

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ У ВІБРАЦІЙНОМУ РУСІ КОНТАКТНИХ ПАР МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ

*В роботі представлено спосіб застосування вейвлет-аналізу в дослідженні динамічних систем з тертям в малоамплітудній області фретингу. Визначені енергетичні характеристики мікропроковзування в контактній парі залежно від амплітудно-частотної характеристики динамічного збурення. Виявлені особливості у характеристиці вібраційного руху при довготривалому фретингу з амплітудами до 10 мкм.*

*В работе представлен способ применения вейвлет-анализу в исследовании динамических систем с трением в малоамплитудной области фретингу. Определены энергетические характеристики микропроскальзывания в контактной паре в зависимости от амплитудно-частотной характеристики динамического возмущения. Обнаружены особенности в характеристике вибрационного движения при долговременном фретингу с амплитудами до 10 мкм.*

*The method of application of wavelet-analyzing in presented process in research of the dynamic systems with a friction in the littlepeak area of fretting. Power descriptions of micro-shift are certain in a contact pair depending on gain-frequency description of dynamic indignation. Found out features in description of oscillation motion at of long duration of friction with amplitudes up to 10 mkm.*

### Вступ

Вейвлет-аналіз – це сучасний і перспективний метод обробки даних у вигляді багатомірних часових рядів. Апарат вейвлет-аналізу отримав свій розвиток на початку 1980-х років у роботах Гроссмана, Морле і деяких інших авторів [1, 2, 3]. Достатньо широко та популярно описує теорію вейвлетів Добеши [4].

Дослідження вібраційних систем з сухим тертям, які наближаються до умов фретингу, за допомогою вейвлет-аналізу за нашими даними висвітлювались тільки в декількох працях [5,6,7]. В роботах [8, 9] 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). Досліджень динамічних систем з тертям в малоамплітудній області фретингу з використанням вейвлет-аналізу не проводилось.

### Теоретичні передумови вейвлет-аналізу

На відміну від традиційно вживаного при аналізі даних Фур'є перетворення (ФП), результати, отримані за допомогою вейвлет-аналізу, часто володіють більшою інформативністю і здатні безпосередньо виявляти ледь-помітні особливості динамічних процесів через аналіз часових перебігів сигналів. В нашому випадку це осцилограми мікропереміщень та сил тертя від контактної пари при фретингу. Вейвлет-перетворення (ВП) привносить в обробку даних додатковий ступінь свободи. Так, наприклад, Фур'є-аналіз здатний показати поведінку сигналу в частотній області, залишаючи відкритим питання про локалізацію в часі різних компонент сигналу.

Локалізаційні властивості вейвлет-аналізу закладені в самій його структурі. Відомі підходи, що модифікують перетворення Фур'є, засновані на віконному перетворенні, які частково усувають вказаний недолік. Проте, необхідно штучно вдаватися до різних прийомів для того, щоб мати можливість обробляти реальні сигнали, довжина яких завжди кінцева, тоді як Фур'є-аналіз має на увазі наявність нескінченної області визначення сигналу.

Вейвлет-аналіз володіє здатністю виділяти з сигналу компоненти різного масштабу. Це часто використовують для того, щоб розділити початкові дані на складові (аналогічно тому, що відбувається при фільтрації за допомогою перетворення Фур'є). Проблема тісно пов'язана з двома іншими: шумопоглинанням і визначенням параметрів сигналу за наслідками спостереження.

