

УДК 519.6:621. (045)

Товкач С. С., Єнчев С. В.  
Національний авіаційний університет, Київ

## АДАПТИВНИЙ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТР ДЛЯ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЇ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

*Стаття присвячена питанням вейвлет-фільтрації сигналів отриманих з датчиків електронних систем керування авіаційними газотурбінними двигунами. Розглядається задача побудови адаптивного фільтра на основі вейвлету Добеші. Наводяться оцінені середньоквадратичні значення похибки фільтрації пропонованого фільтра на основі вейвлету Добеші*

**Вступ.** В останні роки актуальним стало питання модернізації авіаційної техніки, у тому числі шляхом модернізації двигунів та їх систем автоматичного керування (САК). Задача полягає в отриманні максимального ефекту з мінімальними матеріальними затратами. Зокрема, при збереженні тих же функцій, вартість САК вдається скоротити шляхом застосування сучасної дешевшої елементної бази і скорочення числа електронних блоків, задіяних в САК. Поряд з цим з'являється можливість поліпшити якість роботи САК шляхом доопрацювання і ускладнення алгоритмів управління, вдосконалення системи діагностики, ввести облік напрацювання та технічного стану двигуна. Розробка нових і адаптація наявних математичних методів в процесі створення САК газотурбінних двигунів (ГТД) є актуальною задачею. Вона комплексна і зводиться на різних етапах до вирішення різних математичних та інженерних задач. Відомо, що отримані дані з реальних двигунів найчастіше зашумлені, виникає питання обробки даних, виділення корисного сигналу.

**Постановка проблеми.** З огляду на це пропонується новий підхід, заснований на перевагах вейвлет-аналізу зашумленого сигналу з перешкодою і використанням адаптивно-порогової техніки, що дає можливість встановити поріг на основі параметрів, що характеризують статистичні властивості сигналу з шумом. Адаптивні пристрої обробки даних відрізняються наявністю певного зв'язку параметрів передавальної функції з параметрами вхідних, вихідних та інших додаткових сигналів. Ці властивості адаптивних систем дозволяють приймальній системі «самій» настроюватися на оптимальну обробку сигналів. В основному адаптивна фільтрація застосовується для

очищення даних від нестабільних заважаючих сигналів і шумів, що перекриваються спектром зі спектром корисних сигналів. Також адаптивна фільтрація може застосовуватися, коли смуга заважаючих частот невідома, змінна і не може бути задана заздалегідь для розрахунку параметричних фільтрів. Ці властивості роблять адаптивні системи найбільш придатними для обробки сигналів з малим відношенням сигнал / шум [1]. Проте результати застосування адаптивної фільтрації для аналізу сигналів в значній мірі залежать як від відношення сигнал / шум, так і від властивостей самого сигналу. Крім того, найбільш слабким місцем є вибір порогу при необхідності усунення перешкоди і діагностики корисного сигналу.

**Розробка адаптивного вейвлет-фільтра.** Вейвлет-перетворення широко застосовують для аналізу сигналів та стиску інформації. Вейвлети необхідні у багатьох дослідженнях. Їх використовують у тих випадках, коли результат аналізу деякого сигналу повинен містити не лише просте перелічення його характерних частот (масштабів), але і відомості про визначені локальні координати, при яких ці частоти себе виявляють. Отже, аналіз і обробка нестационарних (в часі) або неоднорідних (в просторі) сигналів різних типів є основним полем застосування вейвлет-аналізу. Область використання вейвлетів не обмежується аналізом властивостей сигналів і полів різноманітної природи, отриманих чисельно, в експерименті або при спостереженні. Вейвлети починають застосовуватися і для прямого чисельного моделювання як ієрархічний базис [1], який добре пристосований для опису динаміки складних нелінійних процесів, що характеризуються взаємодією збурень у широких діапазонах просторових і часових частот.

Розглянемо адаптивну фільтрацію спостережуваного сигналу, одержуваного на виході вимірювального пристрою (ВП).

Припустимо, що на вхід адаптивного фільтру (АФ) на основі вейвлету Добеші надходить корисний сигнал на  $x(t)$ , на який накладається похибка ВП  $v(t)$ , так що вхідний спостережуваний сигнал  $y(t)$  має вигляд:

$$y(t) = x(t) + v(t). \quad (1)$$

Детермінований корисний сигнал  $x(t)$  описується виразом

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t), \quad (2)$$

де  $f_0 = \frac{1}{T_0}$ . Тут  $A$  – невідома амплітуда;  $f_0$  – відома частота, Гц;  $T_0$  – період гармонічних коливань.

