному депо Лозова Південної залізниці. Результати досліджень упроваджено в навчальний процес Інституту перепідготовки та підвищення кадрів Української державної академії залізничного транспорту з підготовки магістрів і спеціалістів за спеціальністю “Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту”.

Розроблені в дисертації загальні теоретичні положення і отримані результати експериментальних досліджень дозволяють вирішувати такі завдання:

– виконувати вібродіагностування підшипникових вузлів ТЕД створеним програмно-апаратним комплексом із інтегральним віброакселерометром поверхневого типу;

– отримувати частотно-часові вейвлет-спектрограми завдяки розробленому діагностичному алгоритму із виділенням інформативних частотних смуг;

– обчислювати вищі моменти вібрацій підшипникових вузлів ТЕД запропонованою програмою розрахунку значень імовірнісних вібраційних характеристик отриманих реалізацій;

– обґрунтовувати і реалізовувати на практиці принцип нерозривності технології вібродіагностування.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримано особисто автором. В спільних публікаціях особистий внесок автора полягає в наступному:

– в [6] обґрунтована доцільність розробки методики оцінювання системи ТО та ПР на основі теорії корисності.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались, обговорювались і були схвалені на:

– 68-й, 69-й міжнародних науково-технічних конференціях кафедр академії та спеціалістів залізничного транспорту і підприємств (Україна, м. Харків, 2006-07 рр.);

– 2-й науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія і управління”, Київський університет економіки і технологій транспорту, 2005 р., (м. Київ);

– 2-му міжнародному науково-практичному семінарі “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур”, Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури, 2006 р.;

– конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України “Сучасні проблеми машинобудування”, 2006 р. (м. Харків).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 7 наукових праць, із яких 6 – у наукових виданнях, затверджених ВАК України, 1 публікація – у матеріалах і тезах конференцій. Подано 1 заявку на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 168 сторінок комп’ютерного тексту (основний текст 119 сторінок). Вона складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (140 найменувань, з них 29 – іноземними мовами) і 6 додатків. Дисертація містить 8 таблиць і 35 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета досліджень, розкрита її наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** здійснюється аналіз вимог, які висуваються до технології вібродіагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів. Аналіз відмов підшипникових вузлів колісно-моторних блоків (КМБ) тепловозів свідчить про актуальність застосування засобів діагностування в технологіях ТО та ПР для попередження розвитку пошкоджень елементів підшипників кочення.

Дослідження з удосконалення конструкції та системи ТО та ПР ТРС проводяться в Україні та країнах СНД під керівництвом відомих вчених: Б.Є. Бодняра, О.І. Володіна,

В.Ф. Головка, О.Л. Голубенка, Ю.В. Дьоміна, М.Б. Кельріха, Є.Є. Коссова, А.П. Кудряша, В.І. Мороза, Е.Д. Тартаковського, В.О. Четвергова та інші.

Основи технічного діагностування, які розглянуті в працях І.А. Біргера, М.Д. Генкіна, А.В. Мозгалевського, Б.В. Павлова, Е.Д. Тартаковського, К.Н. Явленського, А.К. Явленського та інших авторів, створили базу для розробки та застосування методів і засобів вирішення прикладних завдань діагностування.

До найбільш значущих праць в області віброакустичного діагностування роторного обладнання належать дослідження радянських, російських і вітчизняних учених: А.А. Александрова, І.І. Артоболевського, Ф.Я. Балицького, О.В. Баркова, Л.Д. Вільнера, З.Г. Гіюєва, А.Н. Головаша, А.С. Гольдіна, А.Л. Гореліка, Ф.М. Діментберга, М.А. Іванової, Є.О. Ігуменцева, А.З. Крейна, Б.Г. Марченка, А.Т. Осяєва, А.В. Погребняка, К.М. Рагульскіса, Н.А. Ротанова, А.Г. Соколової, В.Ю. Теттера, А.Р. Ширмана. На підставі проведеного аналізу були визначені переваги й недоліки детермінованого та стохастичного вібродіагностичних підходів. Установлена доцільність використання найбільш інформативних методів вібродіагностування в рамках розглянутих підходів для дослідження вібраційних характеристик вузлів роторного обладнання.

Виявлено, що перспективним напрямом для цілей вібродіагностування є застосування математичного апарату вейвлет-аналізу, який підвищує ефективність контролю нестационарних характеристик вібраційних сигналів, генерованих обертовими елементами електричних двигунів.

