УДК 621.396:519.876

к.т.н., с.н.с. **Жиров Г.Б.** (ВІКНУ)
к.т.н., с.н.с. **Хлапонін Ю.І.** (НАУ)
Жиров Б.Г. (ВІКНУ)

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

У статті розглянута проблема аналізу сигналів за допомогою різних методів: Фур'є перетворення, неперервного та дискретного вейвлет перетворення. Встановлено, що для аналізу нестаціонарних сигналів доцільно застосовувати саме вельвет перетворення (вейвлет аналіз). Вейвлет аналіз дає унікальні можливості розпізнавати локальні і «тонкі» особливості сигналів (функцій), що важливо в багатьох областях радіотехніки, зв'язку, радіоелектроніки, геофізики та інших галузях науки і техніки.

Узагальнено підходи до аналізу тонкої структури сигналу для вирішення завдань прогнозування відмов технічних об'єктів і розрізнення повітряних цілей засобами радіолокації.

Ключові слова: тонка структура сигналу, вейвлет аналіз, Фур'є аналіз, прогнозування відмов, розрізнення цілей.

Вступ. На сьогоднішній час коло прикладних задач, які необхідно розв'язувати технічними засобами швидко зростає. До таких задач відносяться задачі розпізнавання, фільтрації, класифікації, діагностування, прогнозування і багато інших. Вирішення наведених задач базується на обробці сигналів, причому, проблема високоточної та високошвидкісної обробки сигналів та процесів у реальному масштабі часу на основі нових математичних алгоритмів стоїть досить гостро. Результати обробки повинні задовольняти багатьом умовам, включаючи швидкодію, достовірність та іншім умовам.

В кінці минулого століття виник і успішно розвивається новий важливий напрямок в теорії і практиці обробки сигналів, зображень, часових рядів та ін., який отримав назву вейвлет-перетворення (ВП), який добре пристосований для вивчення структури неоднорідних процесів. Термін вейвлет (wavelet) ввели в своїй статті Гроссманн (Grossmann) і Морлі (Morlet) в середині 80-х років XX століття в зв'язку з аналізом властивостей сейсмічних і акустичних сигналів. Їх робота була початком інтенсивного дослідження вейвлетів в наступне десятиліття рядом таких вчених, як Добеши (Dobechies), Мейер (Meyer), Малл (Mallat), Фарж (Farge), Чуи (Chui) та ін. [1].

У разі вейвлет-аналізу (декомпозиції) процесу (сигналу) в зв'язку зі зміною масштабу, вейвлети здатні виявити відмінність в характеристиках процесу на різних шкалах, а за допомогою зсуву можна проаналізувати властивості процесу в різних точках на всьому досліджуваному інтервалі. Саме завдяки властивості повноти цієї системи, можна здійснити відновлення (реконструкцію) процесу за допомогою зворотного ВП [2].

Підтвердженням значущості ВП є і той факт, що алгоритми ВП широко представлені у відомих математичних пакетах, таких як Mathcad, MATLAB, Mathematica. Міжнародні стандарти JPEC-200, MPEG-4 і графічні програмні засоби Corel Draw 9/10 широко використовують ВП для обробки зображень і, зокрема, для стиснення зображень для каналів з обмеженою пропускною спроможністю, наприклад, для Інтернет. Крім того, фірмою Analog Devices розроблені і випускаються однокристальні дешеві мікропроцесори ADV6xx (ADV601, ADV601LC, ADV611, ADV612), засновані на ВП і призначені для стиснення і відновлення відеоінформації в реальному масштабі часу [1].

На сьогоднішній час за кордоном приділяється багато уваги щодо дослідження вейвлет-перетворень, особливо їх практичного застосування у різноманітних галузях науки та техніки. У західних університетах читаються багатогодинні курси з теоретичних і практичних аспектів ВП, проводяться міжнародні наукові конференції та семінари. Однак, у нашій державі на практичне застосування ВП приділяється недостатньо уваги.

Постановка завдання. В статті розглядаються питання аналізу структури нестаціонарних сигналів за допомогою різних методів: Фур'є перетворення, неперервного та дискретного вейвлет перетворення. Узагальнено загальні підходи до аналізу тонкої структури сигналу для вирішення задачі прогнозування відмов технічних об'єктів, а також розрізнення повітряних цілей засобами радіолокації.