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 осі. Вейвлетний базис простору  $L^2(R)$  базується у 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 функцій  $y(t)$  має вигляд

$$w(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)\psi_{ab}^*(t)dt \quad (1)$$

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

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \Psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Рівняння (2) нібито вимірює “схожість” сигналу, що досліджується з базовою функцією (В.3). Двохпараметрична функція  $\Psi(a, b)$  дає інформацію про зміни відносного вкладу компонент різного масштабу у часі та називається спектром коефіцієнтів ВП. Отримавши вейвлет-спектр, можна розрахувати повну енергію сигналу

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

і глобальний спектр енергії, який дасть розподілення повної енергії по масштабах

$$E_\Psi(a) = \int \Psi^2(a, b) db$$

Головним елементом у ВП є функція-вейвлет. Найбільш розповсюджений та інформативний для аналізу віброграм з особливостями для систем з сухим тертям є вейвлет Морле (Morlet) (рис. 1) [1]

$$\Psi_0(t) = e^{ik_0 t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma}}$$

де  $\Psi_0(t)$  – материнський або базисний вейвлет (рис. 1);

$k_0$  – хвильовий параметр, в даному випадку  $k_0 = 6$ ;

$\sigma$  – параметр масштабу, який впливає на ширину віка.

Хвильовий параметр  $k_0$  при його зростанні підвищує куту вибірковість базису але погіршує просторову. Таким чином, за допомогою вейвлет-аналізу реального 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. Виразуємо згортку сигналу з материнським вейвлетом на всій часовій осі.
2. Функцію вейвлет розтягують в  $a$  раз по горизонталі та в  $1/a$  по вертикалі.
3. Вейвлет зсувається в конкретну точку  $b$ .

Спектр ВП одновимірного сигналу уявляє собою поверхню в трьохвимірному просторі. Для наочності на площині вейвлет коефіцієнтів  $(a, \epsilon)$  використовується різнобарвна картина. Так, по осі абсцис відкладається час, по осі ординат – частота в логарифмічних координатах  $\lg(1/a)$ , а абсолютне значення ВП для конкретної пари  $(a, \epsilon)$  визначається інтенсивністю забарвлення.

Нами використовувались програми які люб'язно були представлені кафедрою динаміки машин Краківського Політехнічного Інституту. Програми протестовані на базі вейвлет-аналізу гармонічних сигналів у присутності декількох гармонік. Наприклад, синусоїдальний сигнал має спектр коефіцієнтів ВП зображений на рис. 2 і повністю відповідає його АЧХ. У подальших представленнях область максимуму має темний колір, мінімум – світлий. З точки зору динамічної поведінки ННФК найбільш практичний інтерес являють особливості взаємодії поверхонь контактної пари в мікропереміщеннях.

З іншого боку, виявлення особливостей у характерній динаміці відносного руху різних за якістю та обробкою поверхонь, може дати відповідь про ефективність запровадження того чи іншого методу зміцнення поверхонь.

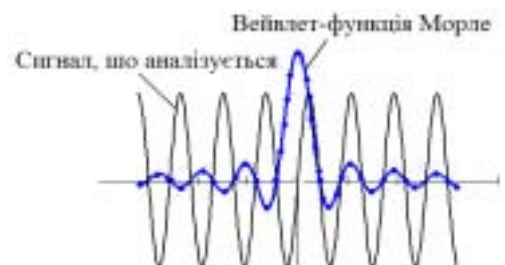


Рис. 1. Вейвлет-функція Морле

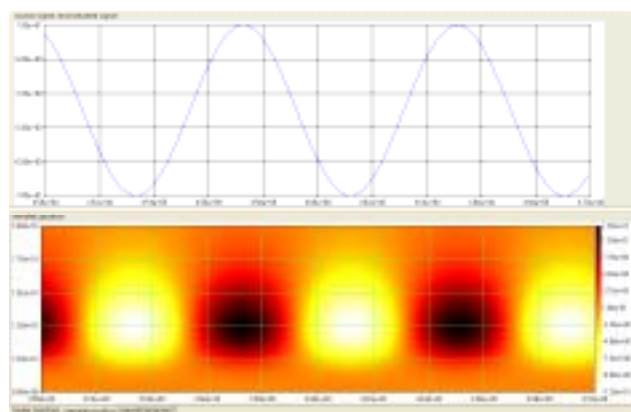


Рис. 2. Вейвлет-перетворення гармонічного сигналу

### Вейвлет-аналіз фретинг-процесів

Розглянемо процес поступового переходу номінально-нерухомого фрикційного контакту зі стану повного попереднього зміщення до режиму динамічного зчеплення-проєовзування (РДЗП) (рис. 3).

