

УДК 517.91

Ю. І. Шалапко

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ СИСТЕМ З СУХИМ ТЕРТЯМ ТА ФРЕТИНГ-КОРОЗИЄЮ

Анотація: В роботі досліджують можливості математичної обробки часових рядів за допомогою вейвлет-аналізу. На відмінність від традиційного Фур'є-аналізу, запропонований метод дає можливість розглядати масштабно-інваріантну динаміку нестационарних процесів, наприклад, діагностувати номінально-нерухомі з'єднання, ущільнення, демпфери та ізолятори в авіаційній техніці.

Вступ

Забезпечення надійності та довговічності авіаційної техніки пов'язано з необхідністю керування якістю окремих вузлів та елементів їх інтерфейсу, наприклад трубопроводи, муфти, ущільнення, ніпелі, електричні контакти і т.д. В багатьох випадках в умовах вібраційного навантаження на поверхнях, що контактують із-за мікропереміщень виникають явища фретинг-корозії, яка з часом переходить до більш негативних ефектів фретинг-зношування та фретинг-втоми. Особливістю малих мікропереміщень або малоамплітудного фретингу (2...20 мкм), є їх латентний, тобто прихований характер, що, зрозуміло, важко спрогнозувати і визначити подальший стан вузла та його елементів. Існуюча система параметричного контролю та діагностування (СПКД) авіаційної техніки призначена для оцінювання технічного стану в процесі експлуатації, знаходження та попередження відмов двигуна та його основних функціональних систем в польоті. Вона дозволяє виконувати оперативну оцінку функціональних систем, віброактивність двигуна на всіх режимах його роботи, та здійснювати аналіз часових трендів різних параметрів [1]. Однак, не завжди кількість коштів, які виділяються на комп'ютеризацію виробництва та експлуатацію авіаційної техніки приносить запланований результат. Тому слід підвищувати загальний вигляд рівень математичної підготовки інженерів-систематехніків, шукати нові підходи до аналізу вихідних даних з використанням можливостей інформаційних технологій [2]. Найбільша кількість невирішених діагностичних та еволюційних задач визначається складністю аналізу властивостей сил по середньочастотній вібрації. Особливо це стосується сил швидкості проковзування [4]. При таких частотах порівняно такий же вклад дають періодичні, випадкові та ударні сили, а коливальна система має більшу кількість резонансів достатньо високої добротності. Складності аналізу середньочастотної вібрації обмежують можливості діагностики компактних машин великої питомої потужності таких, як авіаційні двигуни, в яких із-за недоступності к багатьом вуз-

лам для прямого вимірювання високочастотні вібрації, неможливо отримати діагностичну інформацію про початок розвитку дефектів. Останнім часом все більше використання знаходять метод синергетики в нелінійних системах різної природи за допомогою універсальних уяв та моделей [3].

Великі перспективи у вирішенні кількісного аналізу складних вібросигналів, які містять імпульсні компоненти, може дати використання методів вейвлет-аналізу сигналів. Дослідження останніх років доводять, що в складних нелінійних системах має місце масштабна інваріантність (фрактальність) просторових та часових властивостей [5]. Таке поняття про фрактальний характер подібних ефектів також пояснює підвищену увагу до вейвлет-аналізу часових рядів вимірів характеристик об'єкту [6].

Рушійною силою коливань в номінально-нерухомих з'єднаннях є сили контактної та дифракційної взаємодії в інтерфейсі. Як правило, при малих відносних переміщеннях в контактні реалізується режим „зчеплення-проковзування”, динамічна характеристика якого відповідає за деформаційні та фрикційні явища. Так, час відносного зчеплення характеризується мопеднім зміцненням, тангенціальною жорсткістю та деформацією. Час проковзування характеризує імпульсні зміни швидкості, розсіювання енергії, зношування.

