

УДК 529.376:534.324.422

І.Г. Грабар, д.т.н., проф.
 В.Ф. Запольський, інж.
 В.К. Захаров, н.с.
 М.Б. Кришевський, н.с.
 Ю.І. Тростенюк, с.н.с.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУНКЦІЇ ВІБРОСИГНАЛУ В ТЕХНІЧНІЙ ДІАГНОСТИЦІ МЕХАНІЗМІВ З УДАРНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Повідомлення 2. Методика вибору інформативних частот (масштабних параметрів вейвлет-розкладу функції вібросигналу)

В даному повідомленні пропонується методика вибору інформативних частот, тобто множини частот, на якій будуються діагностичні ознаки технічного стану механізму. Вибір базується на вейвлет-розкладі функції вібросигналу і оцінці енергетичного внеску кожної частоти в цей розклад на проміжку часу дії ударного збудження, ініційованого певним механізмом.

В повідомленні 1 даної роботи [1] обґрунтована доцільність застосування вейвлет-аналізу при діагностиці машин з механізмами ударної дії, зокрема двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Акцентовуємо ще раз увагу на цих висновках.

Коливальний процес механізму можна зобразити у вигляді динамічної системи з n -ступенями вільності:

$$[M][\ddot{x}] + [K][\dot{x}] + [C][x] = [P], \quad (1)$$

де $[M]$, $[K]$, $[C]$ – симетричні $n \times n$ матриці коефіцієнтів інерції, демпфірування і жорсткостей; $[x]$ і $[P]$ – n -мірні вектори координат і діючих сил.

В зоні низьких частот, коли механізм коливається як єдине ціле, його поведінку можна описати одним рівнянням:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = p(t). \quad (2)$$

Для машин роторного типу вхідне збудження (права частина рівнянь (1),(2)) носить, як правило, полігармонічний характер. Внаслідок цього полігармонічний характер має і функція вібросигналу. Виникнення чи розвиток дефекту в таких машинах спричиняє до трансформації полігармонійного вібросигналу знову ж таки в полігармонійний. В результаті такої трансформації амплітуди деяких частотних складових вібросигналу змінюються, чи з'являються нові складові. Такі частоти називаються інформативними і використовуються для створення діагностичних ознак машини чи механізму.

Таким чином, для аналізу подібних вібросигналів достатньо подати їх в частотній області [2]–[4]. На відміну від цього нестационарні сигнали, зокрема сигнали з ударними імпульсами, потребують аналізу в частотно-часовій області. Віконна технологія Фур'є-розкладу, що традиційно використовувалась для такого аналізу, не забезпечує достатньо достовірного визначення енергетичних внесків в сигнал окремих частотних складових в широкому діапазоні частот. Основною причиною цього є нелокальність на осі часу гармонік – базових функцій Фур'є-розкладу [1].

Здається фізично очевидним використовувати при аналізі сигналу, що є композицією затухаючих, локальних в часі коливальних, базисні функції, які мають такі ж локальні властивості.

Тобто дослідження нестационарних сигналів потребує використання деяких локалізованих в часі компактних хвиль, коефіцієнти розкладу по яких зберігають інформацію про еволюцію параметрів функції, яка апроксимується.

Першою досить вдалою спробою в реалізації цієї ідеї можна вважати використання примітивів – модульованих гаусіанів [Dennis Gabor, 1947].

Проте тільки в 90-х роках була створена математично коректна теорія і побудовано цілий клас відповідних базисів простору L^2 , що задовольняють вимогам аналізу нестационарних сигналів – вейвлет-аналізу функцій [5], [6].

Як відомо, інформація, яку містить вібросигнал, має надлишковий характер. Для формування діагностичних ознак використовується тільки частина цієї інформації. Селекція корисної для діагностичних цілей інформації вібросигналу, як правило, передбачає вибір ряду інформативних частот для кожного механізму. Традиційні методи вибору інформативних частот [3] базуються на розрахунках, аналізі конструкції механізму, тестових експериментах з визначення таких частот та характеристик каналу проходження сигналу. Такий вибір інформативних частот носить *апріорний характер*, він передує аналізу вібросигналу. Особливістю методики, яка пропонується в даній роботі, є *апостеріорний характер* вибору інформативних частот, оскільки цей вибір є результатом аналізу вібросигналу. Такий підхід значно спрощує адаптацію діагностичної системи до різних видів об'єктів, які діагностуються. Це особливо важливо для різнотипних машин масового поширення (наприклад, автомобілів).