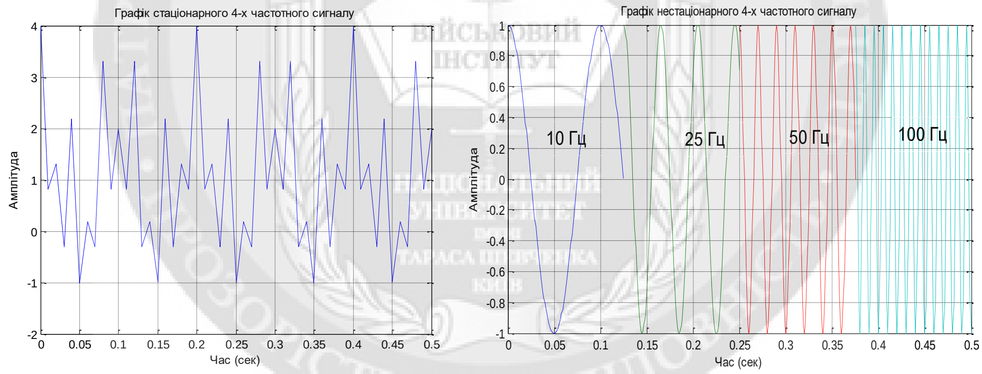
Результати дослідження. В останні роки стало очевидно, що традиційний апарат представлення довільних функцій та сигналів у вигляді рядів Фур'є (або Фур'є перетворень) є малоефективним для функцій з локальними особливостями, наприклад для імпульсних та цифрових сигналів та зображень.

Головною математичною основою спектрального аналізу є перетворення Фур'є, яке пов'язує просторовий або часовий сигнал (або деяку модель цього сигналу) з його поданням до частотній області.

Перетворення Фур'є функції $S(t)$ є інтегральним поданням і задається наступним виразом:

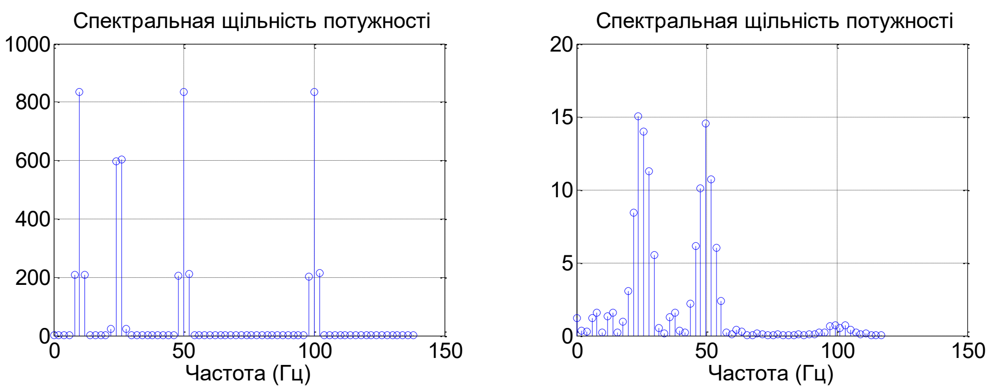
$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt \,. \tag{1}$$

Однак перетворення Фур'є дає інформацію тільки про значення частоти сигналу і не дає інформації про проміжок часу присутності цієї частоти. Якщо розглянути два різних сигнали, один з яких стаціонарний (рис. 1 а), а другий нестаціонарний (рис. 1 б), (сигнали мають однаковий набір частот) та їх Фур'є перетворення рис. 2, то можна зробити висновок, що для двох абсолютно різних сигналів ми отримали майже однакові перетворення Фур'є. Аналітичний вираз стаціонарного сигналу має вигляд:
$S(t) = \cos(2\pi t \cdot 10) + \cos(2\pi t \cdot 25) + \cos(2\pi t \cdot 50) + \cos(2\pi t \cdot 100)$, у нестаціонарному сигналі ті саме частоти змінюються дискретно. Графіки отримані з використанням пакету MatLab.



а б

Рис. 1. Графіки стаціонарного (а), та нестаціонарного (б) сигналів



а б

Рис. 2. Графіки перетворення Фур'є стаціонарного(а) та нестаціонарного сигналів (б)

Таким чином перетворення Фур'є за своєю сутністю не може відрізнити стаціонарний сигнал від нестаціонарного, що є великою проблемою для його застосування.

Іншим інструментом спектрального аналізу є віконне перетворення Фур'є, яке є різновидом перетворення Фур'є і визначається:

$$F(\omega,b)=\int_{-\infty}^{\infty}S(t)G(t-b)e^{-j\omega t}dt\,, \qquad (2)$$

де $G(t-b)$ - деяка віконна функція. Зазвичай в якості віконної функції використовується Гауссіан, вікно Хеммінга, вікно Ханна або вікно Кайзера.

Віконне перетворення Фур'є, на відміну від звичайного перетворення Фур'є, є функцією від часу, частоти і амплітуди. Тобто воно дозволяє отримувати характеристику розподілу частоти сигналу (з амплітудою) в часі. На відміну від звичайного перетворення Фур'є ми отримуємо значення частот по вісі часу, тобто отримуємо частотно-часову характеристику сигналу.