Констатується негативний досвід використання спектральних методів вібродіагностування в локомотивному депо Лозова внаслідок високої частки надмірного бракування – 20 підшипників кочення (38%) виявилися придатними до подальшої експлуатації з 53 підшипників кочення, експлуатацію яких за результатами вібродіагностування було заборонено. Це обумовило необхідність удосконалення технології вібродіагностування шляхом розробки нових заходів аналізу вібраційних сигналів для розширення номенклатури ідентифікованих пошкоджень та отримання нових діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення.

У **другому розділі** запропоновано функціонально-логічну модель технології вібродіагностування підшипників кочення (рис. 1), характерною відмінністю якої є поєднання позитивних рис двох загальноновживаних підходів із використанням вейвлет-аналізу.

В рамках детермінованого підходу запропоновано алгоритм безперервного вейвлет-перетворення (БВП)

$$\text{БВП}(m, n) = 2^{-m/2} \sum_k s(k) \psi(2^{-m} k - n), \quad (1)$$

де m – змінний коефіцієнт масштабування; n – константа переносу;
 $s(k)$ – досліджуваний сигнал з віброакселерометра.

Даний алгоритм використовує вейвлет Морле

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

для побудови частотно-часових вейвлет-спектрограм із подальшим визначенням частотних діапазонів (ВЧД), в яких виявляються теоретично визначені діагностичні ознаки (ТВДО) елементів підшипників кочення, порівняння останніх із даними, отриманими в ході експерименту, дає змогу проводити розпізнавання технічного стану (РТС) підшипників кочення.

Стохастичний підхід передбачає використання алгоритму швидкого вейвлет-перетворення (ШВП) в рамках кратномасштабного аналізу для виділення інформативних частотних діапазонів

$$S(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^m D_j(t), \quad (3)$$

де $A_m(t)$ – апроксимуюча функція, яка вказує на усереднення значень сигналу; $D_j(t)$ – деталізована функція, яка задає порядок застосування прирощень сигналу

$$S(t) = A_1(t) + D_1(t) = \sum_k a_{1k} \varphi_{1k}(t) + \sum_k d_{1k} \psi_{1k}(t). \quad (4)$$

Обчислення апроксимуючих a_{mk} та деталізованих d_{mk} коефіцієнтів залежить від неперервних базисних функцій $\varphi(t)$ та $\psi(t)$

$$a_{mk} = (S(t), \varphi_{mk}(t)) = \sum_l h_{l-2k}(\varphi(t), \varphi_{m-1,l}(t)) = \sum_l h_{l-2k} a_{l,m-1} \quad (5)$$

$$d_{mk} = (S(t), \psi_{mk}(t)) = \sum_l g_{l-2k}(\varphi(t), \varphi_{m-1,l}(t)) = \sum_l g_{l-2k} a_{l,m-1} \quad (6)$$

Джерело діагностичної інформації (ДДІ) описується багатовхідною моделлю вібраційного процесу для проведення статистичного оцінювання вібраційних характеристик досліджуваної частотної смуги вібрації, виділеної завдяки використанню алгоритму ШВП. Із появою кожного значення пов'язуються взаємовиключні гіпотези: основна H_0 та конкуруюча H_1 . Статистична попередня обробка (СПО) досліджуваної реалізації проводиться за умови апріорі відомої гіпотези і визначає певну точку в просторі спостережень (ПС). Навчальні сукупності (НС) – це безліч значень параметрів, які характерні для умовно справного стану вузла, який діагностується, або його станів, пов'язаних із наявністю одного з пошкоджень, яке діагностується. Правило рішення (ПР), яке будується з урахуванням навчальних сукупностей є розбивка певним чином перетвореного простору спостережень на підмножини, що не перетинаються і визначає гіпотезу, тобто вирішує завдання діагностування.

Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що обчислення кількісної оцінки сумніву прийняття діагностичного рішення щодо визначення технічного стану підшипників кочення, вібрації яких носять випадковий характер, досягається в межах стохастичного підходу. Використання вейвлет-аналізу в рамках двох підходів формалізує комплексний характер технології вібродіагностування на підставі використання найбільш інформативних методів, які дають змогу підвищувати достовірність вібродіагностування елементів підшипників кочення.

В **третьому розділі** для формалізації фізичної моделі дослідження розглядається рух центра ваги шийки якоря в підшипнику кочення, який визначається величиною робочого радіального зазору підшипника кочення і частотою обертання внутрішнього кільця підшипника кочення. При цьому виникає періодична обурювальна сила, яка передається на остов двигуна та збуджує коливання частотами, кратними розглянутій частоті

$$C_y = \sum_{k=1}^n C_k \cos k \left[\frac{\omega_0}{2} \left(1 - \frac{D_T}{D_0} \cos \beta \right) Z \right] \quad (7)$$

де $k=1,2,3,\dots, n$ – номер гармоніки; C_k – амплітуда гармоніки; ω_0 – колова частота обертання якоря; D_T – діаметр тіла кочення; D_0 – середній діаметр підшипника кочення; Z – кількість тіл кочення; β – кут контакту.