Така методика можлива лише за умови достовірного визначення енергетичних внесків частотних складових в загальну функцію сигналу, що і забезпечує використання вейвлет-аналізу.

Зауважимо, що термін "частота", як більш прийнятий в техніці, ми часто використовуємо замість термінів "характерний розмір вейвлет-функції, значення масштабуючого коефіцієнта", маючи на увазі існуючу відповідність між цими поняттями [1].

При розробці методики вибору інформативних частот механізмів ударної дії, зокрема ДВЗ, приймалися деякі припущення, які можна сформулювати наступними основними гіпотезами:

1. Вся діагностична інформація даного механізму ДВЗ зосереджена на невеликому часовому проміжку дії ударного імпульсу, ініційованого цим механізмом.

2. Для ударного імпульсу певного механізму можна виділити скінченну множину частот (масштабних параметрів вейвлет-перетворення), які повністю характеризують цей імпульс і роботу механізму на даний час спостереження. Цю множину частот будемо називати *характерним частотним наповненням* ударного імпульсу механізму. З точки зору аналізу сигналу, ця гіпотеза означає, що заміна реального ударного імпульсу на синтезований імпульс на базі вибраної множини частот не шкодить прийняттю правильного діагнозу механізму. Відносно масштабу часу ця гіпотеза припускає інваріантність характерного частотного наповнення імпульсу на часовому інтервалі прийняття рішення (час запису вібросигналу, незначний відрізок часу експлуатації механізму), але допускає зміну частотного наповнення вібросигналу механізму протягом тривалого часу його експлуатації.

3. Розвиток непараметричних дефектів даного механізму не змінює його характерного частотного наповнення. Це означає, що для механізмів, дефекти яких проявляються непараметрично, достатньо одноразового визначення їх характерного частотного наповнення.

4. Розвиток параметричних дефектів може змінювати характерне частотне наповнення ударного імпульсу даного механізму.

5. Для кожного механізму ДВЗ існує така скінченна множина частот (значень масштабних параметрів вейвлет-перетворення), що для довільного часу спостереження під час експлуатації ця множина містить в собі характерне частотне наповнення імпульсу даного механізму. Фактично ця гіпотеза може означати, що існує така скінченна шкала масштабів вейвлет-перетворення функцій сигналу, якої достатньо для діагностування даного механізму на будь-якому етапі його функціонування.

Позначимо множину частотного наповнення

$$H = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}, \quad (3)$$

і розглянемо методику її визначення.

На рис. 1 показано тривимірне зображення вейвлет-перетворення вібросигналу, одержаного на двигуні автомобіля ВАЗ 2107, де величина коефіцієнтів перетворення $W(t, a)$ виражається висотою рельєфу.

На цьому рисунку чітко видно хребти рельєфу коефіцієнтів $W(t, a)$, які відповідають ударним імпульсам вібросигналу. Локальні піки рельєфу (локальні максимуми коефіцієнтів $W(t, a)$) фактично несуть всю інформацію про задану функцію сигналу. Зображення на площині (t, a) ліній, які відповідають локальним максимумам коефіцієнтів $W(t, a)$, називається скелетом максимумів коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