Режими „зчеплення-проковзування” фрикційного осцилятора досліджувалися теоретично та експериментально з 30-х років минулого століття [7], і продовжуються до сьогодення часу [8, 9]. Однак, на даний момент існує тільки лише декілька робіт по використанню вейвлет-перетворення сигналів від об'єктів з тертям. В роботах [10, 11] вейвлет-аналіз використовувався для виявлення динамічних характеристик підсистеми, яка відповідає за процеси переходу від зчеплення до проковзування при великих амплітудах (1...6 мм) і малих частотах (0,3...2,5 Гц). А в роботі [12] автори використовували вейвлет-перетворення для пошуку присутності режиму „зчеплення-проковзування” в гранульованих середовищах. Досліджень вібраційних систем, які наближаються до умов фретин-

гу, з використанням вейвлет-аналізу не проводилось.

часовий процес $y(t)$ можна розкласти в ряд Фур'є, а саме представити сумою гармонічних коливань з частотами, які кратні $\omega = \frac{2\pi}{T}$:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n \exp(in\omega t). \quad (2)$$

Коефіцієнт c_n визначається:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \exp(-in\omega t) dt. \quad (3)$$

Рівняння (2) і (3) уявляють собою пряме і зворотнє ПФ сигналу $y(t)$.

На практиці ряд Фур'є обмежується кількістю членів розкладання. Обмеження чисел членів ряду означає апроксимацію нескінченно мірного сигналу N -мірної системи базисних функцій спектру сигналу. Ряд Фур'є рівномірно сходиться до часового перебігу $y(t)$ по нормі (1):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} \left| y(t) - \sum_{n=-N}^N c_n \exp(in\omega t) \right|^2 dt = 0. \quad (4)$$

Таким чином, ряд Фур'є це розкладання сигналу $y(t)$ по базису простору $L^2(0, 2\pi)$ ортонормованих гармонічних функцій $\exp(in\omega t)$ зі зміною частоти, яка кратна частоті першої гармоніки. Якщо:

$$\sigma_n(t) = \exp(i\omega t), \quad n = \dots, -2, -1, \dots, 1, 2. \quad (5)$$

Подібно до того, як в основі ПФ лежить єдина функція $\sigma_n(t) = \exp(i\omega t)$, так і ВП будується на основі єдиної базисної функції $\psi(t)$, що має солітоноподібний характер і належить простору $L^2(R)$ – всій числовій вісі. Функціональні простори $L^2(0, 2\pi)$ для ПФ і $L^2(R)$ суттєво розрізняються. Так, локалізоване середнє значення кожної функції з $L^2(R)$ повинно прямувати до нуля на $\pm\infty$. Синусоїдальні хвилі не належить $L^2(R)$ і, відповідно, вони не можуть бути базисом функціонального простору $L^2(R)$. Вейвлетний базис простору $L^2(R)$ базується з фінітних функцій, які належать цьому простору і прямують до нуля на нескінченності. Чим швидше ці функції прямують до нуля, тим зручніше використовувати їх якості базису перетворення при аналізі реальних сигналів. Таким чином, функція $\psi(t)$ за границями деякого скінченного інтервалу дорівнює нулю. Неперервне на вісі R інтегральне ВП (continuous wavelet transform) функцій $y(t)$ має вигляд:

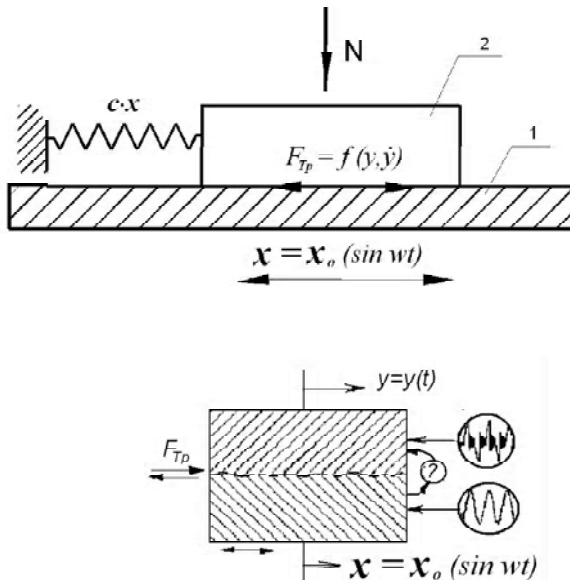


Рис. 1. Принципова схема взаємодії двох тіл при малих відносних переміщеннях (а) та динамічна система з сухим тертям

Перетворення Фур'є (ПФ)

