

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

Житомирський інженерно-технологічний інститут

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

Повідомлення 1. Об'єктивні передумови застосування вейвлет-аналізу вібросигналів

В даному повідомленні наведено аналіз недоліків дискретного перетворення Фур'є для діагностичної оцінки вібросигналу, вся діагностична інформація якого міститься на незначних проміжках дії ударних імпульсів, ініційованих роботою окремих механізмів. Обґрунтована доцільність застосування вейвлет-перетворення функцій вібросигналу при технічній діагностиці таких механізмів.

Впровадження засобів діагностування є одним із важливих факторів зростання економічної ефективності використання машин і механізмів. Технічна діагностика розв'язує задачі розпізнавання станів технічної системи, визначення причин втрати її роботоспроможності, встановлення виду і місця дефекту, а також прогнозування його розвитку.

Тому сьогодні у світовій практиці бурхливий розвиток отримало вібродіагностування, яке базується на аналізі вібросигналу працюючого механізму як універсального джерела інформаційних параметрів.

Це обумовлено такими причинами:

- вібросигнал універсальний, тобто він відгукується на зміни практично будь-якого параметру, який характеризує стан механізму;
- вібросигнал малоінерційний і майже зразу реагує на зміни стану системи;
- вібросигнал у найбільшій мірі відображає динамічні, силові навантаження, які є основними причинами руйнування механізмів і машин;
- вібродіагностування не передбачає, в основному, розбирання та зупинок обладнання.

Традиційно під час діагностичного аналізу вібросигналу застосовувались математичні методи статистичного аналізу та спектрального аналізу, який базується на Фур'є-перетворенні функцій сигналу[1], [2].

Найбільш поширені схеми спектральної вібродіагностики містять таку послідовність дій:

1. На основі аналітичних розрахунків, математичного моделювання, чи експериментальних даних вибирається множина частот, яка характеризує роботу даного механізму і розвиток його дефектів. Ці частоти називаються інформативними і можуть містити власні частоти механізму, частоти збудження та комбінаційні частоти.

2. За допомогою Фур'є-розкладу функції вібросигналу оцінюються енергетичні внески інформативних частот у загальний сигнал.

3. Ці енергетичні внески множини інформативних частот використовуються для постановки діагнозу у розвитку дефекту певного механізму за критеріями, одержаними внаслідок аналізу математичної моделі чи статистичного аналізу експериментальних даних.

Така схема дозволяє задовільно проводити діагностику технічного стану машин роторного типу. Проте її застосування для діагностики машин з механізмами зворотно-поступальної дії пов'язане зі значними труднощами, які виявляються як у виборі інформативних частот, так і в оцінці їх енергетичних внесків у функцію вібросигналу. Розглянемо причини цих ускладнень на прикладі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Робочі процеси ДВЗ супроводжуються силовим збудженням елементів конструкції, яке умовно поділяється за природою на збудження від детонації палива і від інерційних сил елементів кривошипно-шатунного механізму. Якщо розкласти силу тиску газу на поршень на складові в напрямку шатуну і в напрямку, перпендикулярному руху поршня, то остання, за наявності зазору між поршнем і гільзою циліндра, викликає боковий удар поблизу верхньої мертвої точки (ВМТ). За один оберт колінчастого валу для даної циліндро-

поршневої групи (ЦПГ) виникає 4 ударних імпульси через зміну знака сил інерції для кожного поршня. Робота ДВЗ супроводжується ударами під час відкриття і закриття клапанів газорозподільного механізму, ударами в шатунних і корінних підшипниках і т.п. У системах і вузлах ДВЗ проходять швидкозмінні нестационарні процеси, що пов'язано з особливостями циклу двигуна, які виражаються у відносно малій тривалості ударних навантажень кожного вузла порівняно із загальною тривалістю циклу.

Таким чином, ДВЗ у процесі роботи можна розглядати як джерело ударних імпульсів. Ці імпульси є відгуками системи на послідовність ударних збуджень, спричинених взаємодією вузлів ДВЗ під час роботи. На рис. 1 показано фрагмент вібросигналу ДВЗ.

