

УДК 621.922

В.Ю.Денисюк, В.Ю.Заблоцький

Луцький національний технічний університет

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХВИЛЯСТОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ ВІБРОАКТИВНОСТІ ДОРІЖОК КОЧЕННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ

Проведено експериментальні дослідження хвилястості доріжок кочення кілець роликотпідшипників на дослідній установці MVA-160V з метою оцінки віброактивності кілець. Отримані спектрограми діапазону гармонік використані для контролю геометричних характеристик робочих поверхонь деталей підшипників.

Ключові слова: *спектральний аналіз, шліфування, доріжка кочення, хвилястість, віброактивність, роликотпідшипник.*

Однією з основних задач, що стоять у даний час перед вітчизняною підшипниковою промисловістю, є зниження рівнів вібрації і шуму підшипників кочення.

Причиною є згинаючі деформації кілець підшипника силами, що діють на них з боку тіл кочення. Кільця підшипника згинаються під дією контактних навантажень з боку тіл кочення, приймаючи форму обертового разом з ними багатогранника. Подібні згинаючі деформації передаються на інші деталі машин чи поширюються в навколишньому середовищі (наприклад у повітрі) у вигляді акустичних хвиль - шуму. Частотами такої вібрації є частота проходження тіл кочення по кільцю і кратні частоти: $qz f_c$, де $q=1,2, \dots$; z - число тіл кочення; f_c - частота обертання сепаратора. У більшості машин і приладів практичне значення можуть мати, головним чином, згинаючі деформації зовнішніх кілець підшипників [1, 2].

Оцінку значимості структурної вібрації підшипників можна здійснити двома способами. По-перше, порівнюючи розрахункові значення амплітуд зі значеннями, які реєструються на практиці. По-друге, зіставляючи розрахункові значення амплітуд структурної вібрації і вібрації, обумовленої похибками підшипників. В обох випадках порівнюватися повинні амплітуди гармонік вібрації на частотах $qz f_c$. Перший спосіб оцінки не викликає ускладнень, якщо вирішена задача структурної вібрації підшипника і знайдені амплітуди віброприскорень точок зовнішніх кілець при практичних вимірюваннях. Другий спосіб потребує деякого пояснення.

Теорія неідеальних кулькових підшипників з геометричними похибками робочих поверхонь кілець і кульок дозволяє пов'язати спектр похибок зі спектром вібрації [2]. Оскільки структурна вібрація має місце тільки на частотах $qz f_c$, для проведення порівняння зі спектра вібрації неідеального кулькового підшипника повинні бути виділені саме ці гармонійні складові. З теорії випливає, що вібрація на частотах $qz f_c$ викликається тільки похибками геометрії зовнішнього кільця (у припущенні про ізотропність пружних властивостей матеріалу), причому гармоніками похибок з номерами $\lambda = qz \pm 1$. Середньоквадратичне значення амплітуди вібропереміщень зовнішнього кільця, як твердого тіла, при цьому дорівнює [1]:

$$a_{f=qz f_c} = \sqrt{a_{\lambda=qz-1}^2 + a_{\lambda=qz+1}^2}, \quad A_{f=qz f_c} = \sqrt{a_{\lambda=qz-1}^2 + a_{\lambda=qz+1}^2} \quad (1)$$

перша гармоніка вібропереміщення, що має найбільше значення (на частоті проходження тіл кочення по зовнішньому кільцю $z f_c$) обумовлюється гармоніками похибок геометрії зовнішнього кільця з номерами $\lambda = z + 1$ і $\lambda = z - 1$, що, без врахування фаз, складаються в (1) середньоквадратичні. Таким чином, для оцінки значимості структурної вібрації роликотпідшипника другим способом варто розрахувати амплітуду першої гармоніки структурної вібрації від двох розглянутих джерел і провести її пряме порівняння з амплітудами гармонік хвилястості зовнішнього кільця з номерами $\lambda = z + 1$ і $\lambda = z - 1$.

Спектральний аналіз є ефективним засобом аналізу процесів в математичному моделюванні. Спектральний аналіз дає графічну інтерпретацію розкладу функції довільного періоду в ряд Фур'є. Спектральний аналіз здійснюється для періодичних і неперіодичних функцій. Для періодичних функцій спектр процесу є лінійчатим, а для неперіодичних (функцій нескінченного періоду) - неперервним.

