УДК 629.4.06:621.822.614

Мартинов І.Е., д. т. н.(ХИИТ)
Равлюк В.Г., ст. викл. (ХИИТ)

ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТОДОМ ОБВІДНОЇ

Вступ. Підшипники кочення широко застосовуються у вузлах рухомого складу, тому питання оцінки технічного стану і діагностики їх дефектів займають важливе місце в роботі вібродіагностичних служб.

Практичні завдання діагностики підшипників кочення в процесі експлуатації вирішуються, як правило, одним з трьох основних способів. Перший використовує алгоритми виявлення дефектів по зростанню температури підшипникового вузла, другий - по появі в мастилі продуктів зносу, а третій - по зміні властивостей вібрації (шуму) [1 - 3]. Найповніша і детальна діагностика підшипників з виявленням й ідентифікацією дефектів на ранній стадії розвитку виконується по високочастотному сигналу вібрації підшипника.

Аналіз останніх досліджень. Широкого поширення у всьому світі набули методи контролю й діагностики підшипників кочення, що базуються на вимірюванні параметрів вібрації. Обумовлено це тим, що вібраційні сигнали несуть в собі інформацію про стан механізму та підшипників зокрема. При цьому теорія й практика аналізу вібросигналів до теперішнього часу така відпрацьована, що можна отримати достовірну інформацію про поточний технічний стан не тільки підшипника, але і його елементів [2,4].

В даний час на практиці використовуються чотири методи оцінки технічного стану підшипників кочення: метод ПІК-фактора, метод прямого спектру, метод спектру обвідної та метод ударних імпульсів [7].

Мета статті. Розглянути основні методи визначення оцінки технічного стану підшипників кочення й діагностики їх дефектів.

Викладення основного матеріалу. При роботі підшипника з внутрішніми дефектами в тимчасовому вібросигналі з’являються характерні складові, гармоніки із власними частотами, по яких можна

достатньо коректно виявити місце знаходження дефекту. Чисельні значення частот цих складових залежать від співвідношення геометричних розмірів підшипника і оборотної частоти обертання осі [3, 5].

У навантаженому підшипнику можна диференціювати чотири основні, вживані для діагностики частоти - зовнішнього та внутрішнього кільця підшипника, частоти сепаратора і частоти тіл кочення. Розглянемо без виведення формули для розрахунку цих частот.

Частота перекочування тіл кочення по зовнішньому кільці (часто в літературі позначається BPFO):

$$F_H = \frac{N_{TK}}{2} \cdot F_1 \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C \cdot \cos\varphi} \right), \quad (1)$$

де N_{TK} - кількість тіл кочення в одному підшипнику;
F_1 - оборотна частота обертання осі;
D_{TK} - діаметр тіла кочення;
D_C - середній діаметр сепаратора;
φ - кут контакту тіла кочення з кільцем.

Частота перекочування тіл кочення по внутрішньому кільці (BPFI):

$$F_B = \frac{N_{TK}}{2} \cdot F_1 \left(1 + \frac{D_{TK}}{D_C \cdot \cos\varphi} \right), \quad (2)$$

Частота сепаратора (FTF):

$$F_C = \frac{1}{2} \cdot F_1 \left(1 - \frac{D_{TK}}{D_C \cdot \cos\varphi} \right), \quad (3)$$

Частота перекочування тіл кочення (BSF):

$$F_{TK} = \frac{1}{2} \cdot F_1 \cdot \frac{D_{TK}}{D_C} \left(1 - \frac{D_{TK}^2}{D_C^2 \cdot \cos^2\varphi} \right), \quad (4)$$

Дані формули розрахунку характерних підшипникових частот є простими, але не завжди зручними для практики. Складність полягає в тому, що вони включають кут контакту тіл кочення з кільцями. Цей параметр не завжди відомий точно і в процесі роботи підшипника може змінювати своє значення [4, 6].