Кореляційна функція  $v(t)$  описується співвідношенням

$$K_v(\tau) = C \cdot \delta(\tau), \quad (3)$$

де  $\delta(\tau)$  – узагальнена дельта-функція;  $C$  – невідома інтенсивність білого шуму. Таким чином, невідомі параметр  $A$  сигналу  $x(t)$  і параметр  $C$  кореляційної функції  $K_v(\tau)$ .

Необхідно шляхом відповідної обробки (фільтрації) зменшити вплив похибки ВП  $v(t)$ . Зі співвідношення (1) маємо

$$y[i] = x[i] + V[i], \quad i = \overline{1, n_2}, \quad (4)$$

де  $y[i] = y(t_i)$ ;  $x[i] = x(t_i)$ ;  $V[i] = V(t_i)$ ;  $t_i = i\Delta t$ ;  $\Delta t$  – інтервал дискретності вимірювання сигналу  $y(t)$ .

Сигнал  $V[i]$  є дискретний білий шум з нульовим математичним сподіванням і дисперсією  $\sigma_v^2$  [2,3]:

$$\sigma_v^2 = \frac{C}{\Delta t}. \quad (5)$$

Отже,  $V[i]$  є послідовність незалежних нормально розподілених випадкових величин з параметрами  $(0, \sigma_v^2)$ .

Розглянемо побудову АФ на основі ортогонального вейвлету Добеші. Вейвлет-перетворення застосовується, зокрема, для фільтрації сигналів. У вейвлетному перетворенні в якості вагових коефіцієнтів значень сигналу виступають вейвлетні функції [3]. Вейвлети характеризуються своїм часовим і частотними образами. Часовий образ визначається деякою

psi-функцією  $\psi(t)$  часу. А частотний образ визначається її Фур'є-образом  $\psi(\omega)$ , який задає огинаючу спектра вейвлету [4]. Фур'є-образ визначається виразом:

$$\psi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (6)$$

Вибираємо для адаптивної фільтрації сигналу  $y[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$  вейвлет Добеші. АФ на основі вейвлета Добеші будемо будувати на базі пакету розширення системи MatLab 7.0 Wavelet Toolbox [4].

Функція  $m = wden(y, tptr, sorh, scal, N, 'wname')$  повертає очищений від шуму сигнал  $m$ , отриманий обмеженням вейвлет-коефіцієнтів перетворення вхідного сигналу  $y$ . Рядок  $tptr$  задає правило вибору порогу. Було вибрано правильно 'heursure', що означає евристичний варіант алгоритму Штейна незміщеної оцінки ризику. Параметр  $sorh$  приймав значення 's', що відповідає вибору гнучкого порогу для видалення шумів шляхом обмеження вейвлет-коефіцієнтів. Рядок  $scal$  визначає мультиплікативне порогове перемасштабування (якщо шум поза межами  $[0,1]$  або не білий). Було вибрано значення 'sln', що відповідає перемасштабу з використанням єдиної оцінки рівня шуму, заснованого на коефіцієнтах першого рівня. Параметр 'wname' задає ім'я вейвлета. Було вибрано значення 'db10', що відповідає вейвлету Добеші. Параметр  $N$  означає рівень декомпозиції або кількість коефіцієнтів вейвлет-перетворення. Було вибрано  $N = 8$ .

Таким чином, АФ на основі вейвлета Добеші в системі MatLab 7.0 реалізується програмно у вигляді команди:

$$m = wden(y, 'heursure', 's', 's ln', 8, 'db10').$$

Сигнал на виході АФ  $m[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$  – являє собою сигнал  $y[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$  на вході фільтра, очищений від шуму.

Процедура видалення шуму полягає у видаленні складової шуму в сигналі  $y[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$  і відновленні складової  $x[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$  і включає в себе три кроки [4]:

1. Розкладання. Вибір вейвлета та рівня декомпозиції  $N$ . Вейвлет-розклад сигналу  $y[i]$ ,  $i = \overline{1, n_2}$ .

2. Деталізація. Для кожного рівня від 1 до  $N$  вибирається певний поріг і застосовується гнучкий поріг для деталізуючих коефіцієнтів.

3. Відновлення. Вейвлет-відновлення, засноване на вихідних коефіцієнтах апроксимації на рівні  $N$ , модифікація детальних коефіцієнтів на рівнях від 1 до  $N$ .