На сьогодні основним інструментом аналізу реальних фізичних процесів є гармонічний аналіз, математичною основою якого є перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є розкладає довільний процес на елементарні гармонічні коливання з різними частотами. Всі властивості і формули ґрунтуються на основі однієї базової комплексної функції $\exp(i\omega t)$ або двох дійсних тригонометричних $\sin(\omega t)$, $\cos(\omega t)$. Оператор оберненого ПФ співпадає з виразом для комплексно-спряженого оператора. Областю визначення ПФ є простір $L^2(0, 2\pi)$ квадратично інтегруючих функцій, а більшість фізичних явищ є функціями часу, які належать цьому простору. Якщо ці функції мають норму як кінцеве значення (1):

$$\int_0^{2\pi} |y(t)|^2 dt < \infty, \quad (1)$$

то інтеграл (1) сходиться і має кінцеву енергію. Тоді

$$w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \psi_{ab}^*(t) dt, \quad (6)$$

де $\psi_{ab}(t)$ – вейвлет-функція. Вона отримується від материнського вейвлету $\psi(t)$ розтягом по горизонталі в a раз, стисканням по вертикалі в \sqrt{a} раз та зсувом по вісі часу на відрізок b (* – операція комплексного спряження):

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (7)$$

Рівняння (6) нібито вимірює „схожість” сигналу, що досліджується і базовою функцією (7). Двох параметрична функція $\psi(a, b)$ дає інформацію про зміни відносного вкладу компонент різного масштабу в часі й називається спектром коефіцієнтів ВП. Отримавши вейвлет-спектр, можна розрахувати повну енергію сигналу:

$$E_y = \int y^2(t) dt = \iint \psi^2(a, b) \frac{da db}{a^2} \quad (8)$$

і глобальний спектр енергії, який дасть розподілення повної енергії по масштабах (скейлограму ВП):

$$E_{\psi}(a) = \int \psi^2(a, b) db.$$

Головним елементом у ВП є функція-вейвлет. Найбільш розповсюджений та інформативний для аналізу віброграм з особливостями від систем з сухим тертям є вейвлет Морле (Morlet) [14].

$$\psi_0(t) = e^{ik_0 t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma}}, \quad (9)$$

де $\psi_0(t)$ – материнський або базисний вейвлет;
 k_0 – хвильовий параметр, в даному випадку $k_0 = 6$;
 σ – параметр масштабу, який впливає на ширину віка.
 Фактично він отриманий добутком комплексного синуса на функцію Гауса $g(t) = e^{-\alpha t^2}$ (рис. 2).

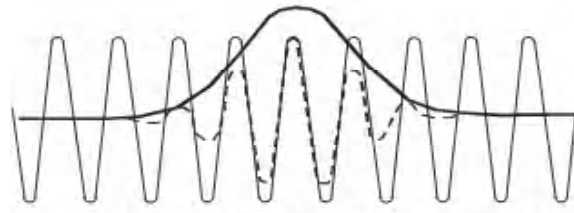


Рис. 2. Вейвлет-функція Морле (штрихова лінія)

Хвильовий параметр k_0 при його зростанні підвищує кутову вибірковість базису, але погіршує просторову. Таким чином, за допомогою вейвлет-аналізу реально часового сигналу отримуємо деяку функцію $\psi_{a,b}(t)$, яка залежить від двох параметрів: від конкретного моменту часу b та від частоти a (обернено пропорційно). Для кожної пари параметрів масштабу a і зсуву b алгоритм ВП наступний:

1. Вираховуємо згортку сигналу з материнським вейвлетом на всій часовій вісі.

2. Функцію вейвлет розтягують в a раз по горизонталі і в $\frac{1}{a}$ по вертикалі.

3. Вейвлет зсувається в конкретну точку b .

В результаті спектр ВП одномірного сигналу уявляє собою поверхню в трьохмірному просторі. Для наочності на площині (a, b) використовується різнобарвна картина. Так по осі абсцис відкладається час, по осі ординат – частота чи в логарифмічних координатах $\log \frac{1}{a}$, а абсолютне значення ВП для конкретної пари (a, b) визначається інтенсивністю забарвлення. В подальших представленнях область максимуму має світлий колір, мінімум – темний.