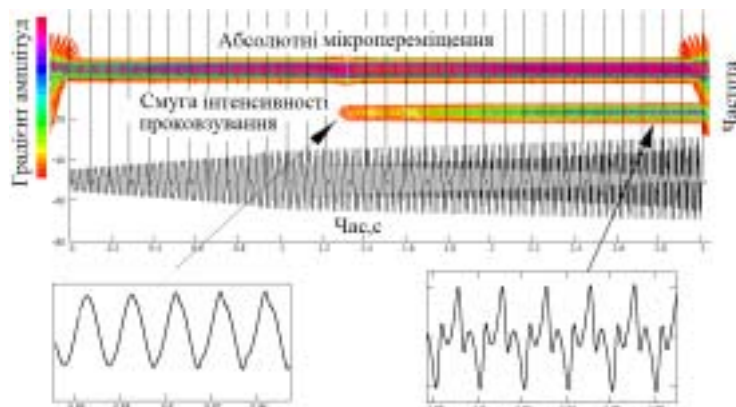


Рис. 3. Вейвлет-аналіз вібраційних мікропереміщень зразка при поступовому збільшенні амплітуди з 5 мкм до 12 мкм при частоті збурення 50 Гц

Природно, припустити що будь-які еволюційні перетворення та переходи у станах контактної пари, які не помітні “неозброєним” оком, можуть кардинально змінювати параметри малоамплітудного фретингу, а для реальних конструкцій й вузлів продіагностувати ННФЗ з точки зору його структурної цілісності.

Неперервним ВП чітко фіксується момент переходу до РДЗП у вигляді появи другої частотної гармоніки. Причому за інтенсивністю того чи іншого кольору можна зробити якісний висновок про структуру сигналу й, власно кажучи, визначити “гостроту” сигналу, а за математичною обробкою потужність сили тертя та енергетичні втрати в контакті. Подальше зростання амплітуди вимушених коливань збільшує інтенсивність основної гармоніки. Інтенсивність проковзування на другій гармоніці також зростає (синя смуга на ділянці проковзування).

Розглянемо експериментальні дані вібраційного руху зразка, виготовленого зі сталі 30ХГСА у контакті з кулькою ШХ15, що коливаються у тангенціальному напрямку з частотою 100 Гц. Вейвлет-діаграми на початку РДЗП та через  $10^4$  циклів навантаження показані на рис. 4.

На обох діаграмах чітко визначається вимушена частота коливань 100 Гц і на початку фретингу спостерігається підвищення віброактивності контактної пари. Про те, що система нелінійна, свідчить відсутність точного значення власної частоти, оскільки воно плаває залежно від амплітуди коливань.

Кількісна розшифровка діаграми дає часову розгортку енергетичного спектру за відповідними частотами. Зрозуміло, що у даному випадку це частота 100 Гц і для неї визначаємо потужність сигналу у будь-який момент часу (рис. 5). Аналіз часових рядів, ВП дає можливість визначити такі особливості у динамічному русі контактної пари які іншими способами визначити не можливо.