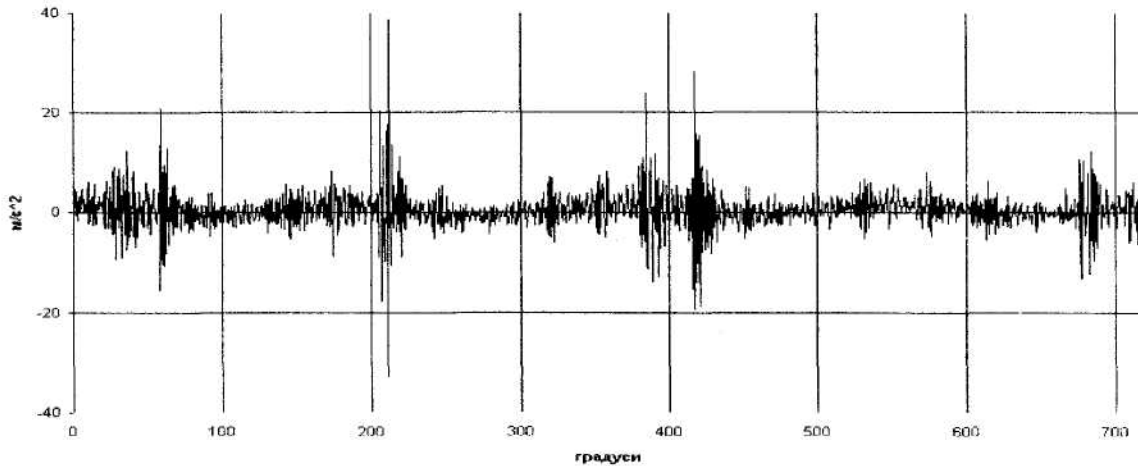


Рис. 1. Фрагмент вібросигналу чотирьохтактного ДВЗ за робочий цикл

На цих фрагментах вібросигналу чітко видно, на фоні шумових компонент, короточасні ударні імпульси, які відповідають ударним навантаженням механізмів ДВЗ.

Одержувати діагностичну інформацію з вібросигналу рис. 1 можна шляхом його Фур'є-розкладу на цілому робочому циклі ДВЗ, або на його незначній частині, яка відповідає ударному імпульсу певного механізму.

Розглянемо першу можливість. Поширена при діагностуванні машин роторного типу полігармонічна модель вібросигналу [2]

$$u(t) = \sum_k a_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_r) \quad (1)$$

несумісна з дійсним характером коливального процесу ДВЗ. Але модель (1) дає найбільш достовірну інтерпретацію при Фур'є-аналізі.

Для коливальних процесів ДВЗ характерна досить велика повторюваність процесу фази газорозподілу, при значних відхиленнях амплітуд у кожній фазі; таким чином, спостерігається велика дисперсія амплітуд і мала дисперсія початкових фаз основних імпульсних компонент вібраційного процесу, обумовленого ударними навантаженнями взаємодіючих елементів двигуна.

Тобто найбільш прийнятною моделлю формалізації цього процесу при Фур'є-аналізі є амплітудно-імпульсна модуляція вібросигналу.

Для періодичної послідовності імпульсів однієї форми, які мають однакову тривалість τ , випадкову амплітуду з середнім значенням a і дисперсією σ , енергетичний спектр має вигляд [3]:

$$S(\omega) = \frac{2}{T} |g(\omega\tau)|^2 \left\{ \sigma^2 + \frac{4\pi a^2}{T} \sum_{r=0}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \right\}, \quad (2)$$

де $|g(\omega\tau)|^2$ – спектр поодинокого імпульсу заданої форми, T – інтервал між імпульсами.

Таким чином, спектр амплітудно-модульованої послідовності імпульсів складається з дискретних ліній з огинаючою $|g(\omega\tau)|^2$ і неперервної частини з тією ж огинаючою. З (2) видно, що виділити енергетичний внесок окремої частоти (наприклад, власної), яка відповідає ударному імпульсу певного механізму практично неможливо, що обумовлено ще й тим, що реальний сигнал

не відповідає моделі (2). Так, на інтервалі спостереження ударні імпульси неперіодичні і мають різну тривалість, тому що вони відповідають ударним навантаженням різних механізмів ДВЗ. Встановлення вібродатчиків безпосередньо на кожному вузлі та збільшення інтервалу спостереження не вирішує повністю проблеми, та й не відповідає принципам функціональної безрозбірної діагностики. Крім того, при частотній селекції сигналу, наприклад за частотою власних коливань вибраного вузла, буде вноситись похибка при визначенні діагностичного параметра, внаслідок збудження коливань на цій частоті при ударних навантаженнях в інших вузлах, хоча ці удари виникли і в інший проміжок часу, але в межах фрагменту сигналу, який аналізується. Тому було б доцільно проводити як частотну, так і часову селекцію сигналу.

Таким чином, практично неможливо зробити енергетичну оцінку множини інформативних частот вібросигналу на базі часового інтервалу, який відповідає робочому циклу ДВЗ, що обумовлено глобальною чутливістю Фур'є-перетворення до локальних стрибків і піків функції.