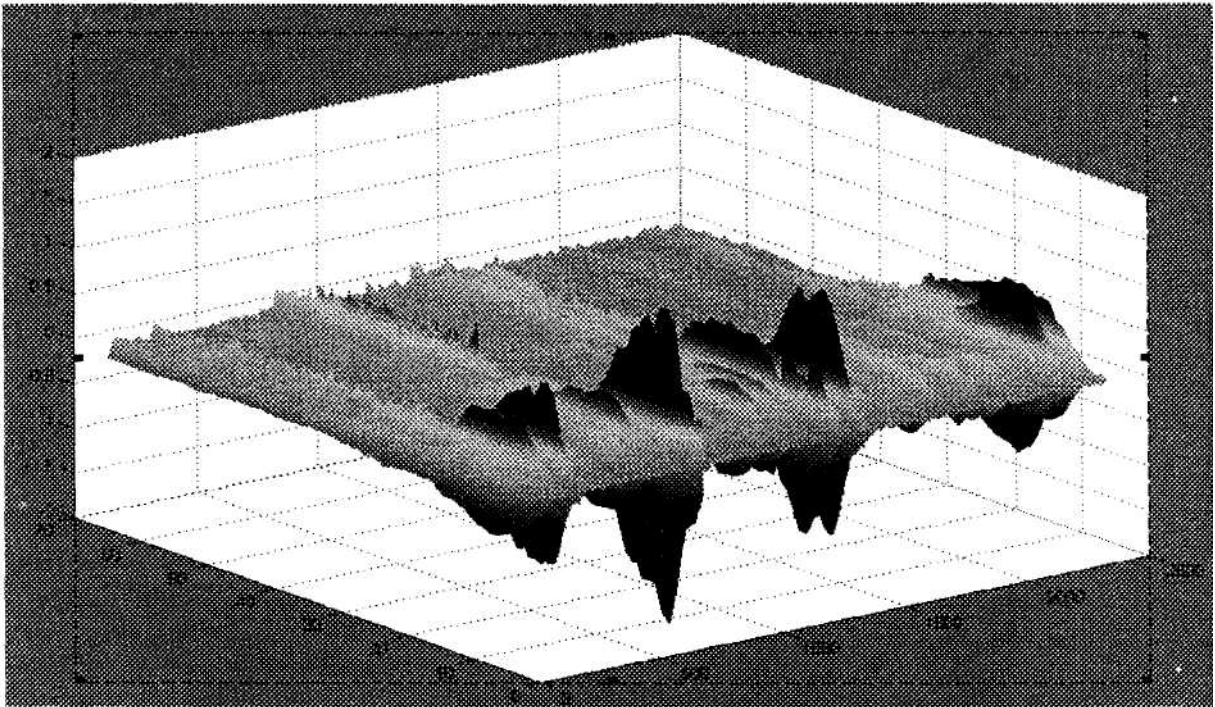


Рис. 1. Тривимірне зображення коефіцієнтів розкладу вібросигналу

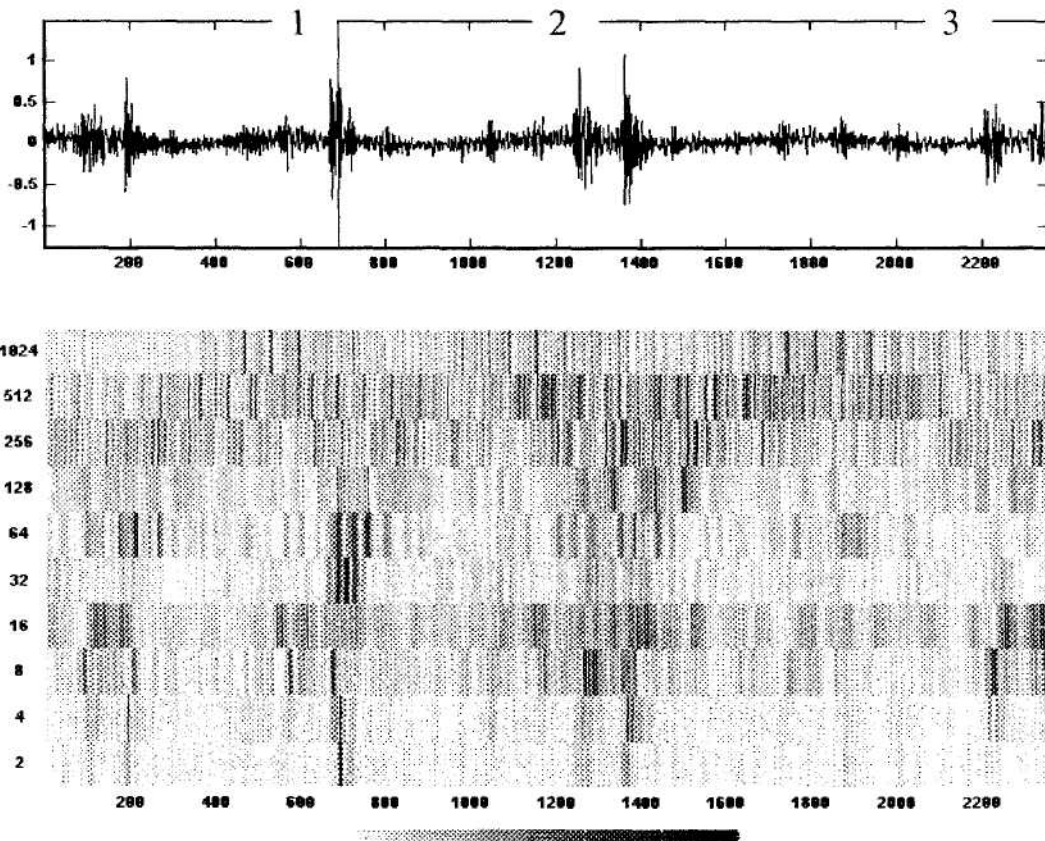


Рис. 2. Дискретне вейвлет-перетворення вібросигналу двигуна ВАЗ 2107

Лінії скелета коефіцієнтів використовуються для вибору частот характерного частотного наповнення H (3). А саме, для того щоб частота ω_i належала множині H даного механізму необхідно (але недостатньо), щоб функція $W(t, a_i)$ мала локальний максимум на інтервалі дії ударного імпульсу цього механізму.

Для ілюстрації інших умов, які визначають приналежність частоти ω_i до характерного частотного наповнення даного механізму, розглянемо рис. 2, де зображено дискретне вейвлет-перетворення віброцигналу, який одержано від датчика, встановленого на двигуні ВАЗ 2107.

В таблиці коефіцієнтів вейвлет-перетворення $W(t, a)$ (рис. 2) горизонтальна вісь відповідає часу t , а вертикальна – значенню масштабного параметра a , який пропорційний періоду T локалізації вейвлет-функції, тобто відповідає деякій частоті розкладу ω . Таким чином, вищим рівням таблиці рис. 2 відповідає менша частота. Величина $W(t, a)$ виражається інтенсивністю забарвлення. Можна вважати, що горизонтальні перерізи відповідають еволюції функції на даній частоті, а вертикальні – спектру віброцигналу в даний момент відліку часу. Оскільки кожному значенню a відповідає певна частота ($a_i \sim \omega_i$), надалі не будемо робити різниці між виразом $H = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ і (3).

На рис. 2 видно, що частоти, які відповідають різним значенням параметра a , по-різному "проявляються" на часових інтервалах, відповідних різним ударним імпульсам. Так частота ω при $a = 32$ чітко виражена в зоні дії імпульсу 1 і слабо виражена в зонах дії інших імпульсів. Цілком