Вейвлет-перетворення часових рядів

Для визначення якісної картини коливань при малих вібраціях був проведений чисельний експеримент за допомогою розробленої динамічної моделі тертя (рис. 1) [4]. Досліджувалися дві амплітуди вимушуючих коливань основи 5, 10 мікрометрів з частотою 50 Гц і законом тертя Амонтона-Кулона. На рис. 3, 4 показані осцилограми переміщень тіл та їх відносної швидкості. Перетворення Фур'є показало основну частоту коливань 50 Гц і наступні гармоніки через кожні 100 Гц. Відмітимо, що картина для двох часто мало відрізняються одна від одної.

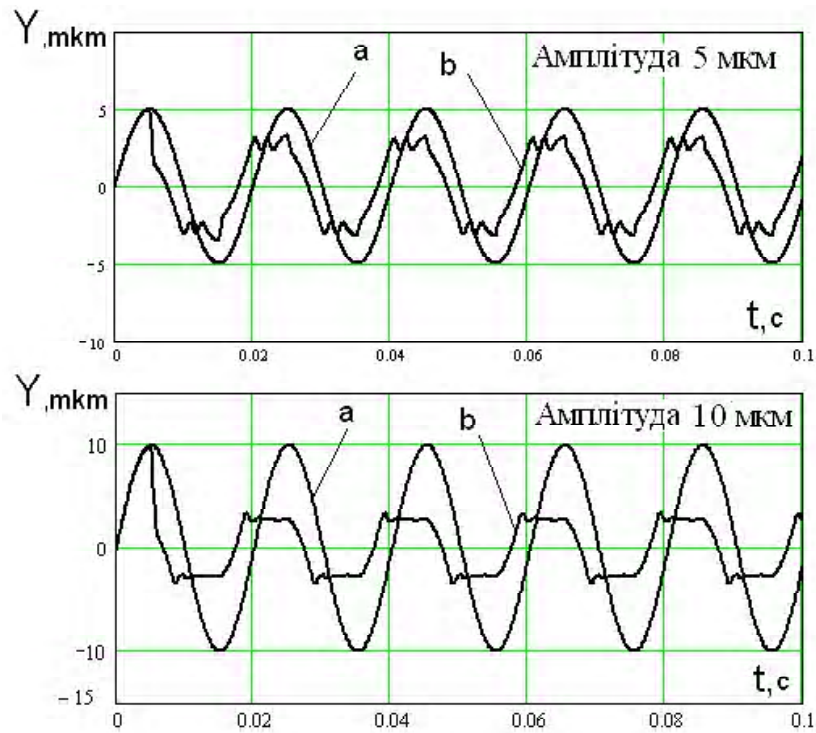


Рис. 3. Осцилограмми переміщень основи (а) з амплітудою 5 мкм, 10 мкм та відповідних коливань тіла (b), коливання якого досліджуються

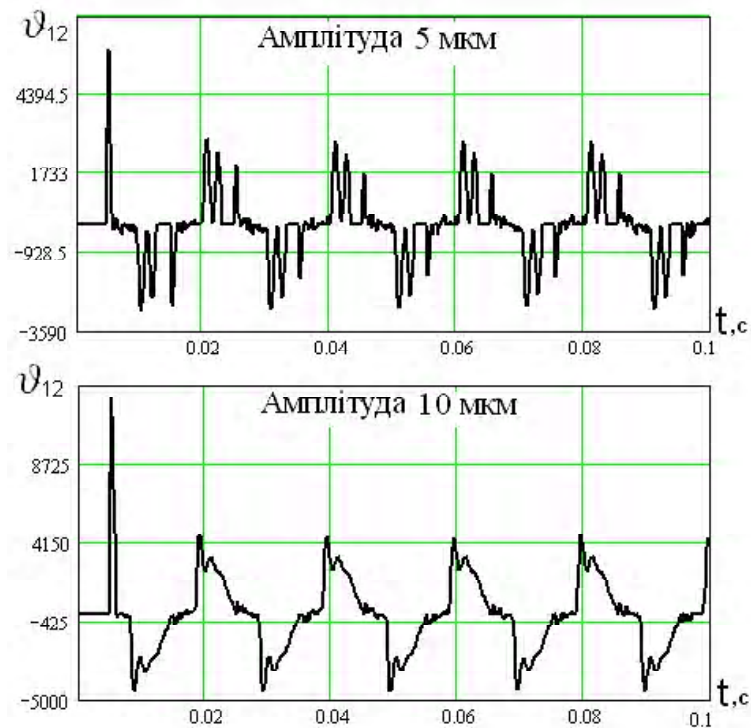


Рис. 4. Часовий перебіг різниці швидкостей двох тіл при амплітуді коливань основи 5 мкм та 10 мкм