Розглянемо спектри періодичних функцій. Для періодичної функції з періодом 2π її розклад в ряд Фур'є має вигляд [3]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(kx) + b_k \cdot \sin(kx) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(kx + \psi_k), \quad (2)$$

де амплітуди A_k і початкові фази ψ_k , зв'язані з відповідними коефіцієнтами ряду Фур'є a_k і b_k :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \psi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}. \quad (3)$$

Ряд Фур'є графічно зображується у вигляді нескінченної сукупності ліній, довжина яких в певному масштабі відповідає коефіцієнтам ряду. Одержані графіки дають сукупність (спектр) коефіцієнтів ряду (рис. 1).

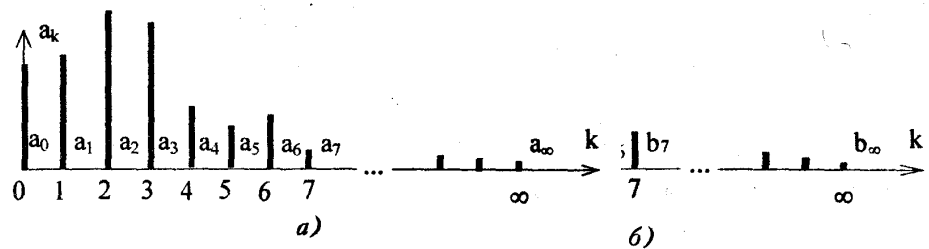


Рис. 1. Графічне зображення коефіцієнтів (спектр) ряду Фур'є для функції з періодом 2π : а - спектр коефіцієнтів ряду a_k ; б - спектр коефіцієнтів ряду b_k

Цей спектр називається лінійчастим або дискретним, тому що він складається із нескінченної кількості ліній, кожна з яких відповідає коефіцієнту ряду з номером k .

Графічна інтерпретація ряду Фур'є є ефективним засобом аналізу процесів оброблення кілець підшипників. За значеннями коефіцієнтів (спектру) можна зробити висновок про те, із яких гармонічних функцій складається процес. Спектр дозволяє виявити головні (переважаючі) гармоніки, які присутні в розкладі.

Після дослідження кільця методом спектрального аналізу на експериментальній установці MVA-160V (рис. 2) виявилось, що гармоніка № 22 знаходиться за межами допуску (рис. 3, б), хоча загальна оцінка геометричних параметрів не дозволила виявити цих відхилень (рис. 3, а).