природно було б віднести її до множини частот, які характеризують імпульс 1. Але більше значення коефіцієнтів $W(t, 32)$ в зоні дії імпульсу 1 порівняно з імпульсом 3 може бути обумовлене загальним рівнем цих сигналів. Тому будемо користуватись відносною енергетичною характеристикою. А саме: частота ω_i буде належати до характерного частотного наповнення даного імпульсу, якщо її енергетичний вклад, віднесений до загальної енергії імпульсу в зоні його дії, більший за деяке порогове значення ε_i . Для оцінки цього вкладу будемо користуватись величиною

$$e_i = \frac{\int u_{a_i}^2 dt}{\int u^2 dt}, \text{ де } u - \text{функція сигналу. Тобто вимагаємо виконання умови } e_i \geq \varepsilon_i.$$

При такому проріджуванні з порогом ε_i множини частот ω_i може випасти з розгляду частота, енергетичний вклад якої в імпульсі незначний (на початку експлуатації, наприклад), але ця частота характерна лише для даного імпульсу. Наприклад, ця частота обумовлена деяким дефектом механізму і, з його розвитком, її енергетичний вклад в імпульс буде рости. Тому введемо ще поріг значимості z і будемо включати в множину H частоту ω_i , якщо її енергетичний вклад e_i більший в z разів за енергетичні вклади цієї частоти для інших механізмів, незалежно виконується чи ні умова $e_i \geq \varepsilon_i$. Тепер остаточно запишемо умови включення частоти ω_i в характерне частотне наповнення ударного імпульсу k -того механізму:

$$\omega_i \in H_k \Leftrightarrow \begin{cases} 1. W(t, a_i) \text{ має локальний максимум на } \theta_k \\ 2. (e_{ik} \geq \varepsilon_i) \vee \left(\frac{e_{ik}}{e_{ij}} > z, \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \text{ і } j \neq k \right), \end{cases}$$

$$\text{де } e_{ik} = \frac{\int_{\theta_k} |u_{a_i}|^2 dt}{\int_{\theta_k} |u|^2 dt}, \tag{4}$$