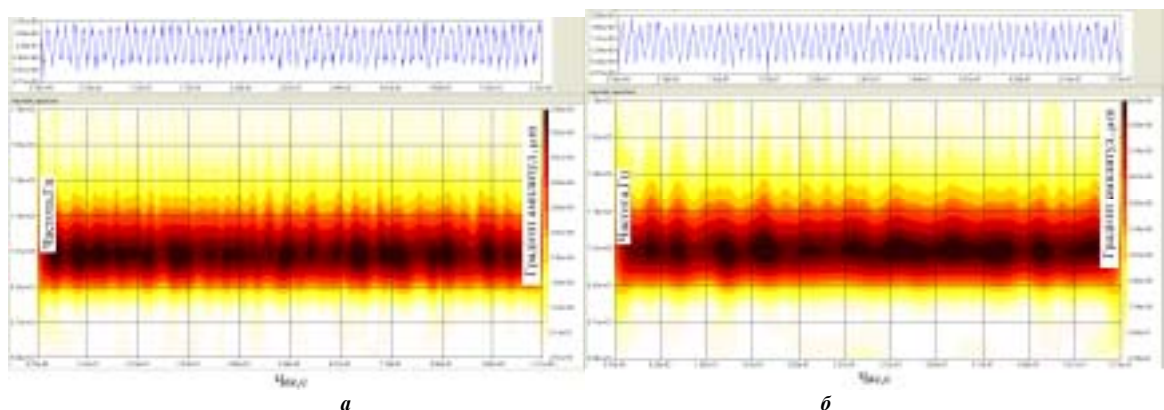


Рис. 4. Вейвлет-перетворення осцилограм мікропереміщень на початку РДЗП (а) та після  $10^4$  циклів фретингу (б)

Тому вейвлет-аналіз характеризується як “математичний мікроскоп” по виявленню особливостей у динамічних процесах. Так, при фретингу сталі 30ХГСА вже за  $10^4$  циклів енергія у сигналі вібропереміщень, вирахованої за формулою  $E_i = \omega^2 \cdot \delta^2 \cdot m$ , збільшується на 9 %. Такий аналіз динамічної картини ФП дає можливість визначити усі особливості фрикційної взаємодії залежно від зміни таких параметрів як характеристика тертя, тангенціальна жорсткість, сила тертя, зношування, нормальний тиск тощо.

Розглянемо ВП на прикладі еволюції сил тертя яка має вигляд зображений на рис. 6.46. Тоді розрахунок коефіцієнтів ВП показує, що в режимі повного попереднього зміщення спостерігаються флуктуації

сил тертя. Це пояснюється невизначеністю сили статичного тертя. В момент, що передує початку.

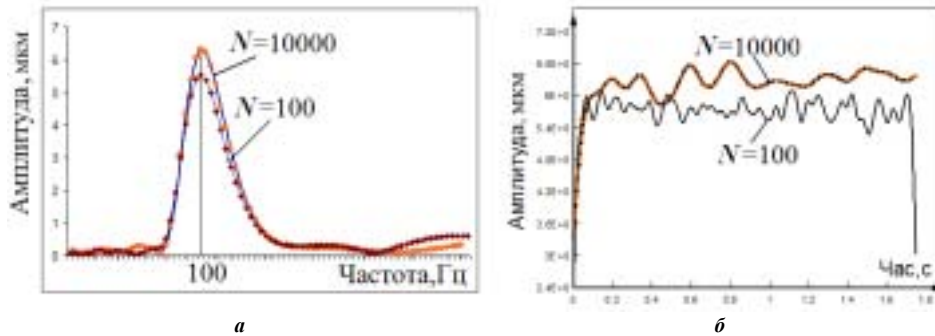


Рис. 5. АЧХ вібропереміщень (а) та рівень енергетичної активності (б) контактної пари на початку фретинг-процесу та через  $10^4$  циклів. Сталь 30ХГСА-ШХ15, частота збурення 100 Гц

Сканування вейвлет-діаграми по осі частот визначає кількісну картину віброактивності сил тертя у стадії номінального зчеплення при переході до проковзування (рис. 6).