У практиці зручніше використовувати простіші формули, що не включають цей кут, в результаті, природно, менш точні. Наведені й ці формули:

Частота перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю (BPFO):

$$F_H \approx F_1\left(\frac{N_{TK}}{2-1,2}\right), \tag{5}$$

Частота перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю (BPFI):

$$F_B \approx F_1\left(\frac{N_{TK}}{2+1,2}\right), \tag{6}$$

Частота сепаратора (FTF):

$$F_C \approx \left(\frac{1}{2}-\frac{1,2}{N_{TK}}\right), \tag{7}$$

Частота перекочування тіл кочення (BSF):

$$F_{TK} \approx \left(\frac{N_{TK}}{2}-\frac{1,2}{N_{TK}}\right), \tag{8}$$

Формули для розрахунку підшипникових частот зручні і корисні для використання в діагностиці, але завжди слід пам'ятати, що користуватися ними потрібно дуже обережно, достовірність діагностики з їх використанням може бути не високою. Досить часто навіть за наявності в підшипнику явного дефекту у вібросигналі характерні частоти можуть бути повністю відсутніми, мати зрушення по частоті, або мати дуже малий рівень.

Аналіз обвідних спектрів у районі окремих джерел дозволяє виділити частоту модуляції ω_{m}, властиву окремому k - му джерелу.

На цій частоті спектра обвідна частка $\text{C}_{\text{k}}^{\text{j}}$ в припущенні про незв'язаність процесів, що модулюють, може бути визначена за формулою:

$$C_k^j(\omega) = \sqrt{\frac{\text{m}_{\text{j}}^{\text{k}}(\omega_m)}{\text{m}_{\text{j}}^{\Sigma}(\omega_m)}}, \tag{9}$$

де $\text{m}_{\text{j}}^{\text{k}}(\omega_m)$, $\text{m}_{\text{j}}^{\Sigma}(\omega_m)$ - коефіцієнти глибини модуляції в районі k-того джерела і на контрольній поверхні підшипника, відповідно.

Для того, щоб за наявності явного дефекту в тимчасовому вібросигналі, а отже і на отриманому в результаті його обробки спектрі, були достовірно виявлені гармоніки з цими характерними частотами, необхідне виконання цілого ряду різних вимог [6].

Основні з цих вимог наступні:

- підшипник повинен бути навантажений достатнім зусиллям, близьким до номінального;
- дефектна зона повинна періодично проходити через зону навантаження підшипника;
- у механізмі не повинно бути інших джерел вібросигналів з частотою, рівній частоті дефектів;
- вібродатчик повинен бути розташований достатньо близько до навантаженої зони підшипника;
- частотні параметри датчика повинні відповідати робочим параметрам механізму;
- реєстратор вібросигналів повинен забезпечувати після обробки отримання спектру вібросигналу з дозволом не менше 1600 - 3200 ліній.

Ці вимоги відносяться до всіх методів діагностики підшипників кочення по спектрах і спектрах обвідної, які базуються на використанні вищенаведених формул розрахунку підшипникових частот.

Тільки при виконанні цих умов роботи підшипника і установки датчика можна достатньо упевнено і на ранніх стадіях діагностувати дефекти підшипника [1, 5, 6, 7]. Інакше висока вірогідність або «пропуску» дефектів або ж «помилкового визначення» дефектів там, де їх немає.

Складним так само є питання визначення рівня розвитку зареєстрованого дефекту по амплітудах або інших параметрах гармонік характерних підшипникових частот. У значній мірі воно залежить від типу апаратури, що використовується і місця установлення вібродатчика. Кажучи іншими словами, рівень дефекту підшипника в кожному механізмі свій, унікальний. На величину порогу кожного дефекту так само позначається видалення дефектного елементу від вібродатчика - дефект внутрішнього кільця менш помітний, чим дефект зовнішнього кільця.

Визначення дійсного рівня неприпустимого дефекту кожного підшипника, точніше кажучи дійсному ступеню розвитку кожного дефекту кожного підшипника, значно збільшує трудомісткість використання таких методів діагностики [6].

Метод діагностики стану буксових вузлів за допомогою спектрів обвідної вібросигналу отримав максимальний прикладний розвиток завдяки його застосуванню саме для ранньої діагностики підшипників кочення. Тому приділимо цьому методу найбільшу увагу.

Високочастотна, шумова частина сигналу змінює свою амплітуду в

часі, тобто вона модулюється якимсь більш низькочастотним сигналом. Виявляється, що саме в цьому модулюючому сигналі утримується й інформація про стан підшипника. Виділення й оброблення цієї інформації й становлять основу цього методу [1]. Експериментально було встановлено, що найкращі результати цей метод дає в тому випадку, якщо аналізувати модуляцію не широкосмугового сигналу, що отримується від акселерометра, а попередньо здійснити смугову фільтрацію вібросигналу в діапазоні приблизно 6 – 10 кГц і аналізувати модуляцію цього сигналу. Для цього відфільтрований сигнал детектується, тобто виділяється модулюючий сигнал (або ще його називають «обвідна сигналу»), що подається на вузькосмуговий спектроаналізатор і ми отримуємо спектр модулюючого сигналу, або спектр обвідної [6]. Що в свою чергу дало назву цьому методу. Описана послідовність обробки сигналу представлена для наочності на рисунку 1.