де індекси k, j – означають номер механізму; індекс i відповідає частоті ω_i (i -тий рядок матриці коефіцієнтів $W(t, a_i)$ вейвлет-розкладу); $\theta_k = (t_{1k}, t_{2k})$ – інтервал дії ударного імпульсу k -того механізму; n – кількість механізмів; u_{a_i} – сигнал, синтезований з $W(t, a_i)$.

Процес визначення H_k за (4) можна автоматизувати з використанням ПК. Проілюструємо роботу такого алгоритму. В результаті роботи алгоритму за вейвлет-розкладом для ударних імпульсів 1 і 2 (рис. 2) були сформовані множини H_1 і H_2 . На рис. 3 представлені деякі з графіків коефіцієнтів $W(t, a_i)$, для a_i (частот ω_i), які включені алгоритмом в H_1 і H_2 . Частоти, що відповідають графікам b і v , включені в H_1 , а g і d – в H_2 .

Після 35000 км пробігу автомобіля ВАЗ 2107, на якому проводилось визначення H_1 і H_2 , було повторно проведено визначення цих множин з додержанням співпадання параметрів вейвлет-перетворення (вибір вейвлет-функції, шаг дискретизації сигналу, шкала значень параметра a). Множини значень частот H_1 і H_2 для вузлів 1 і 2 до і після вказаного інтервалу експлуатації

автомобіля співпали. На рис. 4 наведено графіки коефіцієнтів $W(t, a_i)$ при тих же значеннях параметрів a_i , але після експлуатації автомобіля на базі 35000 км пробігу.

