УДК 621.314:621.393.66

І. Яворський[1,2], д.ф.-м.н., проф., Р. Юзефович[1-3], д.т.н., доц., О. Личак[1], к.т.н., ст. досл., Г. Трохим[1], к.т.н., І. Мацько[1], к.т.н.
[1] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
[2] Бидгощська політехніка, Бидгощ, Польща
[3] Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

ОБРОБКА ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ МЕТОДАМИ ПЕРІОДИЧНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ

I. Javorskyj[1,2], Dr.Sci., Prof., R. Yuzefovych[1,3], Dr.Sci., Assoc. Prof., O. Lychak[1], Ph.D., Senior Researcher, G. Trokhym[1], Ph.D., I. Matsko[1], Ph.D.
[1] Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[2] UTP University of Sciences and Technology, Bydgoszcz, Poland
[3] Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

VIBRATION SIGNALS PROCESSING BY THE METHODS OF PERIODIC NON-STATIONARY RANDOM PROCESSES FOR THE DETECTION OF BEARING DEFECTS

Abstract. The dependence of the spectral composition of deterministic periodic oscillations and the correlation-spectral structure of the stochastic component in vibration signal on the existing shocks in the bearing was analyzed. Defects that occur in bearings during operation cause non-linear effects in the part's response to load and non-linear effects in vibrations. Obtained results can be used for early detection of mechanism defects and establishment of their types.

Дефекти, що виникають у підшипниках під час експлуатації, викликають нелінійні ефекти у реакції деталі на навантаження і, відповідно, появу нелінійних ефектів у властивостях вібраційних коливань самого підшипника та його елементів. Нелінійності призводять до появи додаткових гармонік у регулярних складових вібраційного сигналу, а також складної взаємодії цих складових з стохастичними коливаннями, зумовленими цілим рядом факторів. До них слід віднести неоднорідність товщини та фізико-хімічних властивостей змазки, варіації коефіцієнтів тертя, зміни робочих навантажень і тому подібні фактори. У результаті такої взаємодії регулярна складова коливань зазнає складної фазової та амплітудної модуляції. Параметри модуляційної взаємодії є індикаторами стану досліджуваного об’єкту. А, оскільки, всі процеси у обертовому механізмі завжди залежать від одного джерела, тобто приводу, що обертається з певною частотою, тому адекватно описати параметри вібраційного сигналу можна математичною моделлю у вигляді модульованих за амплітудою та фазою гармонік з кратними частотами чи періодично корельованим випадковим процесом [1, 2]:

$$\xi\left(t\right)=\sum_{k\in Z}\xi_k\left(t\right)e^{ik\omega_0 t}\ , \qquad (1)$$

$\xi_k\left(t\right)$ – стаціонарно зв’язані випадкові процеси, P – період нестаціонарності, а $\omega_0=\dfrac{2\pi}{P}$ базова (основна) частота.

Математичне сподівання процесу (1) має вигляд

$$m\left(t\right)=E\xi\left(t\right),$$

де E – оператор імовірнісного усереднення.

Кореляційна функція процесу (1):

$$b(t,u)=E\overset{\circ}{\xi}(t)\overset{\circ}{\xi}(t+u),$$

де $\overset{\circ}{\xi}(t)=\xi(t)-m(t)$, періодично змінюється за часом.

Розкладаючи математичне сподівання і кореляційну функцію у ряди Фур'є отримуємо:

$$m(t)=\sum_{k\in Z}m_k e^{ik\omega_0 t}=m_0+\sum_{k\in N}\left[m_k^c\cos k\omega_0 t+m_k^s\sin k\omega_0 t\right],$$

$$b(t,u)=\sum_{k\in Z}B_k(u)e^{ik\omega_0 t}=B_0(u)+\sum_{k\in N}\left[C_k(u)\cos k\omega_0 t+S_k(u)\sin k\omega_0 t\right],$$

тут $m_k=\frac{1}{2}\left[m_k^c-im_k^s\right]$, $B_k(u)=\frac{1}{2}\left[C_k(u)-iS_k(u)\right]$, $\forall k\neq 0$, а Z і N є відповідно множини цілих та натуральних чисел.