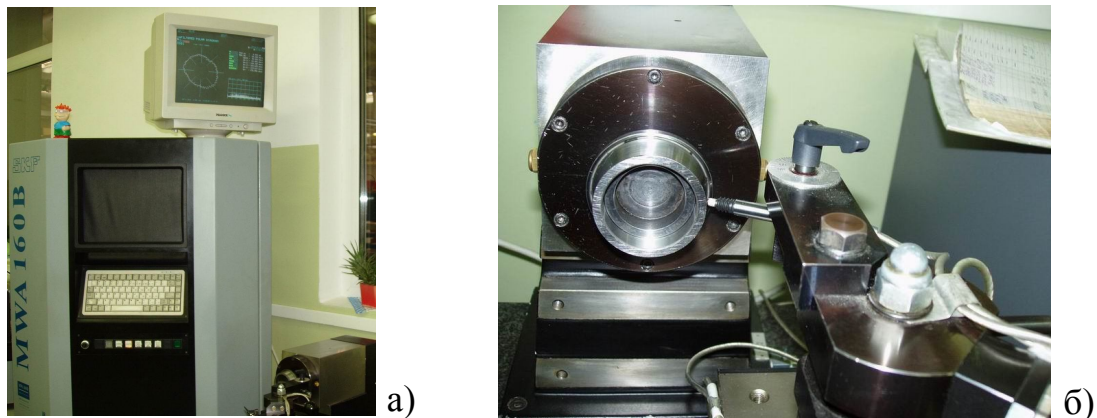


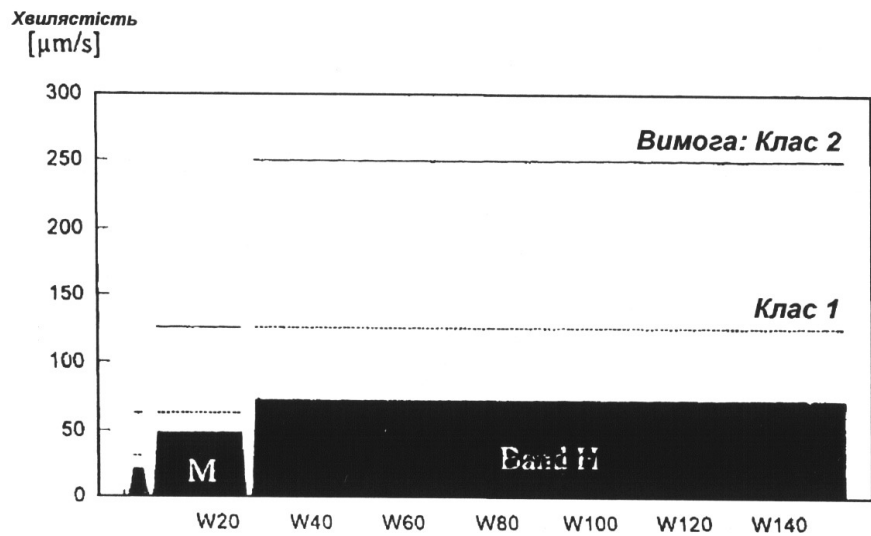
Рис. 2. Експериментальна установка для проведення гармонічного аналізу робочих поверхонь кілець підшипників MVA-160V: а) загальний вигляд установки; б) робочий простір з досліджуваним зразком

Лінійчасті графіки визначають значення коефіцієнтів залежно від номеру гармоніки (для функції періоду 2π) або від частоти (для функції довільного періоду).

Використовують також зображення амплітуд (спектр) для ряду Фур'є в комплексній формі. Розглянемо ряд Фур'є в комплексній формі для функції довільного періоду:

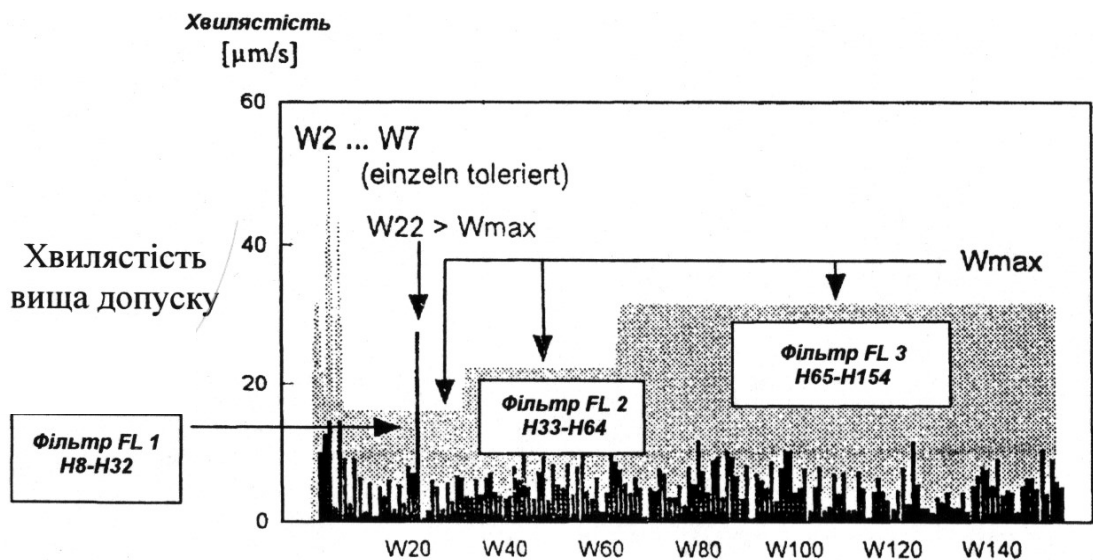
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0};$$

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jkm_0 x} \quad (4)$$



а)

Кількість хвиль=порядок хвилястості
(Хвилі/периметр; wpc)



б)

Кількість хвиль=порядок хвилястості
(Хвилі/периметр; wpc)

Рис. 3. Дослідження хвилястості робочої поверхні кільця роликового підшипника:

а – без використання гармонічного аналізу;

б – з детальним дослідженням гармонік хвилястої поверхні

Для цього ряду графічне зображення амплітуд c_k особливо зручне. Враховуючи, що коефіцієнти ряду з додатними та від'ємними номерами є комплексно спряженими величинами, а саме:

$$c_{-k} = \frac{1}{2}(a_k + jb_k); \quad c_0 = \frac{a_0}{2}; \quad c_{+k} = \frac{1}{2}(a_k - jb_k); \quad c_{-k} = \bar{c}_{+k},$$

одержимо співвідношення:

$$\operatorname{Re} c_k = \operatorname{Re} c_{-k}, \quad \operatorname{Im} c_k = -\operatorname{Im} c_{-k},$$

тобто дійсні частини коефіцієнтів c_k не змінюються із зміною знаку частоти, а уявні частини при цьому змінюють знак. Відповідно, в графічному зображенні складових коефіцієнтів c_k

одержимо симетричне зображення дійсних частин коефіцієнтів і косиметричне зображення уявних частин коефіцієнтів (рис. 4).