На рис. 6 представлено ВП в трьохвимірному вигляді. Показано розподіл амплітуд не тільки в масштабі частот, а й в часі.

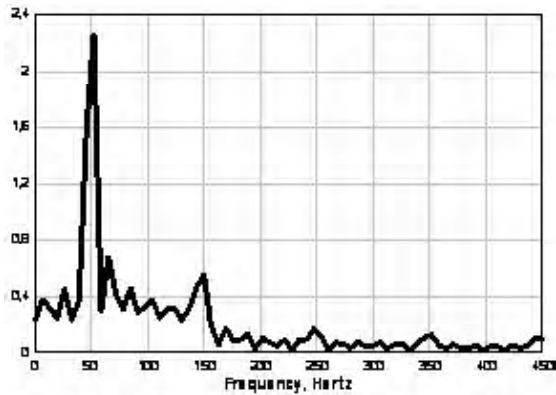


Рис. 6. Просторовий результат ВП при вимушующих коливаннях основи 5 мкм

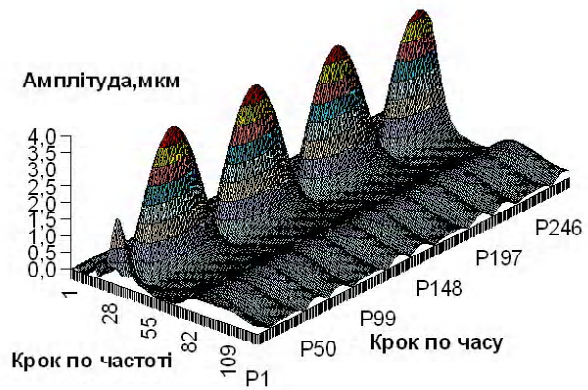


Рис. 5. Перетворення Фур'є для коливань з амплітудами 5 і 10 мкм

Для гармонічних коливань ВП показано на рис. 7. Однаковий рівень ряду темних та світлих плям вказує на періодичний характер сигналу, а в області 50 Гц представляє регулярну систему плям, що повторюють значення максимуму та мінімуму поля $\omega(a, b)$ і що відповідає максимуму та мінімуму сигналу. Границя переходу від однієї плями до іншої співпадає з положенням нуля $y(t)$.

Вейвлет-аналіз вібропереміщень та віброшвидкостей при різних вимушующих амплітудних коливань показує існування цілого ряду гармонік на рівнях меншого масштабу, тобто більшої частоти. Основною відмінністю цих картин, є те що менші амплітуди коливань, характеризуються більш складною будовою в нижній області діаграми. Після проходження першої гармоніки нижче виникають амплітуди більшої частоти, чим минулі.