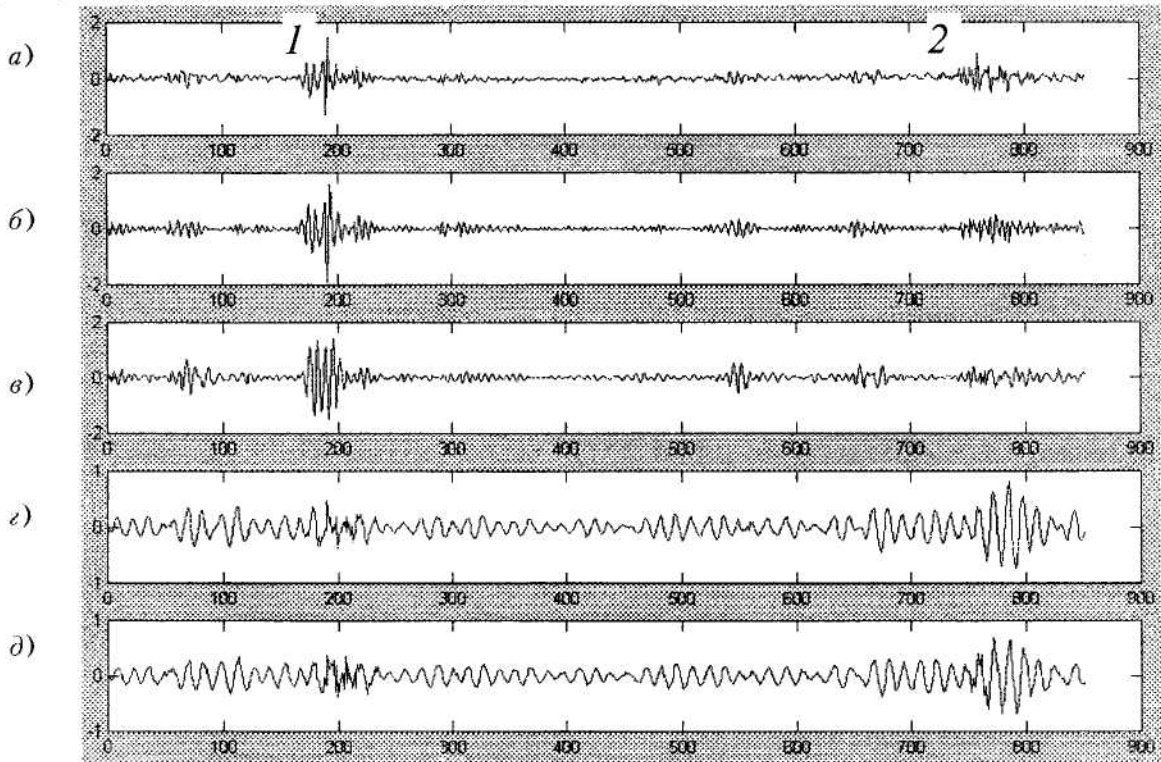


Рис. 3. Графіки коефіцієнтів розкладу $W(t, a_i)$ для деяких a_i , що включені алгоритмом 4 в характерне частотне наповнення ударних імпульсів 1 і 2:

а) фрагмент вібросигналу; б) $W(t, 3.5)$; в) $W(t, 5)$; г) $W(t, 11)$; д) $W(t, 12)$

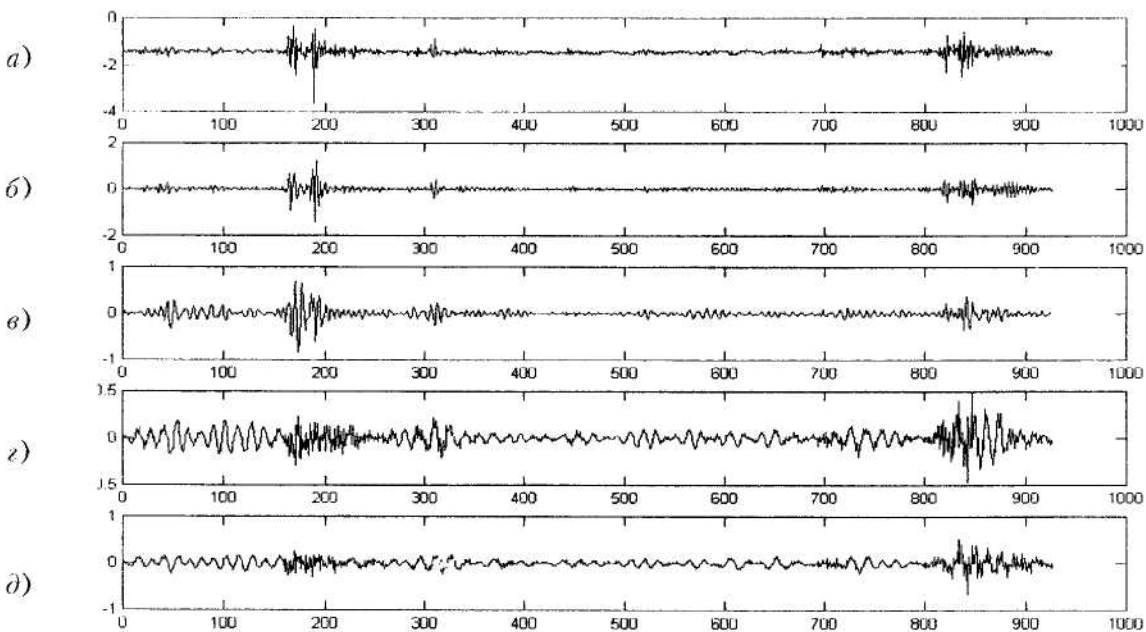


Рис. 4. Графіки $W(t, a_i)$ відповідні графікам рис. 3 після експлуатації автомобіля ВАЗ 2107 на базі 35000 км

Порівнюючи рис. 3 і рис. 4 візуально видно, що частоти ω_j , які були характерними для вузлів 1 і 2 залишились такими ж характерними і після збільшення пробігу автомобіля.

Початкове визначення H_k проводиться на бездефектному механізмі або на серії механізмів даного типу ДВЗ.

Функціональна діагностика з використанням даної методики передбачає визначення за алгоритмом (4) множини H_k для кожного k -того механізму ДВЗ.

Методика включає новий підхід до виділення інформативної для діагностичних цілей складової сигналу, що базується на апостеріорному виборі характерного частотного наповнення ударного імпульсу. Цей підхід обумовлений можливостями вейвлет-аналізу робити достовірний розклад сигналу за енергетичними вкладками частотних компонент як в області низьких, так і високих частот на незначному проміжку дії ударного імпульсу.