Але головною проблемою у використанні віконного перетворення Фур'є для отримання частотно-часової характеристики сигналу є принцип невизначеності Гейзенберга, в основі якого лежить факт, що неможливо сказати точно яка частота присутня в сигналі в даний момент часу (можна говорити тільки про діапазон частот) і не можливо сказати в який точно момент часу частота присутня в сигналі (можна говорити лише про період часу).

У зв'язку з цим виникає проблема роздільної здатності. Роздільну здатність віконного перетворення Фур'є можна регулювати за допомогою ширини вікна, однак при збільшенні ширини вікна збільшується точність щодо частоти і зменшується точність щодо часу, і навпаки [3].

Вейвлет перетворення вирішує проблему невизначеності Гейзенберга при будові частотно-часових характеристик сигналу.

В основі вейвлет-аналізу лежить теоретично обґрунтована можливість подання сигналу кінцевої енергії $S(t)$ у вигляді [4]:

$$S(t)=\sum_{l}a_l\varphi_l(t)+\sum_{k}d_k\psi_k(t)\,, \qquad (3)$$

де $\varphi_l(t)$ - масштабуюча функція (phi-функція), з одиничним значенням інтегралу, визначає грубе наближення сигналу та породжує коефіцієнти апроксимації – a_l;

$\psi_k(t)$ - вейвлет-функція (psi-функція), з нульовим значенням інтегралу, визначає деталі сигналу та породжує коефіцієнти деталізації – d_k.

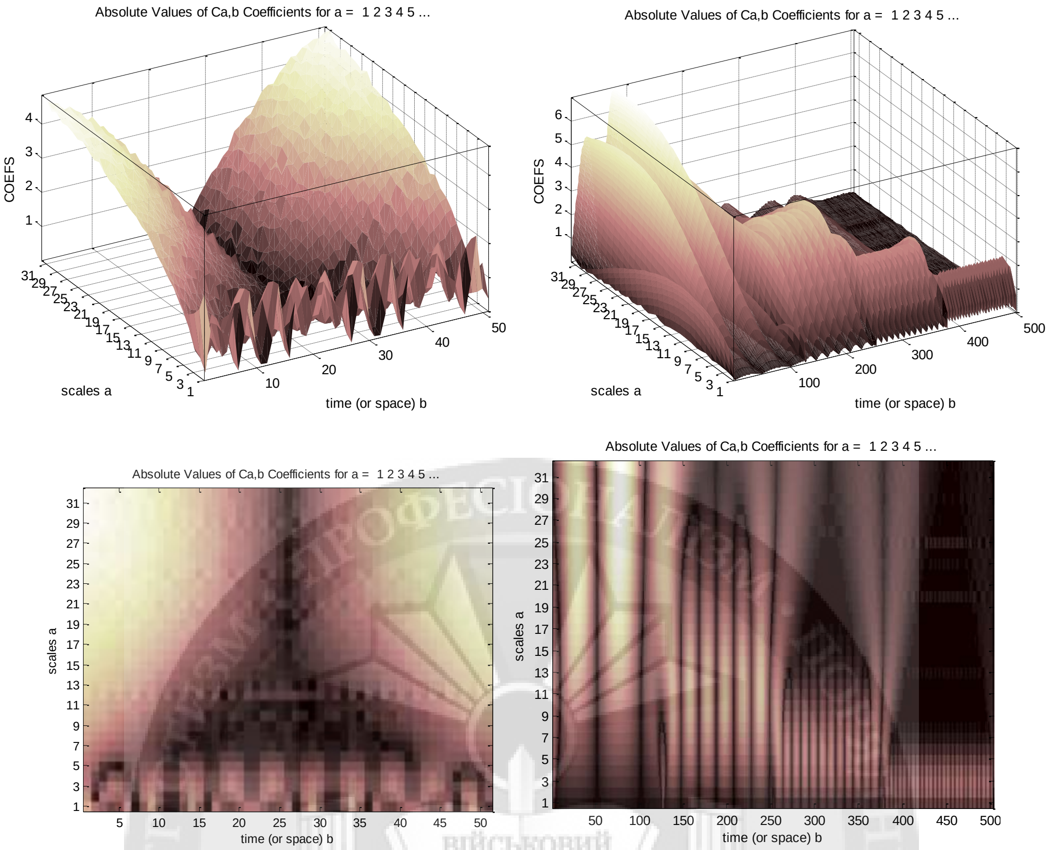
Аналітичний вираз вейвлет перетворення сигналу $S(t)$ має вигляд:

$$C(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}S(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt\,, \qquad (4)$$

де a – масштабуюче число, b – параметр зсуву у часі, ψ - материнський вейвлет.