Вони сприймаються віброакселерометром і є показником радіального зазору, тобто необхідною діагностичною інформацією для визначення технічного стану підшипників кочення. Встановлено, що поява гармонічного ряду, кратного розглянутій частоті у спектрах вібрації за відсутності пошкоджень доріжок кочення, пов'язано із збільшенням радіального зазору в підшипнику. Це пов'язано з тим, що кінематичні умови збудження гармонік (хвилястість, биття доріжок кочення) виявляються із збільшенням зазору та зменшенням кількості тіл кочення в зоні навантаження. Розглянуто узагальнений діагностичний параметр, який зручно використовувати для розробки кількісних критеріїв оцінки технічного стану підшипників кочення

$$Q = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} A_k \quad (8)$$

де A_k – рівень віброприскорення спектральної складової із частотою $Kf_{об}$; k – номер гармоніки.

Розглянутий вираз (8) є діагностичною моделлю для кожного підшипника і дає змогу зв'язати розглянуті параметри підшипників кочення з їхніми вібраційними характеристиками.

На підставі розглянутої класифікації пошкоджень підшипників кочення було встановлено, що спектральні методи діагностування забезпечують ідентифікацію широкої номенклатури пошкоджень, на відміну від методів аналізу часової форми вібросигналу, які вимагають залучення додаткових заходів для діагностування основних видів пошкоджень. Види пошкоджень виявляються за п'ятьма основними та декількома додатковими групами гармонік у спектрі огибаючої вібросигналу.

Під час моделювання технічного стану підшипників кочення ТЕД на випробувальній станції локомотивного депо досліджували вібраційні характеристики за допомогою аналізатора спектру вібрації 795М. Залежно від різних технічних станів будували спектри огинаючих вібрацій підшипників кочення:

- справного підшипника кочення;
- із тріщиною на доріжці кочення зовнішнього кільця;
- із тріщиною на доріжці кочення внутрішнього кільця;
- при зношуванні тіл кочення і сепаратора;
- із раковинами та відколами на тілах кочення.

Встановлено, що поява у спектрах огинаючої вібрації гармонік із частотами, кратними частоті перекошування тіл кочень відносно власної осі, відносно зовнішнього та внутрішнього кільця, сепараторних гармонік, а також бокових складових узгоджується із фізичною моделлю дослідження, дає змогу визначати наявність пошкоджень, простежувати за їхнім розвитком, ідентифікувати вид пошкодження.

Враховуючи низку вимог щодо проведення процедури діагностування роторних механічних вузлів, які пов'язані із особливостями технології ремонту локомотивів, було розроблено програмно-апаратний комплекс, який дозволяє реалізовувати розроблену модель і забезпечує нерозривність технології вібродіагностування у вигляді отримання результатів діагностування відразу після закінчення вимірювань. Обробка зареєстрованих віброграм проводиться в середовищі розробленого програмного забезпечення. Було використано інтегральний віброакселерометр поверхневого типу, який характеризується підвищеною надійністю, здатністю збільшувати масштаб вимірюваного віброприскорення, забезпечує частотний діапазон у межах 0...10000 Гц, має невисоку вартість.

Проведений огляд способів кріплення віброакселерометрів до вузлів, які діагностуються, визначив, що магнітний спосіб кріплення дає змогу зберігати динамічний діапазон віброакселерометра. Визначена найбільш інформативна зона на поверхні підшипникового вузла, розташування віброакселерометра в безпосередній близькості до якої забезпечує реєстрацію віброграм із вираженими підшипниковими частотами.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням підшипникових вузлів ТЕД тепловозів в умовах локомотивного депо. Моделювання технічного стану проводили на нових та бувших в експлуатації 14 зразках моторно-якірних підшипниках типу SKFNU318 ТЕД ТЕ-006 маневрових тепловозів ЧМЕ 3. Під час проведення досліджень застосовувався розроблений програмно-апаратний комплекс.

У ході досліджень розглядалися такі варіанти технічного стану підшипникового вузла:

– підшипник справний. Задається величина радіального зазору підшипника у зібраному вузлі – 0,3 мм;

– внутрішнє кільце підшипника має на доріжці кочення поперечну стрілкоподібну тріщину, радіальний зазор – 0,10 мм;

– підшипник має глибоку шагову корозію із проникненням у глибину металу на доріжці кочення зовнішнього кільця, розмір зруйнованої ділянки – 10 x 50 мм;

– підшипник справний. Мастило в підшипниковому вузлі відсутнє, радіальний зазор – 0,20 мм;

– підшипник має один ролик із відколом торцевої поверхні. Радіальний зазор підшипника – 0,15 мм.