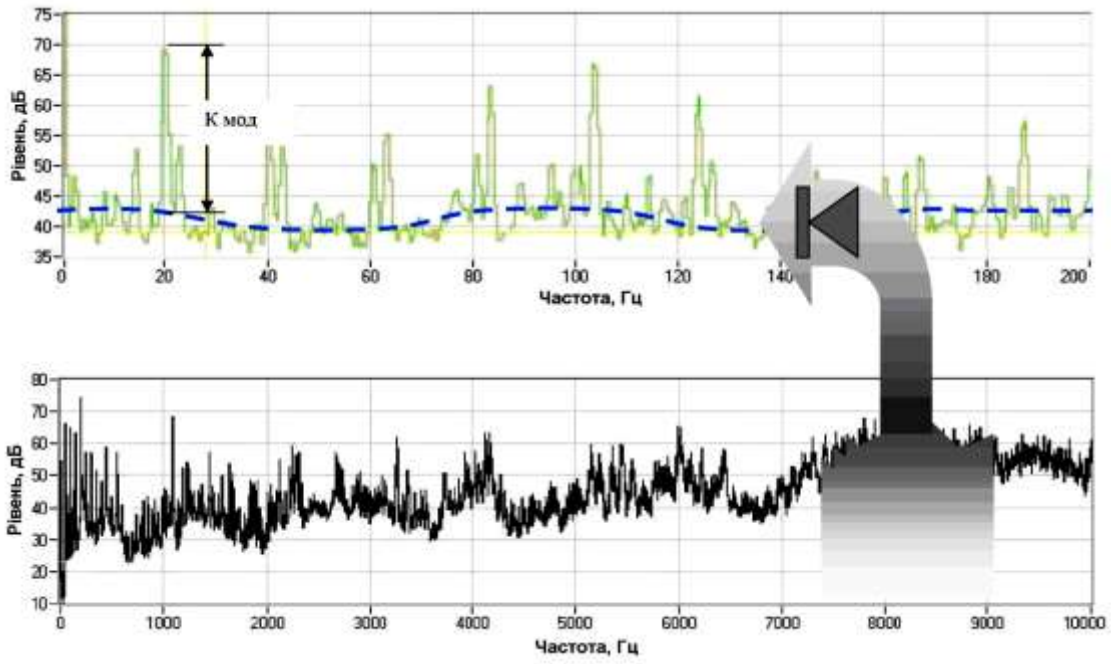

Рисунок 1. - Обробка сигналу по методу спектра обвідної

Видно, що обробка сигналу досить складна, але сам результат вартує того. Справа в тому, що, як уже говорилося вище, невеликі дефекти підшипника не в змозі викликати помітні вібрації в області низьких і середніх частот, що генеруються підшипником. У той же час для модуляції високочастотних вібраційних шумів енергії виникаючих ударів виявляється цілком достатньо тобто цей метод має дуже високу чутливість [6].

Сам спектр обвідної має завжди дуже характерний специфічний вигляд. При відсутності дефектів він являє собою майже горизонтальну,

злегка хвилясту лінію. З появою дефектів над рівнем цієї досить гладкої лінії суцільного фону починають підніматися дискретні складові, частоти яких однозначно прораховуються по кінематиці й обертанню підшипника [5 - 7]. Частотний склад спектра обвідної дозволяє ідентифікувати наявність дефектів, а перевищення відповідних складових над фоном однозначно характеризує глибину кожного дефекту.

В таблиці 1 наведений перелік діагностичних ознак пошкоджень, що ідентифікуються під час діагностування підшипників кочення за одноразовими вимірюваннями спектра обвідної вібрації. Ці ознаки можна використовувати для розпізнавання пошкодження у випадку, якщо воно є одиничним, тобто за умови відсутності розвинених пошкоджень в інших вузлах діагностуючого об'єкту [5].