Материнський вейвлет являє собою функцію, яка є прототипом для всіх вікон, які будуть генеруватися під час вейвлет-перетворення. Зсув у часі регулює рух згенерованих вікон по часовій компоненті сигналу. Поняття масштабу є зворотним до поняття ширини вікна. Чим менше ширина вікна, тим більше масштаб, вікно захоплює меншу частину сигналу і сигнал інтегрується більш «детально». Чим більше ширина вікна, тим менший масштаб, вікно захоплює більшу частину сигналу і сигнал, відповідно, інтегрується менш «детально».

Способи подання (візуалізації) $C(a,b)$ можуть бути різними. Спектрограма $C(a,b)$ може бути поверхнею в трьохвимірному просторі. Однак часто замість зображення поверхні представляють її проекцію на площину (a,b) з ізорівнями, що дозволяє простежити зміну інтенсивності амплітуд ВП на різних масштабах і в часі. Крім того, зображують картини ліній локальних екстремумів цих поверхонь, так званий скелетон (sceleton), який виявляє структуру аналізованого сигналу. На спектрограмі темними вертикальними полосами показуються екстремуми функції, білими переходи через нуль, а також різкі локальні зміни форми функції.



а б

Рис. 3. Вейвлет спектрограма сигналів: а– стаціонарного, б– нестаціонарного

На рис. 3 наведена спектрограма стаціонарного (рис. 3 а) та нестаціонарного (рис. 3 б) сигналів у 3D та 2D проекціях. Вираз (4) це вираз для прямого неперервного (інтегрального) вейвлет-перетворення (НВП або CWT – continuous wavelet transform).

Неперервне ВП знайшло широке застосування в обробці сигналів. Пряме ВП містить комбіновану інформацію про сигнал, що аналізується та вейвлет, який його аналізує. Незважаючи на це, ВП дозволяє отримати об'єктивну інформацію про сигнал, тому що деякі властивості ВП не залежать від вибору вейвлету. Незалежність від вейвлету робить ці прості властивості дуже важливими. Таким чином вейвлет аналіз (ВА) дає унікальні можливості розпізнавати локальні і «тонкі» особливості сигналів (функцій), що важливо в багатьох областях радіотехніки, зв'язку, радіоелектроніки, геофізики та інших галузях науки і техніки.

Для подолання надмірності, а також підвищення швидкості перетворення неперервного сигналу застосовується дискретизація параметрів a і b при збереженні можливості відновлення сигналу з його перетворення. Дискретизація, як правило, здійснюється через ступені двійки

$$a = 2^m, b = k \cdot 2^m, \psi_{mk}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(2^{-m}t - k), \qquad (5)$$

де m і k - цілі числа. В цьому випадку площина a и b перетворюється у відповідну сітку (m,k). Параметр m називається параметром масштабу. Таким чином, з урахуванням (5), пряме та зворотнє діадне ВП неперервних сигналів подається наступними виразами:

$$C(m,k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\psi_{mk}(t)dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\psi(2^{-m}t-k)dt$$
$$S(t) = \sum_{m,k} C(m,k)\psi_{mk}(t) \quad . \tag{6}$$

Вираз (6) є діадне (dyadic) ВП і представляє собою різновид неперервного ВП, який дозволяє усунути певну частину його надлишковості.

Велика доля сучасних систем обробки використовують результати комп'ютерних розрахунків в яких використано дискретне вейвлет-перетворення (ДВП або DWT – discrete wavelet transform). При цьому не тільки параметри a і b, але і сигнали також дискретизуються у часі.

При застосуванні ДВП використовуються ортонормовані базисні вейвлет-функції, а в ортонормованих вейвлетах використовуються дві функції: $\varphi(t)$ - масштабуюча та $\psi(t)$ - вейвлет-функція (материнський вейвлет). Для кожного рівня розкладання (декомпозиції) m є система функцій:

$$\varphi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m}\varphi(2^m t - k); \qquad \psi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m}\psi(2^m t - k). \tag{7}$$

Система функцій (7) при $k \in Z$ є ортонормованим базисом простору $V_m \subset L^2(R)$, причому така система утворює нескінчену, у дві сторони послідовності вкладених підпросторів, таких, що $\bigcap_{m=-\infty}^{\infty} V_m = 0$ та $\bigcup_{m=-\infty}^{\infty} V_m = L^2(R)$ [5,6].

Число m характеризує рівень роздільної здатності. Чим більше m , тим більше дрібні носії має функція $\varphi_{m,k}(t)$ і коефіцієнти розкладання $\left(S(t), \varphi_{m,k}\right)$, більш детально відображають властивості сигнальної функції $S(t)$.