На основі аналізу багатовхідної моделі вібраційного процесу підшипників кочення були обрані відповідні статистичні методи дослідження експериментальних даних, отриманих за результатами розгляду варіантів технічного стану підшипникового вузла, з метою виділення діагностичних ознак. Для підвищення достовірності результатів діагностування необхідно вирішити завдання розділення підшипникових вібрацій від завод, які генеруються в працюючому електричному двигуні. Зареєстровані віброграми перетворювали на цифровий вигляд із частотою дискретизації 20 кГц. Реалізації зберігали на жорсткому диску програмно-апаратного комплексу у вигляді наборів по m реалізацій обсягом 4096 відліків кожна при $60 \leq m \leq 90$. Реалізації отримані для справних

підшипників, для підшипників, які мають перекося, розвинені пошкодження зовнішнього кільця, а також для підшипників, які працюють без мастила. Отримані реалізації за допомогою t - та F -критеріїв були перевірені на стаціонарність. У рамках стохастичного підходу розроблена модель використовує алгоритм ШВП в межах кратномасштабного аналізу. Для розкладання досліджуваної реалізації застосовували вейвлет Добеші четвертого порядку. Обчислювали деталізовані вейвлет-коефіцієнти досліджуваного сигналу на визначених рівнях розкладання. Визначали центральні частоти вейвлету, на яких відбувається розкладання: перший рівень розкладання – $f_1 = 7143$ Гц (рис. 2 а),

другий рівень розкладання – $f_2 = 3572$ Гц (рис. 2 б), третій рівень

розкладання – $f_3 = 1786$ Гц (рис. 2 в). Отримані реалізації деталізованих вейвлет-

коефіцієнтів відображають характеристики діагностичного сигналу на зазначених частотах. Дослідження встановили, що найбільший інтерес представляють компоненти

сигналу, які відповідають знайденим вейвлет-коефіцієнтам на зазначених рівнях розкладання. Встановлено, що вібрація, яка викликана роботою підшипників кочення, найбільш виразно виявляється у вузькочастотному діапазоні $f = 7143 \text{ Гц}$. Найбільш інформативними діагностичними ознаками, які дають змогу визначати пошкодження підшипників кочення, були обрані коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ

$$k = \mu_3 / \mu_2^{3/2}, \quad (9)$$

$$\gamma = \mu_4 / \mu_2^2 - 3 \quad (10)$$

Проаналізовано характер зміни кривої щільності розподілу віброприскорень залежно від стадії розвитку пошкоджень підшипників кочення. Встановлено, що коефіцієнт ексцесу є компромісною мірою між слабо чутливими нижчими моментами та надто чутливими вищими моментами вібрації. Після перевірки на стаціонарність для подальшого аналізу було відібрано 63 реалізацій, отриманих за вібраціями справного підшипника; 71 – при відсутності мастила в підшипнику; 82 – у випадку перекошування, яке становило 0,3 мм; 68 – із розвиненим пошкодженням зовнішнього кільця (табл. 1).

Для діагностування конкретних пошкоджень необхідно провести навчання щодо визначення границь зміни кількісних оцінок коефіцієнтів k та γ при багаторазовому повторенні експериментів для різних видів пошкоджень. Будувалися навчальні сукупності в діагностичному просторі (β_1, β_2) , $\beta_1 = k^2$, $\beta_2 = \gamma + 3$ прямокутної системи координат, які відповідають різним технічним станам підшипників кочення. В подальшому здійснювався перехід із прямокутної системи координат у полярну систему координат (рис. 3).

Таблиця 1

**Значення діагностичних ознак досліджуваного підшипника кочення
при різних технічних станах**

Умови випробовування підшипника кочення	Кількість реалізацій, обраних для аналізу	Точкові оцінки середнього значення коефіцієнтів	
		k	γ
Справний	63	0,1162 ±0,0248	0,1041 ±0,0353
Відсутнє мастило	71	0,1118 ±0,0145	0,5832 ±0,1202
Перекошування	82	0,1023 ±0,0046	0,9623 ±0,0812
Пошкодження зовнішнього кільця	68	0,0823 ±0,0021	1,3258 ±0,1049

Отримані розподіли оцінки φ , які відповідають різним технічним станам досліджуваного підшипника кочення, зміщені відносно один одного і мають різні математичні очікування:

$\theta_1 = 62,97^\circ$, $\theta_2 = 65,16^\circ$, $\theta_3 = 66,73^\circ$, $\theta_4 = 68,14^\circ$. Побудова вирішальних правил при діагностуванні зазначених пошкоджень 2552 моторно-якірних підшипників ТЕД здійснювалась із використанням двоальтернативної процедури перевірки статистичних гіпотез за Нейманом-Пірсоном. Обчислені вирішальні правила наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Оцінка значень параметру вібрацій досліджених підшипників кочення

Досліджуваний параметр	Кількість випробовуваних підшипників	
	2499	18
	справний підшипник	відсутнє мастило
φ_1	61,97 ⁰	64,09 ⁰
φ_2	60,39 ⁰	63,8 ⁰
$1/2 \sum_{j=1}^2 \zeta_j$	61,18 ⁰	63,95 ⁰
Досліджуваний параметр	Кількість випробовуваних підшипників	
	11	24
	підшипник з перекошуванням	пошкодження зовнішнього кільця
φ_1	64,2 ⁰	65,41 ⁰
φ_2	64,93 ⁰	66,29 ⁰
$1/2 \sum_{j=1}^2 \zeta_j$	64,57 ⁰	65,85 ⁰

Проведене дослідження зміни коефіцієнта ексцесу у різних частотних діапазонах встановило, що для непошкодженого підшипника дана величина близька до нуля в усіх частотних діапазонах. Поява пошкодження впливає на зростання коефіцієнту ексцесу у високочастотному діапазоні. Розвинуте пошкодження викликає суттєве зростання показника в усіх частотних діапазонах, що надає можливість визначати технічний стан підшипників кочення лише за однією сукупністю змін коефіцієнта ексцесу.

На наступному етапі спектральними методами досліджувались 2552 моторно-якірних підшипника ТЕД ТЕ-006, ЕД-118А перед постановкою на ремонт. Враховуючи неефективність традиційного математичного апарату спектрального аналізу (прямі спектри, спектри огинаючих) простежувати за інформацією часового характеру, а також контролювати динаміку зміни спектрального складу сигналу, проводили побудову частотно-часових вейвлет-спектрограм і на підставі порівняння результатів із спектрами огинаючих вібрації, отриманих за допомогою аналізатора спектра вібрації 795М, визначали переваги удосконаленої технології вібродіагностування.

Детермінований підхід розробленої моделі передбачає використання алгоритму БВП із залученням вейвлету Морле. Побудовані частотно-часові вейвлет-спектрограми являють собою поверхню в тривимірному просторі у вигляді проекції на частотно-часову площину із ізолініями. Це дає змогу простежувати зміну інтенсивності амплітуд вейвлет-перетворення на різних частотах та у часі і чітко виявити структуру аналізованого процесу.

Були отримані спектри огинаючих вібрації підшипників кочення:

- 1) із пошкодженням внутрішнього кільця;
- 2) із значним радіальним зазором;
- 3) із значним радіальним зазором і пошкодженням доріжки кочення зовнішнього кільця;
- 4) підшипника кочення з розвиненими пошкодженнями.

Після розбирання підшипникового вузла було встановлено, що спектр огинаючої вібрації 1) надав достовірну інформацію щодо визначення виду пошкодження – наявність сильно вираженої дискретної складової, яка відповідає пошкодженню доріжки кочення внутрішнього кільця підшипника і становить близько 73 дБ, що сильно перевищує значення оборотної частоти та її гармонік. Побудована вейвлет-спектрограма (рис. 4), окрім зазначеної діагностичної ознаки (рис. 4 а), також ідентифікує частотну смугу та відповідні гармоніки, які відповідають частоті перекочування тіл кочень по зовнішньому кільцю (рис. 4 б). Значення гармонік дорівнює 71 дБ, що відповідає пошкодженню зовнішнього кільця.

Дослідження встановили, що не завжди спектральний аналіз огинаючої вібрації здатний із високою достовірністю визначити пошкодження підшипника кочення. Гармоніки отриманого спектра огинаючої вібрації 2) не збігаються з набором частот, притаманних пошкодженням підшипників, проте чисельні гармоніки частоти обертання (від першої до восьмої) із високими амплітудами вказують на послаблення у з'єднаннях і можуть характеризувати наявність збільшених внутрішніх зазорів. Після розбирання підшипникового вузла було встановлено, що радіальний зазор становив 0,2 мм, що є в межах норми, а також виявлено глибоку тріщину одного ролика з викришуванням його фланців. Зазначене пошкодження не було ідентифіковано спектральними методами, які дають добрі результати при аналізі повільних змін потужності відносно швидких процесів. Проте стосовно вібродіагностування роторних машин необхідно враховувати вплив ударних імпульсів, які є нестационарним процесом і генерують швидко спадаючу вібрацію. Вейвлет-спектрограма (рис. 5) в частотних діапазонах, які відповідають діагностичній ознаці пошкодження тіла кочення, містить діагностичні ознаки у вигляді дискретних складових із періодичністю 22 мс, 11 мс, 7 мс і т.д. Ці значення становлять близько 65 дБ, що ідентифікує наявність розвиненого пошкодження тіл кочення. В діапазоні частоти обертання та її гармонік також простежуються складові, їхнє значення коливається від 18 до 25 дБ, що визначає наявність радіального зазору із середнім ступенем розвитку.