Можна побачити, що при великому розмаху сил тертя можуть відбуватися поодинокі акти втрати цілісності контакту. Особливо це помітно на початкових стадіях циклічного навантаження. Однак, потім динамічні та фрикційні процеси стабілізуються і ННФК перебуває у стані повного попереднього зміщення. У багатьох випадках, особливо у стані зчеплення та сталого проковзування, з амплітудами меншими за 10...15 мкм, осцилограми мікропереміщень та швидкостей проковзування практично не відрізняються при різних матеріалах контактної пари. І тільки за допомогою вейвлет-аналізу довготривалого перебігу фретинг-процесу можна знайти відмінності у динамічному русі контактної пари.



Рис. 6. Інтенсивність сил тертя для контактної пари при переході від зчеплення до проковзування. Сталь 30ХГСА-ШХ15, частота 50 Гц

Так, нами були проведені серії експериментів для виявлення особливостей руху найбільш фретингостійкого покриття: електроіскрового легування сталі 45 з наступним лазерним опромінюванням. Зразки навантажувались однаковою нормальною силою, яка забезпечує зчеплення контактної пари. Порівнювались дві пари з покриттям та традиційним загартуванням сталі 45. Для виявлення флуктуацій у динамічних характеристиках контактних пар розрахунок АЧХ проводимо у масштабі малих частот до 15 Гц. На рис. 7 представлений діаграма сталості АЧХ для відповідних контактних пар у режимі номінальної відносної нерухомості поверхонь протягом 72 годин циклічних навантажень.

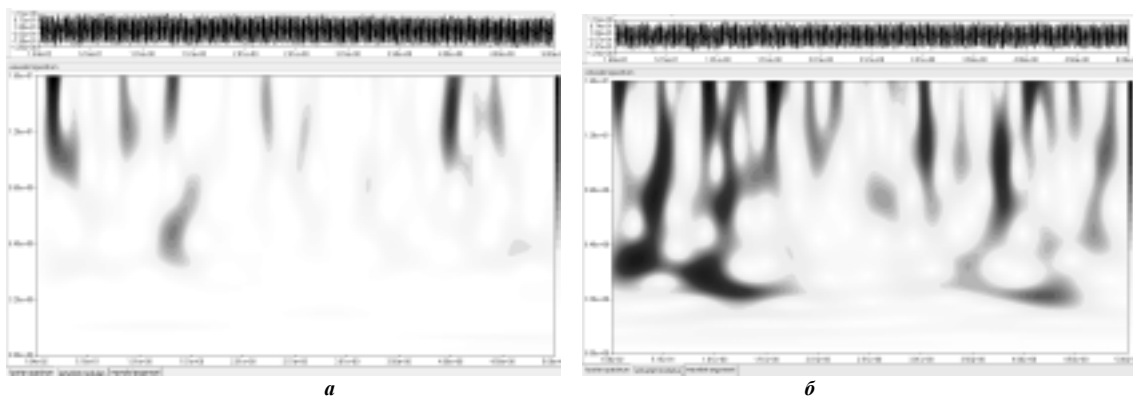


Рис. 7. АЧХ РДЗП для контактної пари сталі 45-ШХ15 в області низькочастотних флуктуацій: а – зміщення електроіскровим легуванням сплавом ВК8; б – традиційне гартування сталі 45

Розглянемо експериментальні осцилограми відносного руху у ННФК при поступовому збільшенні частоти. Нормальний контакт кульки та площини навантажувався тангенціальним зусиллям частотою від 5 до 160 Гц. Вельвет-аналізом проведено дослідження мікропереміщень поверхонь збурення та відгуку. На рис 7 показано вельвет-перетворення осцилограми збурення, яке чітко показує, як в часі збільшується частота збурення, її амплітуда та структура сигналу (на рисунку при частоті 42 Гц). Таким чином, аналіз осцилограми коливань збурення можна вважати тестовими. Вельвет-діаграма для мікропереміщень зразку подана на рис. 8.