Із зростанням рівня m , оператори проектування P_k дають більш точне наближення $P_k(S)$ до елементів функції $S(t) \in L^2(R)$.

$$P_m(S) = \sum\nolimits_{k\in Z} (S, \varphi_{m,k})\, \varphi_{m,k}(t). \tag{8}$$

З урахуванням ортогонального доповнення до підпростору V_m розкладання сигнальної функції визначається виразом

$$P_m(S) = \sum\nolimits_{k\in Z} a_{m-1,k}\ \varphi_{m-1,k}(t) + \sum\nolimits_{k\in Z} d_{m-1,k}\ \psi_{m-1,k}(t), \tag{9}$$

де $a_{m-1,k} = \left(S(t), \varphi_{m-1,k}\right) = \int S(t)\varphi_{m-1,k}(t)dt$ – коефіцієнти апроксимації (m-1)-го рівня декомпозиції; $d_{m-1,k} = \left(S(t), \varphi_{m-1,k}\right) = \int S(t)\psi_{m-1,k}(t)dt$ – коефіцієнти деталізації того ж рівня.

Отримані вектори коефіцієнтів прийнято позначати символами:

$$cA_1 = \left\{a_{m-1,k}\right\} \text{ и } cD_1 = \left\{d_{m-1,k}\right\}. \tag{10}$$

При повторенні процедури розкладання за рівнем m до $m = N$, отримуємо кінцеве представлення сигналу у вигляді серії коефіцієнтів, тобто дискретне вейвлет перетворення (ДВП):

$$P_m(S) = \left\{cA_N, cD_N, ..., cD_1\right\}, \tag{11}$$

де cA_N - коефіцієнти апроксимації розкладання (декомпозиції) глибини N;

де cD_m - коефіцієнти деталізації розкладання (декомпозиції) глибини $m = \overline{1, N}$;

Як видно з виразу (9), при здійсненні ДВП виникає проблема обрахунку великої кількості інтегралів з необхідною точністю. Також необхідно враховувати, що при високому значенні m, носії функції $\varphi_{m,k}(t)$ та $\psi_{m,k}(t)$ мають малі значення, порядку $1/2^m$. Для вирішення даної проблеми, застосовують швидке дискретне вейвлет перетворення (ШДВП).

Алгоритм Малла дає можливість визначити коефіцієнти ВП без інтегрування, використовуя алгебраїчні операції на основі згортки.

Якщо виписати функції $\varphi_{m-1,k}(t)$ та $\psi_{m-1,k}(t)$, через базові функції $\varphi_{m,k}(t)$ та $\psi_{m,k}(t)$ простору V_m, отримаємо:

$$\varphi_{m-1,k} = \sum_n h_n \varphi_{m,n+2k}, \quad \psi_{m-1,k} = \sum_n g_n \psi_{m,n+2k},$$

де $\{h_n\}_{n\in Z}$ та $\{g_n\}_{n\in Z}$ - коефіцієнти або фільтри вейвлетів $\varphi(t)$ та $\psi(t)$.

Таким чином, отримуємо формули швидкого ДВП [5]:

$$\begin{aligned} a_{m-1,k} &= (S, \varphi_{m-1,k}) = \sum_n h_n a_{m,n+2k}, \\ d_{m-1,k} &= (S, \psi_{m-1,k}) = \sum_n g_n d_{m,n+2k} \end{aligned} . \qquad (12)$$

Наведені алгоритми не тільки більш швидкі, з точки зору використання алгоритмічних процедур, але і при кожному перетворенні загальне число нових коефіцієнтов не збільшується у 2 рази, а залишається незмінним.

Процедуру можна повторити і таким чином визначити усі коефіцієнти $\{cA_N, cD_N, ..., cD_1\}$ вейвлет перетворення N-го рівня. На практиці найменший можливий масштаб (найбільший рівень декомпозиції) визначається числом N дискретних значень сигналу.

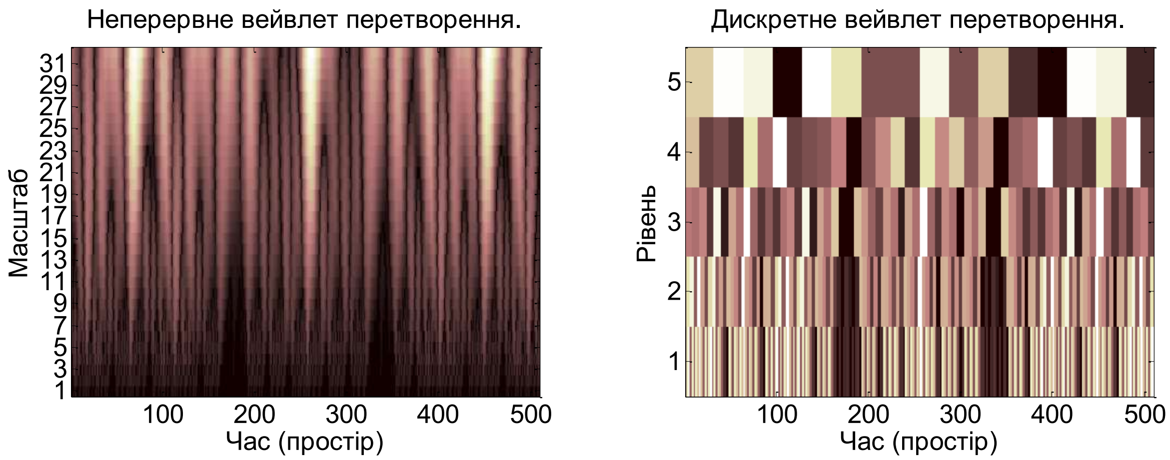
Кожному виду аналізу притаманні певні недоліки та переваги. Виникає задача, якими алгоритмами користуватися в тому чи іншому випадку, який вид аналізу необхідно застосовувати для того чи іншого сигналу.