Характерними особливостями розвинених пошкоджень елементів підшипника кочення є зростання третьої роторної гармоніки на спектрі огинаючої вібрації із суттєвим збільшенням потужності сигналу в околиці цієї ж гармоніки в смузі частот $\Delta f = 60$ Гц.

Наявна перша гармоніка частоти перекошування тіл кочення по внутрішньому кільцю $f_{\text{внут}}$.

Друга та четверта гармоніки частоти перекошування тіл кочення по внутрішньому кільцю 2

$f_{\text{внут}}$, 4 $f_{\text{внут}}$ сильно виражені і супроводжуються загальним підняттям бокових смуг, які

відповідають роторним гармонікам $kf_{\text{об}}$. Вейвлет-спектрограма містить зазначені ознаки, існує можливість простежувати чітку періодичність дискретних складових основної роторної гармоніки, додаткових роторних гармонік, першої, другої (рис. 6 а), четвертої (рис. 6 б) гармонік частоти перекошування тіл кочення по внутрішньому кільцю.

На підставі порівняння спектрів огинаючих вібрації підшипникових вузлів ТЕД із частотно-часовими вейвлет-спектрограмами, побудованими за допомогою вейвлету Морле, доведена доцільність використання останніх для цілей вібродіагностування підшипників кочення.

Як оцінювальний критерій, що характеризує ефективність технології вібродіагностування, розраховували показник достовірності аналізатора спектра вібрації 795М за результатами досліджень вібраційних характеристик підшипникових вузлів ТЕД у локомотивному депо Лозова Південної залізниці, величина якого становить 80,7%. Показник достовірності розробленого програмно-апаратного комплексу становить 86,1%, що на 5,4% вище ніж для стандартних засобів вібродіагностування.

Економічний ефект від впровадження розроблених заходів у технологію вібродіагностування досягається за рахунок зменшення трудомісткості ремонту одного КМБ в обсязі ТО-3 на 0,31 нормо-год, в об'ємі ПР-1 на 0,83 нормо-год, зменшення витрат на матеріали для проведення ремонту ТЕД тепловозів ЧМЕ 3 в обсязі ПР-3 в 1,06 разу і становить 815 грн. за 1 рік на один КМБ.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі комплексно вирішена науково-прикладна задача підвищення ефективності технології вібродіагностування пошкоджень елементів підшипників кочення електричних двигунів тепловозів, що забезпечує зниження експлуатаційних витрат на ремонт ТЕД і підвищення достовірності засобів технічного діагностування.

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз відмов вузлів ТЕД виявив визначальну роль технічного стану підшипникових вузлів ТЕД (29% непланових ремонтів ТЕД внаслідок руйнування моторно-якірних підшипників) у забезпеченні ефективності функціонування тепловозів. Установлено, що найбільш раціональним заходом виявлення пошкоджень підшипників кочення є використання математичного апарату вейвлет-аналізу у технології вібродіагностування.

2. Теоретично обґрунтована доцільність вібродіагностування в межах стохастичного підходу додатково до методів спектрального аналізу віброграм. Неможливість отримання абсолютно достовірної відповіді щодо технічного стану досліджуваного вузла методами детермінованого підходу не сприяє якісному процесу ідентифікації пошкоджень підшипників кочення і вимагає використання складових теорій перевірки статистичних гіпотез для класифікації пошкоджень за їх видами.

3. Розроблена функціонально-логічна модель технології вібродіагностування, яка забезпечує отримання додаткових діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення шляхом залучення в рамках двох загальноновживаних підходів математичного

апарату вейвлет-аналізу, зокрема алгоритмів швидкого вейвлет-перетворення та безперервного вейвлет-перетворення, які усувають недоліки спектральних методів і формалізують комплексний характер технології вібродіагностування завдяки створенню єдиного підходу до визначення технічного стану елементів підшипників кочення. Підтверджена адекватність розробленої моделі результатами апробації на 2552 зразках досліджених моторно-якірних підшипників ТЕД тепловозів.

4. Проведені розрахунки коефіцієнтів ексцесу в найбільш інформативних частотних діапазонах відновлених компонентів сигналу, які відповідають знайденим вейвлет-коефіцієнтам після застосування алгоритму швидкого вейвлет-перетворення, дали змогу удосконалити метод кількісного оцінювання технічного стану підшипників кочення внаслідок усунення усереднення потужності флукуацій зареєстрованих віброграм.