Характерно, що такий вибір інформативних частот не передбачає умови лінійності зв'язку між впливами сил збудження і формою вібросигналу, що дозволяє поширити цей метод на нелінійні процеси.

Характерною особливістю нелінійних систем є нелінійний функціональний зв'язок між вхідним збудженням $p(t)$ і реакцією системи на виході $x(t)$: $x(t) = f[p(t), t]$. В механічних системах нелінійність виявляється в залежностях поновлюючих сил $c(x)$ від координат x і (або) сил опору $k(\dot{x})$ від швидкостей. В нелінійних системах результат одночасної дії кількох збуджень не буде суперпозицією результатів кожного з цих збуджень. Збільшення інтенсивності збудження може призвести не тільки до збільшення інтенсивності відгуку системи (загальної амплітуди вібросигналу), а й до перерозподілу енергетичних внесків різних частотних компонент вібросигналу.

Якщо позначити через $\{\omega_j\}$ множину частот спектра функції $p(t)$, то множину частот спектра функції $x(t)$ на виході нелінійної механічної системи можна описати, як відомо, таким чином:

$$\{\omega_i\}_x = \{n_1\omega_1 + n_2\omega_2 + \dots + n_j\omega_j + \dots + n_m\omega_m \dots\}, \quad (5)$$

де $n_j = \pm 0, 1, 2, \dots$, і $|n_1| + |n_2| + \dots + |n_m| + \dots = N$, а N – порядок комбінаційних частот (характеристика нелінійності системи).

Таким чином, при діагностуванні реального механізму множина частот вібросигналу буде містити, як мінімум, всі комбінаційні частоти, одержані з власних частот вузлів, що розміщені по каналу проходження сигналу. Ця множина частот досить значна. Зменшення її шляхом встановлення датчика вібрацій безпосередньо на вузлі (наприклад, гільзі циліндра ДВЗ) не завжди буває можливим. Труднощі діагностування таких систем обумовлені ще й неточним, як правило, характером визначення власних частот і частот $\{\omega_j\}$.

Тому розглянутий апостеріорний пошук ряду інформативних частот, оснований на алгоритмі 4 (чи інших алгоритмах знаходження характерного частотного наповнення ударного імпульсу), є виправданим шляхом при аналізі складних нелінійних динамічних систем.

У наступному повідомленні цієї роботи буде розглянуто деякі можливості використання множини H_k при аналізі вібросигналу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Грабар І.Г., Запольський В.Ф., Кришевський М.Б., Тростенюк Ю.І. Застосування вейвлет-перетворення функції вібросигналу в технічній діагностиці механізмів з ударними навантаженнями. Повідомлення 1. Об'єктивні передумови застосування вейвлет-аналізу вібросигналів // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № 20. – С. 23–27.
2. Александров А.А., Барков А.В., Баркова Н.А., Шафранский В.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1986.
3. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984.
4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987.
5. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Успехи физических наук. – 1996. – Том. 166. – № 11.

6. Meyer Y. "Wavelets": Algorithms and Applications. SIAM, 1993.

ГРАБАР Іван Григорович – доктор технічних наук, професор, перший проректор, проректор з наукової роботи Житомирського інженерно-технологічного інституту, завідувач кафедри автомобілів і механіки технічних систем.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- нелінійні явища та моделі;
- синергетика;
- нові технології, прискорені сертифікаційні дослідження в умовах складного температурного навантаження.

ЗАПОЛЬСЬКИЙ Віталій Францович – інженер-програміст відділу комп'ютерних мереж Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- моделювання динамічних систем, системи CADAR, CAD.

ЗАХАРОВ Валентин Костянтинович – науковий співробітник кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- застосування математичних методів обробки інформації в діагностиці технічного стану механізмів.

КРИШЕВСЬКИЙ Микола Борисович – науковий співробітник кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- застосування математичних методів обробки інформації в діагностиці технічного стану механізмів.

ТРОСТЕНЮК Юрій Іванович – старший науковий співробітник кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- міцність конструкцій;
- застосування математичних методів обробки інформації в діагностиці технічного стану механізмів.

Подано 20.09.2002