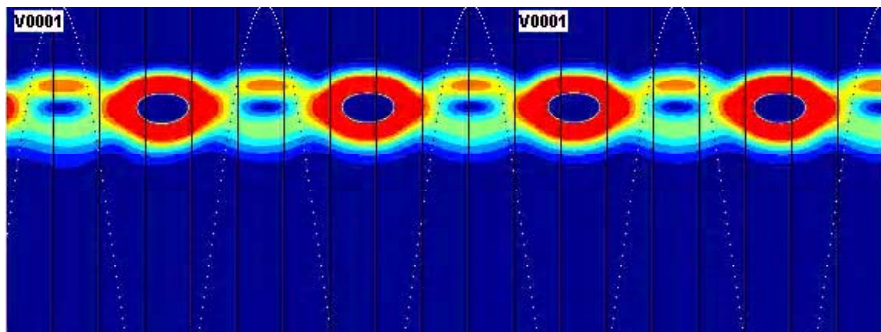


Рис. 7. Вейвлет-аналіз синусоїдального сигналу коливань основи

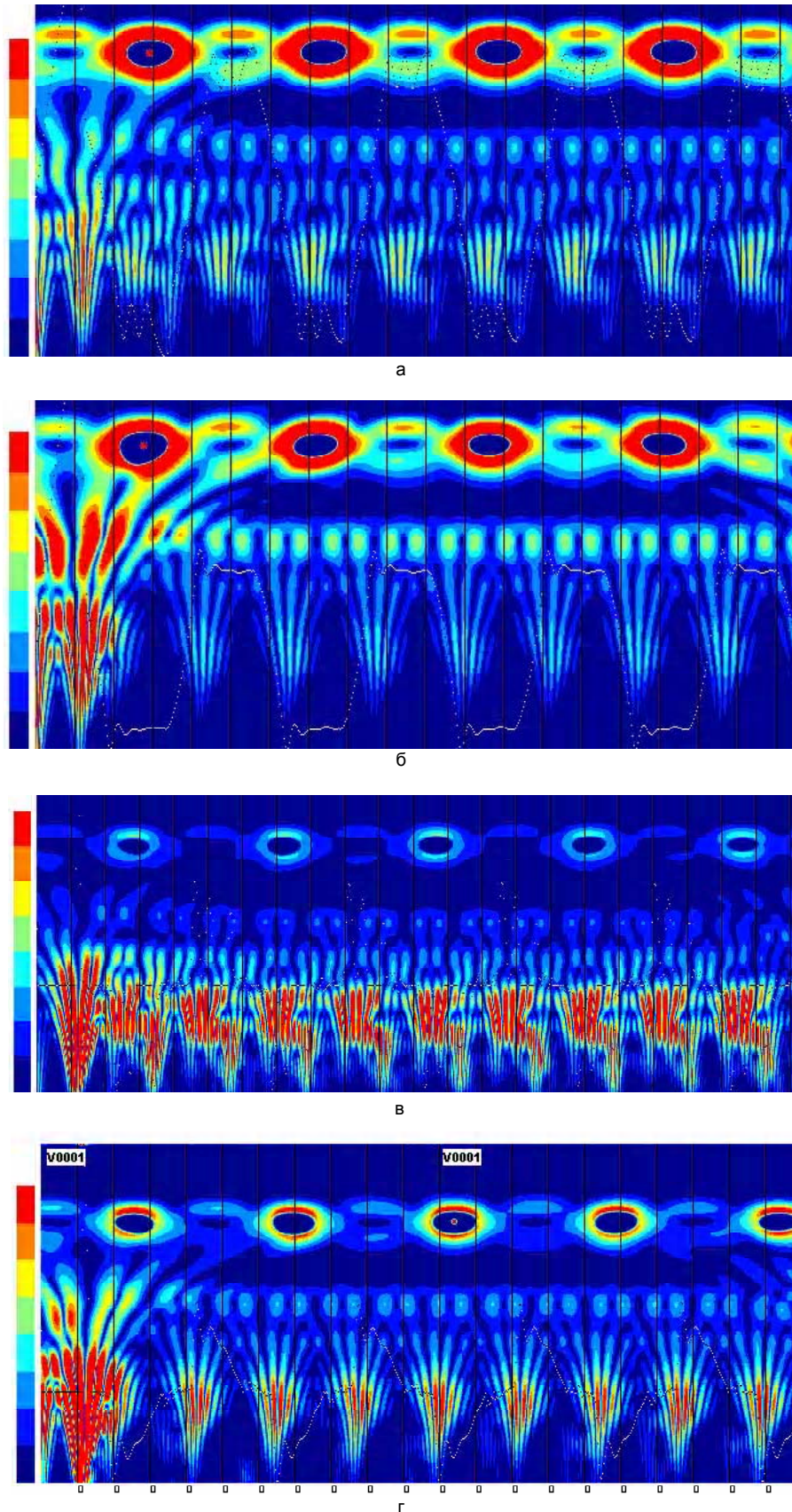


Рис. 8. Вейвлет-анализ микро перемещений при колебании основы с амплитудой 5 мкм (а) і 10 мкм (б). Вейвлет – анализ скоростей при проковзуванні тіл при колебании основы с амплитудой 5 мкм (в) і 10 мкм (г)