Коли енергія сигналу кінцева, для аналізу та синтезу, достатньо наявності не всіх коефіцієнтів розкладання. В таких умовах, дискретний аналіз є достатнім, а неперервний – надлишковим.

Коли сигнал аналізується у реальному масштабі часу, або він має дуже коротку тривалість можна використовувати обидва види аналізу. Кожен має свої переваги. Для прикладу розглянемо два різних сигнали. Перший – фрактальний сигнал. В пакеті MatLab є демонстраційний фрактальний сигнал – vonkoch (фрактальна крива Коха), графік якого наведений на рис.4.

Рис. 4. Графік фрактального сигналу

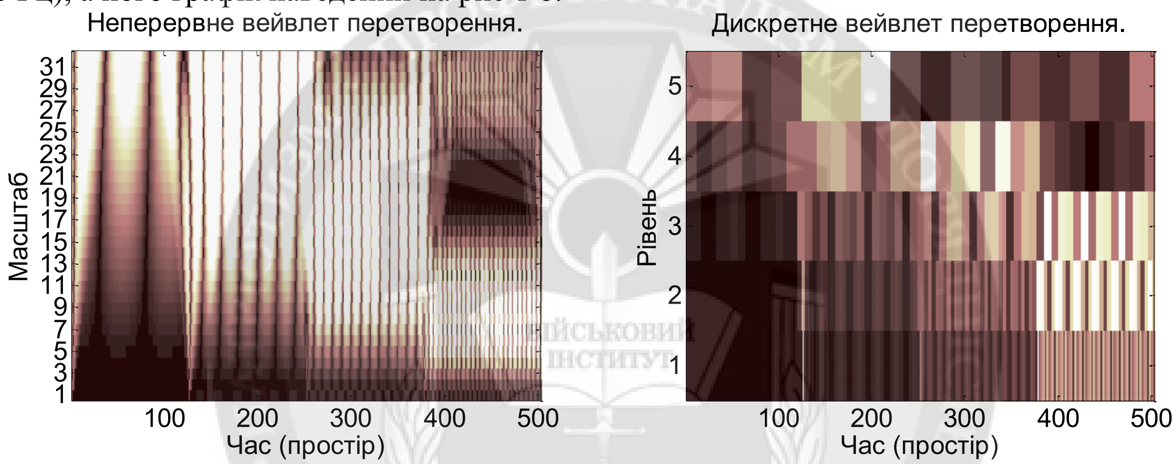
Застосуємо до даного сигналу неперервне та дискретне ВП. Спектрограми перетворень наведені на рис. 5.



а б

Рис. 5. Спектрограми фрактального сигналу: а – неперервне ВП, б – дискретне ВП

Розглянемо наступний нестаціонарний сигнал, який складається з 4 частот (10, 25, 50 та 100 Гц), а його графік наведений на рис 1 б.



а б

Рис. 6. Спектрограма багаточастотного сигналу: а – неперервне ВП, б – дискретне ВП

Після аналізу наведених спектрограм та масиву даних обробки (наприклад у MatLab) можна зробити певні висновки. Дискретний аналіз (ДВП, ШДВП) забезпечує більшу швидкодію, та заощаджує простір кодування. Неперервний аналіз (НВП) часто легше інтерпретувати, оскільки його надмірність прагне зміцнити риси і робить всю інформацію більш помітнішою. Таким чином, отримуємо виграш аналізу у зручності аналізу, але програємо з точки зору економії простору.

Аналіз рис. 2, 5, 6 наочно доводить переваги вейвлет аналізу нестаціонарних сигналів перед аналізом Фур'є, т.я. аналіз Фур'є неспроможний виявити моменти, коли частоти сигналу змінюється, на відміну від ВП (неперервного та дискретного).

Застосування вейвлет аналізу вирішує багато практичних завдань, одним з яких є прогнозування відмов пристроїв різного виду (електромеханічних, радіоелектронних, газотурбінних та ін.). Багатомасштабний метод вейвлет аналізу виявляється високоефективним методом аналізу складних фізичних сигналів на різних масштабах та у спеціально визначених точках (контрольних точках). Такий метод дозволяє виявити відмову значно раніше ніж при застосуванні інших методів [2].