Діаграми ідентифікують періоди сталого проковзування, полі гармонічних та хаотичних коливань. Присутність вищих гармонік (область 1) доводить присутність фрикційних автоколивань з амплітудами до 1 мкм. В області вимушених частот більше 90 Гц присутні три широкі смуги з амплітудами більше 2 мкм.

У цілому, по діаграмі можна зробити висновок, що перехід від сталого проковзування до нестійкого руху супроводжується виникненням на фоні основних частот збурення, коливань з амплітудами до 2 мкм на частотах у кілька разів більших за вимушені. В свою чергу сила тертя зі збільшенням частоти збурення у вельвет-перетворенні веде себе аналогічно мікропереміщенням. Однак на відмінність від попередньої діаграми, при втраті стійкості руху сила тертя на частотах більших 40 Гц нібито "розчиняється" на вищих частотах. Тому таке зменшення сили тертя призводить до нестійкості у ННФЗ.

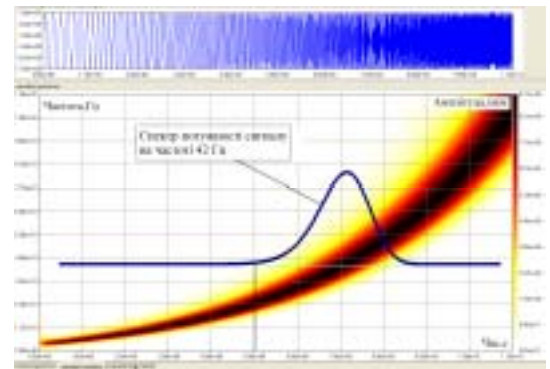


Рис. 8. Вельвет-аналіз осцилограми мікропереміщень поверхні, що збурюється гармонічним сигналом і змінною частотою. Амплітуда збурення 9 мкм, тривалість експерименту 11 с, нормальне навантаження 4 Н, кулька ШХ15 – площина сталь 45

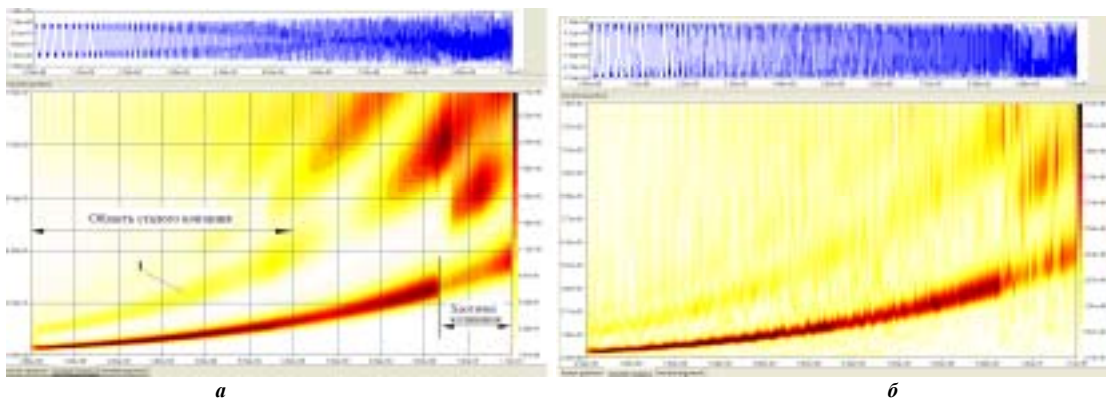


Рис. 9. Вельвет-аналіз перебігу показників динамічного руху зразка при вимушених коливаннях основи згідно умов рис. 7: а – вельвет – аналіз перебігу мікропереміщень; б – вельвет – аналіз перебігу сил тертя

Аналіз спектру частот у відповідний момент часу проводили наступним чином. Припустимо експлуатаційні частоти машин чи вузла знаходяться в області до 10, 50, 75 і 130 Гц. Для відповідного цим частотам часу за вельвет-аналізом отримуємо АЧХ, які зображені на рис. 10. При частоті збурення 10 Гц відбуваються сталі коливання з амплітудою 2,75 мкм та 10,7 мкм в області частот 5 та 18 Гц. Збільшення частоти збурення зменшує амплітуду коливань (лінії 2,3 рис. 10), а при частотах більше 100 Гц виникають дві широкі смуги в області 18 Гц з амплітудами 2,25 мкм та 7,75 мкм.