5. Досліджено зв'язок між розвитком вібраційних процесів у підшипникових вузлах ТЕД залежно від виду пошкодження за рахунок застосування частотно-часових вейвлет-спектрограм із використанням вейвлету Морле, які забезпечують можливість окрім аналізу за спектральними енергетичними складовими, отриманими у різних частотних діапазонах із використанням логарифмічної шкали, додатково простежувати за змінами вібраційних процесів у часі. Досліджена здатність реєстрації частотно-часовими вейвлет-спектрограмами малої нестационарності віброграм, яка набагато коротша за тривалість реалізації.

6. Розроблено програмно-апаратний комплекс для реалізації моделі технології вібродіагностування. Розроблено діагностичний алгоритм побудови частотно-часових вейвлет-спектрограм із виділенням інформативних частотних смуг, що забезпечує надання рекомендацій стосовно подальшої експлуатації досліджуваного вузла на підставі аналізу нових діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення і реалізує принцип нерозривності технології вібродіагностування. Впровадження розроблених заходів дає змогу удосконалити технологію вібродіагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за рахунок збільшення показника достовірності на 5,4% порівняно із стандартними аналізаторами вібрації, досягти зменшення витрат на матеріали для проведення ремонту ТЕД тепловозів в обсязі ПР-3 в 1,06 разу, отримати економію у розмірі 815 грн. за 1 рік на один КМБ, зменшити трудомісткість ремонту одного КМБ в обсязі ТО-3 на 0,31 нормо-год, в обсязі ПР-1 на 0,83 нормо-год.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні:

1. *Михалків С.В.* Діагностування підшипників кочення тягових електричних двигунів тепловозів із використанням третього і четвертого моментів їх вібрації // Перспективи розвитку рухомого складу залізниць. Зб. наук. пр. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – Вип. 76. – С. 68 – 76.

2. *Михалків С.В.* Засоби і методи отримання та обробки сигналів під час вібродіагностики підшипникових вузлів тягових електричних двигунів тепловозів // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Зб. наук. пр. Тем. вип.: Транспортне машинобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2006. – № 26. – С. 137 – 142.

3. *Михалків С.В.* Застосування вейвлету Морле для визначення технічного стану підшипників кочення // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – Вып. 1/2 (25). – С. 126 – 128.

4. *Михалків С.В.* Особливості використання вейвлетного аналізу для цілей вібраційної діагностики підшипникових вузлів електричних двигунів тепловозів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – Вып. 6/3 (24). – С. 12 – 14.

5. *Михалків С.В.* Удосконалення вібродіагностики підшипникових вузлів електричних машин за рахунок використання вейвлетного аналізу // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Харьковская национальная академия городского хозяйства. – К.: Техніка, 2006. – Вып. 72. – С. 299 – 304.

Додаткові:

6. *Бабанін О.Б., Михалків С.В.* Оцінювання системи обслуговування та ремонту локомотивів на основі теорії корисності // Зб. наук. пр. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 57. – С. 21 – 26.

7. *Михалків С.В.* Удосконалення вібродіагностики підшипників кочення тягових електричних двигунів тепловозів із використанням вейвлетного аналізу // Тезиси докладов конференції молодих учених и специалистов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины “Современные проблемы машиностроения”. – Харьков, 2006. – С. 13.

8. *Спосіб вібраційної діагностики підшипників кочення:* Заявка на винахід а 2006 10401 UA, МПК 7G01M13/04. / Е.Д. Тартаковський, О.Б. Бабанін, А.О. Каграманян, С.В. Михалків, А.М. Ходаківський (UA). – Заявл. 2.10.06 р.

АНОТАЦІЯ

Михалків С.В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – "Рухомий склад залізниць та тяга поїздів", Українська державна академія залізничного транспорту; Харків, 2007 р.

Для попередження відмов тягових електричних двигунів тепловозів встановлена необхідність проведення вібродіагностування моторно-якорних підшипників. Проведений аналіз вібродіагностичних методів визначив за доцільне залучати перспективний для цілей вібродіагностування математичний апарат вейвлет-аналізу. Розроблено функціонально-логічну модель технології вібродіагностування, яка використовує елементи стохастичного та детермінованого підходів і вейвлет-аналіз. Використання алгоритмів безперервного вейвлет-перетворення та швидкого вейвлет-перетворення дає змогу збільшувати кількість діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення тягових електричних двигунів тепловозів. Доопрацьовано метод кількісного оцінювання технічного стану підшипників кочення. Розроблений діагностичний алгоритм і програмно-апаратний комплекс із інтегральним віброакселерометром поверхневого типу для реалізації розробленої моделі підвищують ефективність технології вібродіагностування. Показник достовірності розроблених заходів становить 86,1%.