Загальний підхід до прогнозування відмов з застосуванням вейвлет-аналізу та статистичної обробки результатів можна звести до наступної методики:

1. Визначається параметр, зміна якого призводить до відмови (руйнуванню) пристрою.

2. За допомогою спеціальних приладів (датчиків) значення визначеного параметру

трансформуються в електричний сигнал та переводяться в цифрову форму.

3. Застосовується вейвлет-аналіз та аналізуються значення трансформованого параметру.

3.1. Для кожного виду об'єкту техніки та прогностичного параметру визначається вид материнського вейвлету.

3.2. Вейвлет аналіз проводиться в різних режимах роботи об'єкту техніки до настання моменту відмови. Час проведення аналізу визначається окремо для кожного виду техніки.

3.3. Проводиться статистична обробка результатів вейвлет аналізу. Оскільки, в більшості випадків досліджуємий сигнал флуктуює у часі, флуктуюють і його вейвлет коефіцієнти. Статистичною оцінкою флуктуацій можуть виступати дисперсії розподілів на різних масштабах: $\sigma(m,l) = \sqrt{\frac{1}{l-1}\sum_{k=0}^{l-1}[d_{m,k} - \overline{d_{m,k}}]^2}$, де l – кількість вейвлет коефіцієнтів на рівні m у визначеному для аналізу інтервалі часу.

4. Різка зміна (зменшення або збільшення) значення дисперсії говорить про знаходження об'єкту у передвідмовному стані.

Практичні досліди та об'єм опрацьованої літератури говорить, що:

– час до відмови залежить від об'єкту та прогностичного параметру;

– найбільш інформативні показники дисперсії, як правило, виявляються при аналізі вейвлет коефіцієнтів вищих масштабів.

Також, в якості статистичної оцінки можна використовувати середнє значення суми деталізуючих вейвлет коефіцієнтів [7]: $K_{m,k} = \frac{1}{D}\sum_{m=1}^{N}\sum_{k \in Z} d_{m,k}$, де D – загальна кількість коефіцієнтів вейвлет аналізу, або проводити аналіз коефіцієнтів $K_{1,k}$, $K_{2,k}$, $K_{N,k}$ кожного рівня декомпозиції.

Наступна прикладна задача, яку можна розв'язати із застосуванням вейвлет перетворення це задача розрізнення повітряних цілей засобами радіолокації (по матеріалам [6]).

Такий метод [6, 8] заснований на процедурі розпізнавання тонкої структури сигналу складної цілі, характерною ознакою якого, є наявність стрибків сигнальної обвідної в області перекриття сигналів від одиночних цілей за рахунок інтерференції, обумовленої випадковими змінами фази. В якості відбитого сигналу розглядається та аналізується сигнал у вигляді цифрової біквантованої пачки.

В узагальненому вигляді, задачу розрізнення можна звести до наступної методики:

1. Виділяється обвідна функція пачки відбитих імпульсів від цілі (цілей).

2. Перетворюється обвідна функція в цифрову біквантовану пачку імпульсів.

3. До отриманої біквантованого сигналу застосовується вейвлет-аналіз. Сигнал розкладається на вектори апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів $\{cA_N, cD_N, ..., cD_1\}$ до 4 рівня декомпозиції. Найбільш інформативними виявляються коефіцієнти декомпозиції 1-го нижнього рівню.

5. Вектор деталізюючих коефіцієнтів $\{cD_1\}$ 1-го рівня являє собою дискретну випадкову величину, яку можна охарактеризувати числовим статистичним параметром. Найбільш інформативним параметром було визначено [6] квадрат норми $norm^2(cD_1)$ вектору коефіцієнтів ВП нижнього рівня.

6. Порівнюючи статистичну оцінку з вибраним порогом (вибір значення порогу виходить за межі даної статті), отримуємо рішення «ціль одинична», або «ціль групова».

Висновки. Широкий спектр практичних задач базується на дослідженні та аналізі різноманітних сигналів, фізична природа яких може бути різною. Обробка сигналів із застосуванням вельвет перетворення виявляється більш ефективним у порівнянні з традиційним перетворенням Фур'є в задачах аналізу нестаціонарних сигналів, неоднорідних полів, зображень різної природи та ін.

Задача вибору того чи іншого вейвлету носить суб'єктивний характер, в основному базується на практичному досвіді науковця (інженера) та вимагає дослідження для кожного конкретного випадку.

Вибір виду ВП також носить суперечливий характер, дискретний аналіз за швидкодією кращій за неперервний, однак його графічна інтерпретація гірша. ДВП заощаджує комп'ютерні потужності, але втрачається деяка частина корисної інформації.