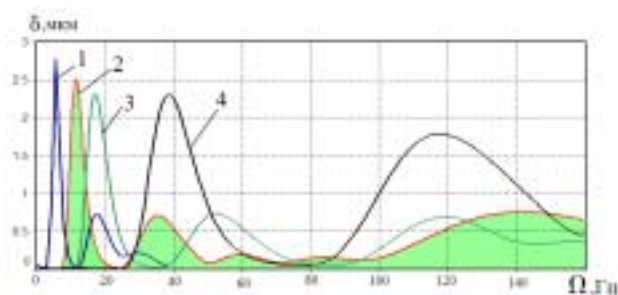


Рис. 10. АЧХ вібропереміщень в смузі частот: 1 – 10 Гц; 2 – 50 Гц; 3 – 75 Гц; 4 – 130 Гц

Віброактивність визначалась за повною енергією у сигналі. У даному випадку густина енергії розподілена у вейвлетній напівплощині  $(\omega, t)$  згідно виразу [4]

$$E = \frac{m}{\pi} \int_0^{t_1} W(\omega, t)^2 \cdot \omega^2 dt$$

де  $W(\omega, t)$  – вихідне ВП, що визначає амплітуду коливань;  $m$  – маса, що вібує;  $t_1$  – тривалість сигналу.

На рис. 11 показаний процес знаходження енергії у вібраційному русі зразку при різних частотах вельвет-перетворення на рис. 9, а.

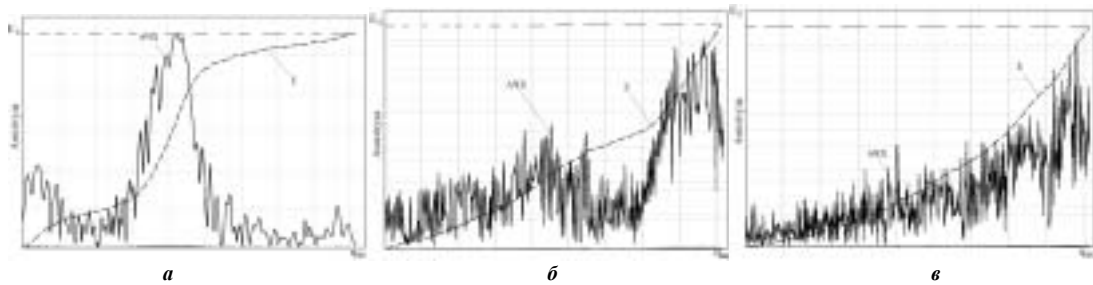


Рис. 11. Розрахунок енергії вібраційної взаємодії у ННФК за спектром амплітуд проковзування в смузі частот: а – 5 Гц; б – 60 Гц; в – 100 Гц

Розрахунки показали збільшення віброактивності у режимі повного попереднього зміщення і у РДЗП для необроблених поверхонь відповідно на 18 % і 25 % по зрівнянню із покриттям твердим сплавом та лазерним оплавленням. Подальше вимірювання глибини зношування на ділянках проковзування у ННФК показали певну кореляцію у зношенні та віброактивністю контактної пари (рис. 12).