Коефіцієнти m_k є математичними сподіваннями модулюючих процесів $m_k=E\xi_k(t)$, а коефіцієнти $B_k(u)$, тобто кореляційні компоненти [1, 2], визначаються наступним чином

$$B_k(u)=\sum_{l\in Z}R_{l-k,l}(t)e^{il\omega_0 u}, \tag{2}$$

де $R_{lk}(u)=E\overline{\overset{\circ}{\xi}_l(t)}\overset{\circ}{\xi}_k(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}_l(t)=\xi_l(t)-m_l$, а "¯" – знак спряження. Нульовий кореляційний компонент $B_0(u)$ визначається автокореляційними функціями модулюючих процесів $\xi_k(t)$, а кореляційні компоненти вищих порядків – взаємокореляційними функціями тих модулюючих процесів, номери яких різняться на номер порядку k.

Залежна від часу спектральна густина

$$f(\omega,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}b(t,u)e^{-i\omega u}du$$

є періодичною функцією часу. Представимо її у вигляді ряду Фур'є:

$$f(\omega,t)=\sum_{k\in Z}f_k(\omega)e^{ik\omega_0 t}.$$

Тут, очевидно спектральні компоненти $f_k(\omega)$, є перетвореннями Фур'є кореляційних компонентів:

$$f_k(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}B_k(u)e^{-i\omega u}du=\sum_{l\in Z}f_{l-k,l}(\omega-l\omega_0).$$

$B_0(u)$ є кореляційною функцією стаціонарного наближення ПКВП, а спектральний компонент $f_0(\omega)$ представляє залежну від частоти усереднену за часом потужність коливань і є суперпозицією зсунутих по частоті на величину $l\omega_0$ спектральних густин потужності модулюючих процесів.

Математичне сподівання процесу $m(t)$ та її коефіцієнти Фур'є m_k описують властивості детермінованих коливань, тоді як кореляційна функція $b(t,u)$, спектральна густина $f(\omega,t)$, кореляційні компоненти $B_k(u)$ і спектральні компоненти $f_k(\omega)$ – властивості стохастичних коливань.

Дослідження [1, 3–7] показали, що характеристики періодичної нестаціонарності другого порядку, якими є кореляційні та спектральні компоненти вищих порядків, є чутливими до процесів розвитку дефектів у механізмах. Зокрема, спектральні залежності функцій $b(t,u)$ та $f(\omega,t)$, як і залежності кореляційних компонентів від зсуву та спектральних компонентів від частоти є чутливими до розвитку дефектів.

На основі цього підходу був проведений аналіз сигналів вібрації підшипникового вузла декантера методами ПКВП, що дозволило виявити пошкодження, яке проявлялося у вигляді періодичних ударів [4]. Дослідження показали залежність спектрального складу детермінованих періодичних коливань та кореляційно-спектральної структури стохастичної складової від присутності ударів. Зокрема, детерміновані коливання демонстрували підвищену потужність, а їх амплітудний спектр суттєво розширювався аж до 40 гармоніки. Періодичні зміни потужності стохастичної складової також демонстрували суттєве розширення спектру. Показники нестаціонарності першого, і другого порядків підтвердили наявність локального дефекту підшипникового вузла.

Отриманні результати можуть бути використані в подальшому для раннього виявлення дефектів механізмів і встановлення їх типів.

Література

1. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 802 с.

2. Javorskyj I., Matsko I., Yuzefovych R., Lychak O., Lys R. Methods of Hidden Periodicity Discovering for Gearbox Fault Detection. // Sensors. – 2021. – 21. – 6138.

3. Javors'kyj I., Kravets I., Matsko I., Yuzefovych R. Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems // Mechanical system and signal processing. – 2017. – 83. – P. 406–438.

4. Мацько И.Й. Анализ вибрационного сигнала подшипникового узла с развитым дефектом на основании методов статистики периодически коррелированных случайных процессов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2017. – № 2. – С. 23–32.

5. Юзефович Р.М. Пристрої для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх зародження при визначенні технічного стану механізмів / Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, І.Й. Мацько, О.В. Личак, Г.Р. Трохим, О.Ю. Дзерин, І.Г. Стецько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2020. – № 4. – С. 8–16.

6. Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Matsko I. , Semenov P. Evaluation of the mechanism damage using model of vibration signal as a periodically correlated random process // Procedia Structural Integrity. – 2022. – 36. – P. 122–129.

7. Юзефович Р.М. Застосування спеціалізованого пристрою неруйнівного контролю для аналізу вібраційних сигналів підшипникових вузлів методами взаємного нестаціонарного аналізу / Р.М. Юзефович, І.М. Яворський, О.Ю. Дзерин, Г.Р. Трохим, І.Г. Стецько, І.Й. Мацько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2020. – № 1. – С. 17–27.