Ключові слова: вейвлет, вібрація, діагностування, підшипник, технологія.

АННОТАЦІЯ

Михалкив С.В. Усовершенствование технологии диагностирования подшипников качения электрических двигателей тепловозов по вибрационным характеристикам. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – "Подвижной состав железных дорог и тяга поездов", Украинская государственная академия железнодорожного транспорта; Харьков, 2007 г.

Для предупреждения отказов тяговых электрических двигателей тепловозов определена необходимость проведения вибродиагностирования моторно-якорных подшипников.

На основании проведенного анализа методов вибродиагностирования было установлено, что отсутствие универсального метода, а также существенные недостатки спектрального анализа не обеспечивают распознавание технического состояния

подшипников качения с высокой достоверностью, поэтому существует необходимость для целей вибро-диагностирования применять математический аппарат вейвлет-анализа.

Учитывая преимущества стохастического и детерминированного подходов технологии вибродиагностирования, на их основе была предложена функционально-логическая модель, которая вследствие использования алгоритмов непрерывного и быстрого вейвлет-анализа повышает количество диагностических признаков и влияет на повышение достоверности принятия диагностического решения. Определение высших моментов вибрации подшипников качения в частотных диапазонах, выделенных благодаря алгоритму быстрого вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Добеши четвертого порядка, дала возможность избавиться от негативного явления упразднения малого временного масштаба нестационарности исследуемых реализаций. Дальнейшее проведение этапа обучения, использование статистических гипотез и построение решающих правил дало возможность классифицировать повреждения подшипников по видам и, как следствие, учесть случайный характер вибрации, количественную оценку сомнения принятия возможных неверных решений касательно технического состояния диагностируемого узла.

Использование алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования позволило устранить невысокую разрешающую способность в высоко-частотном диапазоне вибрации вследствие применения традиционного математического аппарата спектрального анализа, в частности сложного метода построения спектра огибающей вибрации со свойственной для него особенностью усреднения мощности флуктуаций зарегистрированных виброграмм. Построенные частотно-временные вейвлет-спектрограммы с использованием вейвлета Морле дали возможность идентифицировать широкую номенклатуру повреждений подшипников качения. На основании сравнения спектров огибающих вибрации подшипниковых узлов с частотно-временными вейвлет-спектрограммами, доказана целесообразность использования последних для целей вибродиагностирования подшипников качения.

Созданный программно-аппаратный комплекс с интегральным виброакселеро-метром поверхностного типа реализует разработанную модель технологии вибро-диагностирования.

Внедрение разработанных методов и средств позволит повысить эффективность технологии вибродиагностирования. Показатель достоверности разработанных мероприятий составит 86,1%.

Ключевые слова: вейвлет, вибрация, диагностирование, подшипник, технология.

THE SUMMARY

Mikhalkiv S.V. Improvement of technology of rolling bearing diagnostics for diesel locomotives electric engines on vibration characteristics. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate technical science on a specialty 05.22.07 – "The railways rolling stock and trains traction", Ukrainian state academy of a railway transport; Kharkiv, 2007.

A necessity was established of rolling bearing vibrodiagnostics introduction for traction electric engines failure prevention of diesel locomotives. Analysis of vibrodiagnostics methods depicted a necessity to involve a wavelet-analysis method for the aims of vibrodiagnostics. A model of vibrodiagnostics technology was worked out, which uses the elements of determined and stochastic approaches and wavelet-analysis. Involving the algorithms of continuous wavelet-transformation and fast wavelet-transformation gives an opportunity to increase amount of diagnostics signs of rolling bearing technical condition. A method of quantitative estimation of rolling bearing technical condition was revised. There were worked out a diagnostics algorithm, programmable apparatus for achieved model realization with a complete 2-axis vibroaccelerometer with a digital output, which increases the effectiveness of the technology of vibrodiagnostics. An indicator of trustworthiness of worked out measurements equals 86,1%.

Key words: bearing, diagnostics, technology, vibration, wavelet.

Михалків Сергій Васильович

Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів
тепловозів за вібраційними характеристиками

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

к.т.н., доц. Ю.М. Дацун

Підписано до друку 4 вересня 2007 р.
Формат паперу 64x84 1/16. Папір офсетний
Умовн. – друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,1
Замовлення № 334. Тираж 100 прим.

Видавництво УкрДАЗТ, свідоцтво ДК №2874 від 12.06.2007 р.
61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7
Друкарня УкрДАЗТу, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7