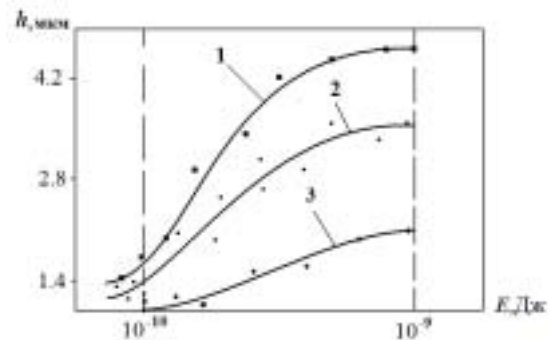


Рис. 12. Кореляція глибини фретинг-пошкодження в області проковзування у ННФК залежно від енергії імпульсу в сигналі відносних мікропереміщень. 1 – сталь 45 загартована; 2 – сплав ОТ4; 3 – сталь 45 (модифікована ВК8 та лазерним оплавленням) – ШХ15

## Висновок

Вейвлет-аналіз є дієвим інструментом для визначення тих, ледь вловимих, змін у характері відносного руху поверхонь, які діагностують ННФК на предмет його подальшого перебування у стані зчеплення, нових критеріїв фретингостійкості та віброактивності. Важливим є те, що аналіз часових рядів можна здійснювати на різних масштабах, тобто, виявляти тенденції у довготривалій еволюції на малих частотах й особливості у більш мілкому масштабі на великих частотах.

Запропонований вейвлет-аналіз часового перебігу фретинг-процесу, який дозволяє безпосередньо під час експлуатації чи експерименту, отримувати важливі якісні та кількісні характеристики стану ННФК, а саме, енергетичні параметри режимів зчеплення та проковзування, довготривалі тенденції у зміні контактного стану при експлуатації з'єднань, фіксувати переходи до режимів мікропроковзування, зчеплення– проковзування і повного ковзання, діагностувати вузли та конструкцій.

Як показали дослідження, ФП необхідно досліджувати на частотах близьким до вимушених з метою визначення рівня віброактивності як у відносних мікропереміщеннях (оцінюється динамічна складова у повному переміщенні контактної пари), так і у силі тертя (оцінюється фрикційна складова). У випадку присутності нових гармонік, що характеризує початок переходу до РДЗП або хаосу, є доцільним визначити інтенсивність енергії на цих відповідних частотах.

## Література

1. Morlet J. Wave Propagation and Sampling Theory / J. Morlet, G. Arens, I. Fourgeau, D. Giard // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47. – P. 203-236.
2. Grossmann A. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape / A. Grossmann, J. Morlet // *SIAM J. Math. Anal.* – Vol. 15. – 1984. – P. 723-736.
3. Morlet J. Sampling Theory and Wave Propagation in NATO ASI Series. – Issues in Acoustic signal // *Image processing and recognition*. – Berlin, 1983. – Vol. 1. – P. 233-261
4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ, 2001.
5. Frantziskonis V. Wavelet analysis of fretting experimental data // *Proc. SPIE*. – 2005. – Vol. 3585. – P. 11-27.
6. Шалапко Ю. И. Вейвлет-аналіз еволюційних задач динаміки систем з сухим тертям та фретинг-корозією // *Вісник двигунобудування*. – 2006. – № 2. – С. 22-28.
7. Шалапко Ю. И. Эволюционная задача микроперемещения с трением в приложении вейвлет-анализа // Сб. ст. IV российско-украинского научно-технического и методического симпозиума “Информационно-вычислительные технологии и их приложения”. – Пенза, 2006. – С. 256-266.
8. Liang J. – W. Wavelet Analysis of Stick-Slip in an Oscillator with Dry Friction / J. – W. Liang, B. F. Feeny // *Proceedings of the ASME Conference, Friction Damping and Friction-Induced Vibration Symposium*. – De-Vol. 84-1, Vol. 3. – Part A. – Boston, MA. – 1995.
9. Liang J. – W. Wavelet analysis of stick-slip signals in oscillators with dry-friction contact / J. – W. Liang, B. F. Feeny // *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2005. – No 127 (2). – P. 139-143.

Надійшла 8.12.2008 р.