Розглянемо тепер можливість одержання діагностичної інформації внаслідок Фур'є-перетворення вібросигналу на відрізку часу дії окремого ударного імпульсу.

Недоліком Фур'є-аналізу є те, що частотні компоненти не можуть бути локалізовані в часі. Спектр поодинокого імпульсу, внаслідок принципу невизначеності (локальність імпульсу в часі призводить до розмитості його зображення на осі частот), має форму, яка важко піддається інтерпретації. З рис. 2 видно, що спектр ударного імпульсу має значимі компоненти в широкому діапазоні частот.

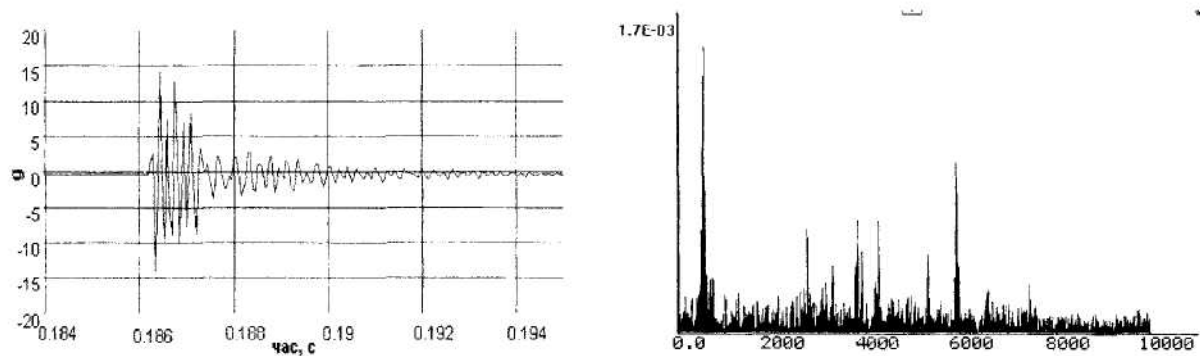


Рис. 2. Фур'є-перетворення ударного імпульсу

При дискретному перетворенні Фур'є-зменшення часового інтервалу призводить як до збільшення дискретності за частотою, так і до зростання спотворюючого впливу граничних ефектів. Внаслідок перелічених вище недоліків, Фур'є-аналіз не забезпечує достатньої достовірності енергетичного внеску високочастотних компонент коливань на коротких часових інтервалах. Модифікація розкладу Фур'є – віконне перетворення Фур'є, дозволяє проаналізувати лише високі частоти в малому проміжку часу (за умови, що сигнал на цьому проміжку стаціонарний), або низькочастотну компоненту, але не обидва коливання одночасно.

При орієнтації на часові проміжки дії ударних імпульсів необхідно проводити Фур'є-розклад стільки разів, скільки є механізмів, які діагностуються. Значно раціональнішим є, звичайно, перетворення вібросигналу на робочому циклі ДВЗ, який містить ударні імпульси всіх механізмів.

Таким чином функціональна діагностика ДВЗ на основі Фур'є-аналізу вібросигналу пов'язана зі значними труднощами, які виражаються в необхідності залучення висококваліфікованих спеціалістів, використання складних комбінованих діагностичних ознак і алгоритмів, використання поряд з Фур'є-аналізом статистичних методів аналізу сигналу. Тому актуальним є завдання пошуку альтернативних методів аналізу вібросигналу.

Метод аналізу вібросигналу, викликаного ударними навантаженнями, повинен, як мінімум, мати такі можливості: фазочастотне перетворення сигналу, локалізованого на незначному проміжку часу, можливість аналізу нестационарного сигналу, очищення його від шумових компонент у локальному часовому інтервалі, визначення енергетичних оцінок сигналу вздовж осі часу і за частотними компонентами і т.п.

Найбільш придатним для цих цілей є новий метод обробки інформації, відомий як вейвлет-аналіз (сплеск-аналіз). Спочатку застосований, в основному, для стиску інформації, реставрації

"зашумлених" зображень, аналізу особливостей нелінійних, нестационарних процесів, фрактальних середовищ, вейвлет-аналіз все більше поширюється в сферу технічних застосувань.

Особливості вейвлет-аналізу розглянемо на прикладі неперервного вейвлет-перетворення [4], [5].

Неперервне вейвлет-перетворення функції (сигналу) $f(t)$ формально аналогічне Фур'є-перетворенню $\tilde{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$, і виконується за формулою:

$$W(x, T) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-x}{T}\right) f(t) dt \tag{3}$$

Неперервний базис вейвлет-перетворення утворений трансляцією вздовж осі часу і масштабуванням функції $\psi(t)$, яка називається "малою хвилею", або вейвлетом; $\psi(t)$ (як і $f(t)$) має скінченну енергію (належить до простору L^2).