Узагальнений підхід до задачі прогнозування відмов та розрізнення радіолокаційних цілей, причому статистичний аналіз деталізуючих коефіцієнтів ВА нижніх рівнів декомпозиції виявляється найбільш інформативним.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие / А.Н. Яковлев. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 104 с.

2. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. –2001. – Т. 171. – № 5. – С. 465–501.

3. Мистецкий В. Непрерывное wavelet преобразование. / В. Мистецкий https://habrahabr.ru/post/103899.

4. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб.: БХВ. Петербург, 2008. – 816 с.

5. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. / Н.К.Смоленцев. – М.:ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

6. Долгушин В.П. Распознавание класса целей методом оценки статистических параметров вектора вейвлет-декомпозиции сигнала / В.П.Долгушин, В.Н. Лоза, А.Н. Борзак, Б.Г. Жиров // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – №45. – С.24–33.

7. Загірняк М.В. Діагностика пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів за аналізом електрорушійної сили в обмотках статора / М.В. Загірняк, Ж.І. Ромашихіна, А.П. Калінов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2014. – №6. – С.34–42.

8. Долгушин В.П. Статистический анализ спектрально-временных параметров эхо-пачки сосредоточенной парной цели / В.П.Долгушин, Е.С.Ленков, В.Н.Лоза, Р.Ю. Кольцов // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – №43. – 35 - 44 с.

REFERENCES:

1. Jakovlev A. Vvedenye v vejvlet-preobrazovanyja: Ucheb. Posobye, (2003), Novosybyrsk: NGTU, 104.

2. Dremyn Y., Yvanov O., Nechytajlo V. Vejvletы y yh yspol'zovanye, (2001), Uspehy fyzycheskyh nauk, T 171, № 5, 465–501.

3. Mysteckyj V. Nepreryvnoe wavelet preobrazovanye. https://habrahabr.ru/post/103899.

4. Solonyna A., Arbuzov A. Cyfrovaja obrabotka sygnalov. Modelyrovanye v MATLAB (2008), S. – SPb.: BHV. Peterburg, 816.

5. Smolentsev N. Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB. (2005), M.:DMK Press, 304.

6. Dolgushin V., Loza V., Borzak A., Zhirov B. Rasspoznavanie klassa tselei metodom otsenki statisticheskih parametrov vektora veivlet-dekompozitsii signala, (2014), Zbirnik naukovih prats Viis'kovogo institutu Kiïvs'kogo natsional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka, №45, 24–33.

7. Zagirniak M., Romashihina, Kalinov A. Diagnostika poshkodzhen' strizhniv rotora asinhronnih dviguniv za analizom elektrorushiinoï sili v obmotkah statora, (2014), Elektrotehnika i Elektromehanika, №6, 34–42.

8. Dolgushin V., Lenkov E., Loza V., Kol'tsov R. Statisticheskii analiz spektral'no-vremennyh parametrov eho-pachki sosredotochennoi parnoi tseli, (2014), Zbirnyk naukovyh prac' Vijs'kovogo instytutu Kyi'vs'kogo nacional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka, № 43, 35–44.

Рецензент: д.т.н., проф. Барабаш О.В., професор кафедри інформаційних технологій**,** Київський національний університет імені Тараса Шевченка

к.т.н., с.н.с. Жиров Г.Б., к.т.н., с.н.с. Хлапонин Ю.И., Жиров Б.Г.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассмотрена проблема анализа сигналов с помощью различных методов: Фурье преобразования, непрерывного и дискретного вейвлет преобразования. Установлено, что для анализа нестационарных сигналов целесообразно применять вельвет преобразование (вейвлет анализ). Вейвлет анализ дает уникальные возможности распознавать локальные и «тонкие» особенности сигналов (функций), что важно во многих областях радиотехники, связи, радиоэлектроники, геофизики и других областях науки и техники.

Обобщены подходы к анализу тонкой структуры сигнала для решения задач прогнозирования отказов технических объектов и разрешения воздушных целей средствами радиолокации.

Ключевые слова: тонкая структура сигнала, вейвлет анализ, Фурье анализ, прогнозирование отказов, разрешение целей.

Ph.D. Zhyrov Genadiy, Ph.D. Khlaponin Yuriy, Zhyrov Borys

METHODS OF ANALYSIS OF SMALL NON-STATIONARY SIGNALS

In the article the problem of signal analysis using different methods: Fourier transform, continuous and discrete wavelet transform. Established that for the analysis of non-stationary signals appropriate to apply the same corduroy transformation (wavelet analysis). Wavelet analysis provides a unique opportunity to recognize local and "thin" signal features (functions), which is important in many areas of radio engineering, communications, electronics, geophysics and other fields of science and technology.

Summarizes approaches to the analysis of the fine structure of the signal to meet the challenges of forecasting failures of technical objects and permits air targets radar means.

Keywords: subtle signal structure, wavelet analysis, Fourier analysis, forecasting failures, resolution goals.