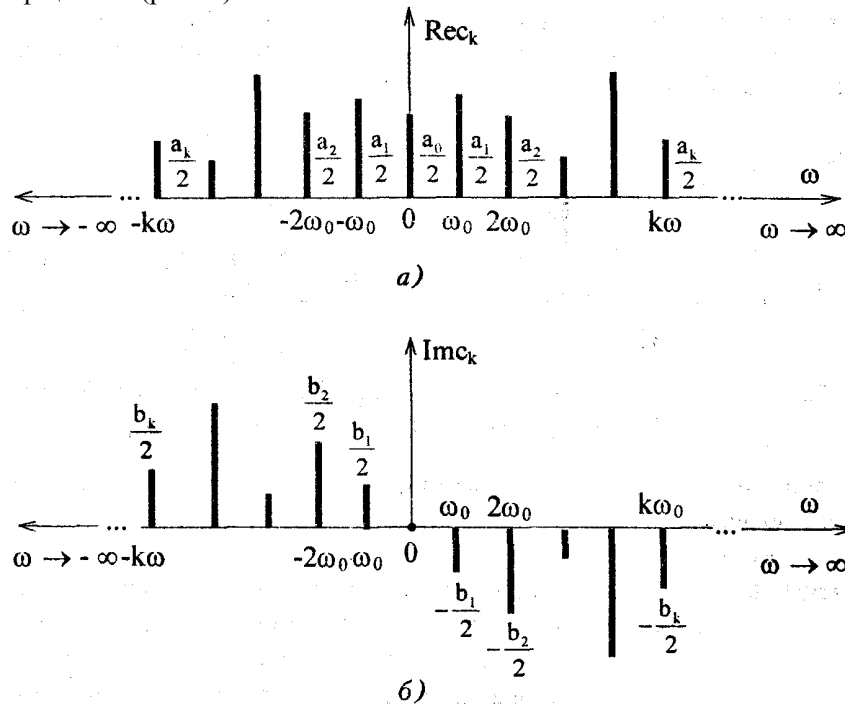


Рис. 4. Спектри дійсних (а) та уявних (б) частин коефіцієнтів c_k ряду Фур'є в комплексній формі

Враховуючи симетрію графіків зазвичай розглядають лише їх праві частини, що охоплюють додатну смугу частот $0 \leq \omega \leq \infty$.

Користування двома графіками часто буває незручним, тому їх об'єднують, зображаючи модулі коефіцієнтів

$$|c_k| = \frac{1}{2} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} = \frac{A_k}{2} \quad (5)$$

З метою спрощення обчислень звичайно застосовують зображення значень квадратів модулів комплексних коефіцієнтів ряду:

$$|c_k|^2 = \frac{1}{4} (a_k^2 + b_k^2) = \frac{A_k^2}{4} \quad (6)$$

Зображення значень модулів коефіцієнтів ряду Фур'є в комплексній формі утворює лінійчасту діаграму, яка інтерпретує спектр модулів (квадратів модулів) комплексних чисел. Спектр (рис. 5) охоплює всю область частот $\omega = k\omega_0$ від $-\infty$ до $+\infty$.

Спектр є симетричним відносно нульового значення частоти. Отриманий лінійчастий спектр відповідає періодичній функції з періодом T .

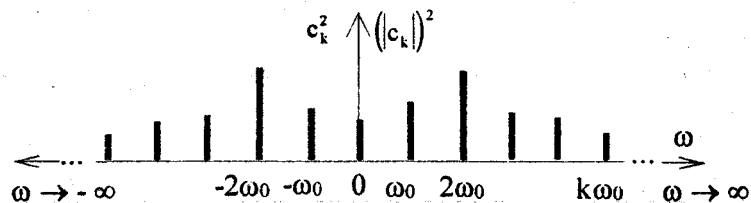


Рис. 5. Графічне зображення квадратів модулів коефіцієнтів c_k ряду Фур'є в комплексній формі, яке є спектром періодичної функції з періодом T

Зазначимо, що середній квадрат функції $f(x)$ дорівнює сумі квадратів модулів коефіцієнтів:

$$[f(x)]^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [f(\tau)]^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |c_k|^2 = \frac{1}{4} a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \quad (7)$$

Графічне зображення розкладу функції в ряд Фур'є (спектр) використовується для функцій довільного періоду, в тому числі, нескінченно великого періоду.