Середнє значення $\psi(t)$ дорівнює нулю, тобто $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$.

На відміну від гармонічного базису Фур'є $\psi(t)$ локалізована на осі t : $\psi(t) \rightarrow 0$, коли $t \rightarrow \pm \infty$.

Результат вейвлет-перетворення W залежить від двох змінних – дрейфової x і масштабної T . Якщо розглядати $f(t)$ як сигнал, то обидві ці змінні мають розмірність часу. Величина $W(x, T)$ показує наскільки характерний період T (чи частота T^{-1}) присутній у сигналі в околі моменту часу x .

Спектр вейвлет-функції складається з множини частот, яка локалізована навколо певної частоти ω_0 , (рис. 3).

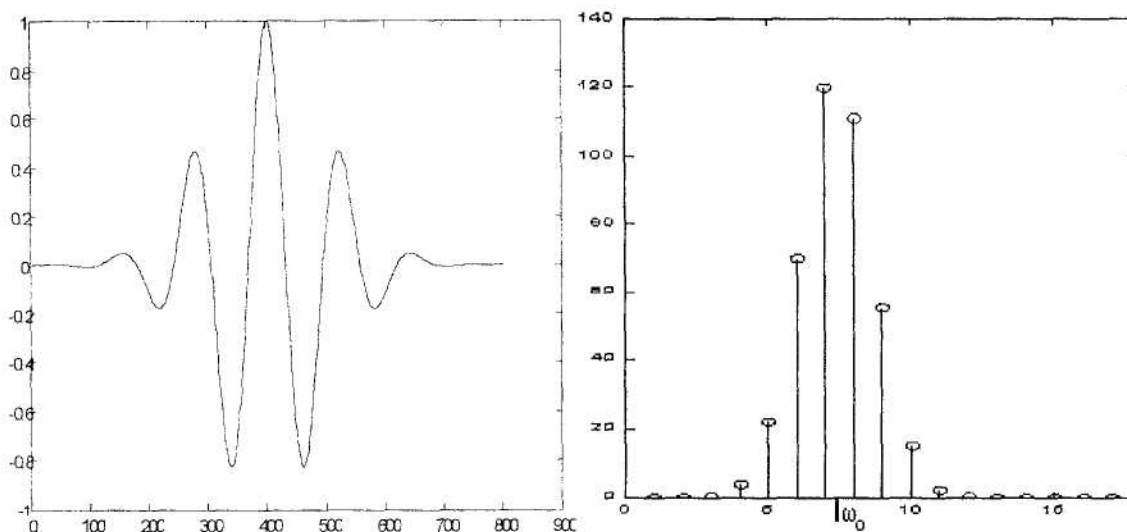


Рис. 3. Фур'є-перетворення вейвлет-функції Морле

Тільки за такого змісту можна говорити про відповідність масштабного параметра T гармонічній частоті ω_0 .

Таким чином $W(x, T)$ містить одночасно інформацію про часові та частотні властивості сигналу, що дозволяє аналізувати сигнал більш детально, ніж з допомогою Фур'є аналізу.

Вейвлет-розклад функції вібросигналу на часовому інтервалі повного робочого циклу ДВЗ дозволяє одержувати достовірну інформацію про частотне наповнення всіх ударних імпульсів, які відповідають дії різних механізмів.

Основна відмінність вейвлет-аналізу від розкладу Фур'є в тому, що базисні функції вейвлет-перетворення локалізовані на осі часу, що, при застосуванні до вібросигналу, дозволяє для різних часових інтервалів отримувати різне частотне наповнення сигналу. Від техніки віконного Фур'є-аналізу вейвлет-аналіз відрізняється тим, що для різних діапазонів частот використовуються вікна різної тривалості.

Ці особливості вейвлет-перетворення обумовили його застосування до аналізу нестационарних сигналів (тобто таких, в яких статистичні характеристики змінюються з часом), тому закономірною є спроба застосування техніки вейвлет-перетворення для аналізу вібросигналу, отриманого внаслідок ударних збуджень, ініційованих роботою механізмів ДВЗ.

Як буде показано в наступних повідомленнях цієї роботи, вейвлет-перетворення відкриває деякі принципово нові можливості у створенні методики діагностики механізмів з ударними навантаженнями.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Александров А.А., Барков А.В., Баркова П.А., Шафранский В.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1986.
2. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984.
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987.
4. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – № 11. – Т. 166.
5. У.Мейер. "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.

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.