Таблиця 1. - Перелік діагностичних ознак пошкоджень елементів підшипників кочення буксових вузлів

Вид пошкодження	Спектр вібрації		Спектр обвідної	
	основні	додаткові	основні	додаткові
1 Биття осі	$kf_{об}$	немає зростання ВЧ	$k<10$	немає зростання ВЧ
2 Зношування зовнішнього кільця	$f_{зовн}$	$f_{зовн}$, $k\leq3$, зростання ВЧ	$f_{зовн}$	$f_{зовн}$, $k\leq3$, зростання ВЧ
3 Раковини, тріщини на зовнішньому кільці	kf_3, $k>3$	зростання ВЧ	kf_3, $k>3$	зростання ВЧ
4 Зношення внутрішнього кільця	$Kf_{об}$	$kf_{об}$, зростання ВЧ	$kf_{об}$	$kf_{об}$, зростання ВЧ
5 Раковини, тріщини на внутрішньому кільці	$kf_в$	$kf_{об}$, зростання ВЧ	$kf_в$	$kf_{об}$, зростання ВЧ
6 Зношення тіл кочення й сепаратора	f_c, $(f_{об}-f_c)$	kf_c, $k(f_{об}-f_c)$, зростання ВЧ	f_c, $(f_{об}-f_c)$	kf_c, $k(f_{об}-f_c)$, зростання ВЧ
7 Раковини, відколи на тілах кочення	$2kf_{тк}$	$2kf_{тк}$, зростання ВЧ	$2kf_{тк}$	$2kf_{тк}$, зростання ВЧ
8 Проблеми змащування	зростання ВЧ			

де $f_{об}$ – частота обертання осі; $f_в$ – частота перекочування тіл кочення по внутрішньому кільці; $f_{зовн}$ – частота перекочування тіл кочення по зовнішньому кільці; $f_{ТК}$ – частота обертання тіл кочення; f_c – частота обертання сепаратора; $ВЧ$ – високочастотна область спектра вібрації.

Нині, фахівцями кафедри «Вагони» проводяться дослідження з виділення й уточнення діагностичних ознак технічного стану елементів підшипників кочення буксових вузлів вантажних вагонів у вагонному депо «Основа» Південної залізниці.

Висновки. Складний характер зареєстрованої вібрації буксових вузлів рухомого складу потребує залучення сучасних методів обробки вібраційних сигналів для усунення завад та виділення корисного сигналу. Вкрай важливим завданням, розв'язання якого дозволяє вчасно виявляти передаварійний стан та підвищувати безпеку руху поїздів є проведення ґрунтовних досліджень з метою інтерпретації та класифікації отриманих дискретних частотних складових на спектрах обвідної вібрації, що ототожнюються з технічним станом підшипників кочення буксових вузлів рухомого складу.

Переваги методу обвідної висока чутливість, інформативність і захищеність від завад. Основний недолік - висока вартість і складність реалізації. Як правило, алгоритм обробки й аналізу реалізується з використанням комп'ютерної техніки. Метод широко використовується в середовищі професіоналів і в стаціонарних системах моніторингу технічного стану буксових вузлів рухомого складу.

Список літератури

1. Косенко Г. Д. Техническая диагностика машин [Текст] : учеб. / Г. Д. Косенко, З. Г. Гиоев, В. П. Бабаков – М.: Машиностроение, 1988. – 322 с.

2. Заболотний О.В. Вібродіагностика підшипників кочення методами періодично корельованих випадкових процесів [Текст] // О. В. Заболотний, В. Ю. Михайлинин // Відбір і обробка інформації. – 2002. – №14(90). – С. 53 – 58.

3. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов [Текст] : учеб. / Б. В. Павлов. –М.: Машиностроение, 1971. – 427 с.

4. Борзилов І. Д., Визначення діагностичних ознак технічного стану елементів підшипників кочення буксових вузлів рухомого складу [Текст] / І. Д. Борзилов, В. Г. Равлюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. 15 – С. 100-105.

5. Кравченко В. М. Технічне діагностування механічного обладнання [Текст] : підруч. / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. Я. Седуш. – Донецьк: ТОВ „Юго-Восток, Лтд", 2007. - 447 с.

6. Барков А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации [Текст] : учеб. / А. В. Барков, Н. А. Баркова; СЗУЦ. - СПб.: СПбГМТУ, 2004. - 156 с.

7. Равлюк В. Г. Вібродіагностика та методи діагностування підшипників кочення буксових вузлів вагонів [Текст] / В. Г. Равлюк // Зб. наук. праць ДонІЗТ. –Донецьк: - 2010. - Вип. 21. –258 с.