Спектрограми аналогічного характеру можливо ефективно використовувати під час контролю гармонічних характеристик робочих поверхонь кілець підшипників. На рис. 6 відображено спектрограму дослідження хвилястості за рахунок контролю та виявлення переважаючих гармонік. Хвилі, порядок яких приблизно відповідає кількості тіл обертання є найзручнішими для вимірювання радіального переміщення, а отже, вони максимально впливають на рівень вібрації підшипника. Таке твердження справджується для всіх хвиль, кратних кількості тіл обертання.

Використання таких спектрограм є найефективнішим способом контролювання геометричних характеристик робочих поверхонь деталей підшипників. На рис. 6 показано спектрограми робочої поверхні внутрішнього кільця підшипника з діапазонами 0-500 та 0-50 відповідно, які дозволяють провести аналіз обробленої поверхні та контроль переважаючих гармонік для певного типу підшипника.

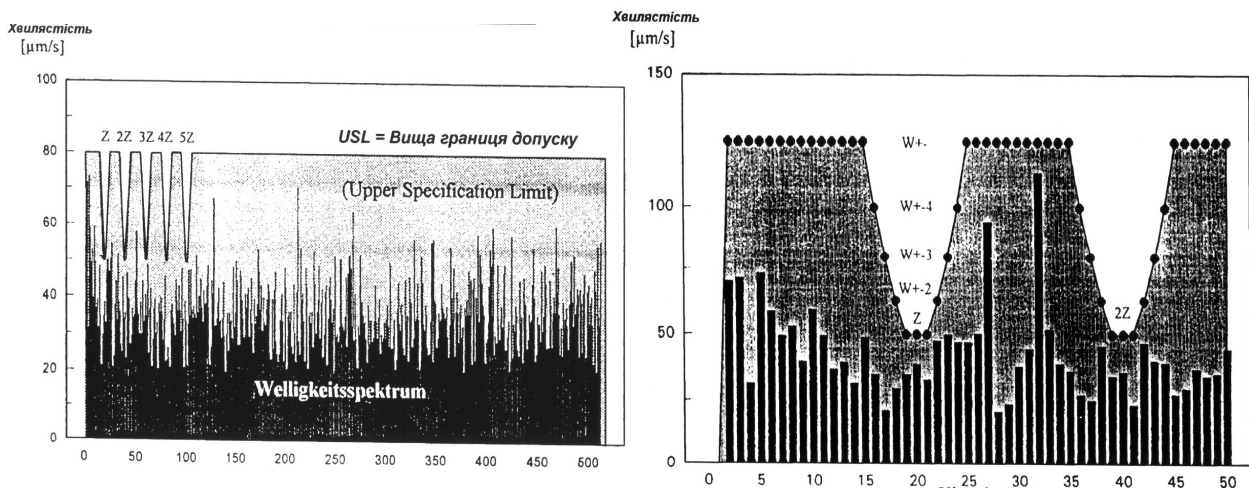


Рис. 6. Спектрограми хвилястості робочої поверхні внутрішнього кільця підшипника із визначенням та контролем переважаючих гармонік з діапазоном вимірювання 0-500 та 0-50

Ці спектрограми свідчать, що серед усього діапазону гармонік достатньо використання нового методу аналізу та контролю геометричних параметрів робочих поверхонь деталей підшипників дозволяє покращити експлуатаційні характеристики підшипників, не змінюючи при цьому точність оброблення за рахунок контролю переважаючих гармонік.

Таким чином, для оцінки впливу геометричних параметрів поверхонь обертання кілець на експлуатаційні властивості підшипника запропоновано комплексний функціонально-параметричний показник – віброактивність поверхні, за допомогою якого з'явилась можливість на стадії технологічного проектування операцій формоутворення прогнозувати віброакустичні характеристики робочих поверхонь кілець і експлуатаційні властивості підшипника. Задача керування експлуатаційними властивостями підшипника на стадії його виготовлення зводиться до технологічного керування мікрорельєфом робочих поверхонь кілець на операціях формоутворення.

1. Игумнов Б.Н. Расчет оптимальных режимов резания для автоматических линий с гибкой связью. В сб.: Резание и инструмент, в. 18, 1977, С. 104-108.
2. Конструкторско-технологическое обеспечение качества деталей машин. /В.П. Пономарев, А.О. Батов, А.В. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.