Ці коливання мають значний вертикальний розмір, який відповідає періоду коливань, а також вони є другими по амплітуді після першої гармоніки. Для $A = 10$ мкм спаду амплітуда не спостерігається і всі інтенсивності амплітуди коливань падають рівномірно (рис. 8 а, б). Швидкості при $A = 5$ мкм менш структуровані і відрізняються відносно довгими автоколиваннями. Всі наведені картини дають відповідний механізм розподілення та розсіювання енергії в часі. При менших амплітудах коливань розсіювання є більш виразним (рис. 8, в), що пояснюється існуванням режиму “зчеплення-проковзування”, “спалахами” відносно швидкості. Зрозуміло, що детальний аналіз часових рядів за допомогою ВП потребує більш детального розгляду і є матеріалом окремої статті.

Список літератури

1. Дубровин В.И., Субботин С.А., Богуслаев А.В., Яценко В.К. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: Монография. – Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 279 с.
2. Богуслаев А.В., Дубровин В.И., Набока И.А. Современные информационные технологии в авиадвигателестроении// Вестник двигателестроения. – Запорожье. –2004. – №4. – С. 18-22.
3. Шакевский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. – Монография. – 2004. – 803 с.
4. Шалапко Ю.І. Вплив Штрибек ефекту на нелінійний осцилятор з сухим тертям при кінематичному збудженні//Вісник Технологічного університету-2005. – №1, С. 35-43.
5. Хасанов М.М. Фрактальные характеристики объектов управления// Автоматика и механика. – 1993. – №2. – С. 59-67.
6. Дремин И.Л. и др. Вейвлеты и их использование// Успехи физики наук: 2001 – №5. – т. 171. – С. 456-501.
7. Den Hartog J.P. Forced vibration with combined Coulomb and viscous damping//Transaction of the American Society of Mechanical Engineering. – 1930. – V/53. – p. 107-115.
8. Shaw S.W. On the dynamic response of a system with dry friction// Journal of Sound and Vibration. – 1986 – V. 102. – №2. – p. 305-325.
9. M.G. Rozman, M. Urbakh, J. Klafter // Stick-slip dynamics of interfacial friction – Physica A 249 (1998) 184-189.
10. Liang, J.-W. and Feeny, B. F., 1995, “Wavelet Analysis of Stick-Slip in an Oscillator with Dry Friction”, Proceedings of the ASME Conference, Friction Damping and Friction-Induced Vibration Symposium, De-Vol. 84-1, Vol.3, Part A, Boston, MA.
11. Liang, J.-W. and Feeny, B. F., Wavelet analysis of stick-slip signals in oscillators with dry-friction contact//Journal of Vibration and Acoustics 127 (2) 139-143 (2005).
12. Jalali P, Polashenski W, Tynjala T, Zamankhan P, 2002, “Particle Interactions in a Dense Monosized Granular Flow” Physica D 162 (3-4): 188-207.
13. Grossman A, Morlet J “Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related transforms”, in Mathematics+Physics, Lectures on Recent Results Vol. 1 (Ed. L Streit) (Singapore: World Scientific, 1985).
14. Morlet, J., G. Arens, E. Fourgeau, and D. Giard, Wave propagation and sampling theory, 1, Complex signal and scattering in multilayered media, Geophysics, 47(2), 203-221, 1982a.

Надійшла до редакції 17.04.2006 р.

Аннотация: В работе исследуют возможности математической обработки временных рядов с помощью вейвлет-преобразования. В отличие от традиционного Фурье-анализа, предложенный метод дает возможность рассматривать масштабно-инвариантную динамику нестационарных процессов, например, диагностировать номинально-неподвижные соединения, уплотнения, демпферы и изоляторы в авиационной технике.

Abstract: In this work the possibilities of mathematical data-processing of time series are explored by means the wavelet-analysis. On a difference from traditional Fourier-analysis, the offered method enables to consider the scale-invariant dynamics of non-stationary processes, for example, to diagnose nominal-fixed joints, seal, dampers and insulators in an aviation technique.