Визначимо помилку фільтрації для АФ на основі вейвлету Добеші. Маємо:

$$\varepsilon[i] = m[i] - x[i], i = \overline{1, n_2}. \quad (7)$$

Позначимо через  $\mathcal{E}_\varepsilon$  оцінку середньоквадратичного значення помилки фільтрації для АФ на основі вейвлету Добеші. Величина  $\mathcal{E}_\varepsilon$  обчислюється за формулою:

$$\mathcal{E}_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \varepsilon^2[i]}. \quad (8)$$

Величина  $\mathcal{E}_\varepsilon$  характеризує якість роботи АФ на основі вейвлету Добеші.

АФ на основі вейвлету Добеші був змодельований на ЕОМ за допомогою програмного продукту MatLab 7.0 [5]. Були прийняті наступні значення параметрів:  $\Delta t = 0,01$ ;  $f_0 = 0,5$ ;  $T_0 = 2$ ;  $n_2 = 1000$ ;  $A = 5$ . Параметр  $\sigma_v$  приймав значення 1, 2, 3, 4, 5, 10. Результати моделювання наведені в табл. 1 і на рис. 1-4.

Таблиця 1

Результати моделювання

$\sigma_v$	wname	$N$	$\mathcal{E}_\varepsilon$	$\sigma_v / \mathcal{E}_\varepsilon$
1	'db10'	8	0,06	16,67
2	'db10'	8	0,09	22,22
3	'db10'	8	0,23	13,04
4	'db10'	8	0,33	12,12
5	'db10'	8	0,45	11,11
10	'db10'	8	2,08	4,81

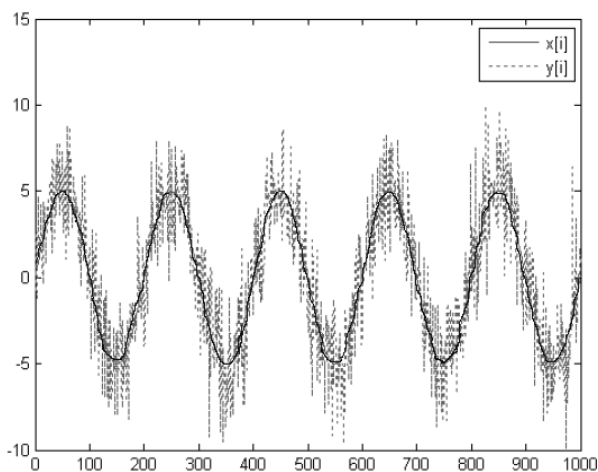


Рис.1. Графіки  $x[i], y[i], i = \overline{1, n_2}$  для  $\sigma_v = 2$

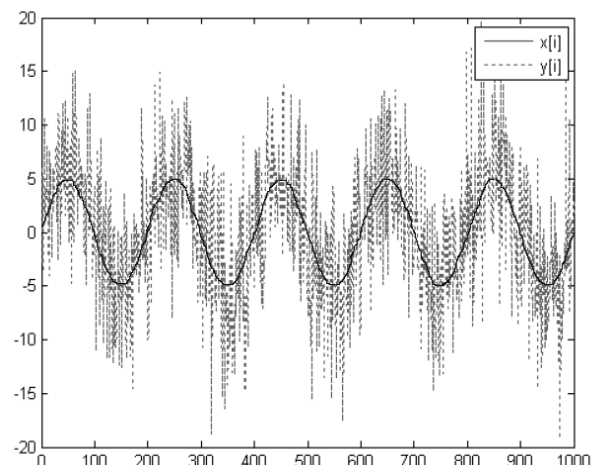


Рис.3. Графіки  $x[i], y[i], i = \overline{1, n_2}$  для  $\sigma_v = 5$ .

На рис. 1 для  $\sigma_v = 2$ . приведені графіки  $x[i], y[i], i = \overline{1, n_2}$ .

На рис. 2 для  $\sigma_v = 2$  показані графіки  $x[i], m[i], i = \overline{1, n_2}$ .

На рис. 3 для  $\sigma_v = 5$  наведені графіки  $x[i], y[i], i = \overline{1, n_2}$ .

На рис. 4 для  $\sigma_v = 5$  показані графіки  $x[i], m[i], i = \overline{1, n_2}$ .

На рис. 5 показана пропонується блок-схема адаптивної вейвлет-фільтрації. Фільтрація сигналу виконується наступним чином:

- збір даних зразкового сигналу, розклад (декомпозиція) сигналу по базисним вейвлет-функціям;

• обчислення порогів функції для кожної смуги розкладу в залежності від статистичних властивостей сигналу за даними дисперсії відповідно до формули  $T_{адн,j} = \sigma_j \sqrt{2 \log n}$ , де

$\sigma_j^2 = Dx_j$  – дисперсія вейвлет-коефіцієнтів у  $j$ -й смугі;

- порогова обробка коефіцієнтів;
- зворотнє вейвлет-перетворення.

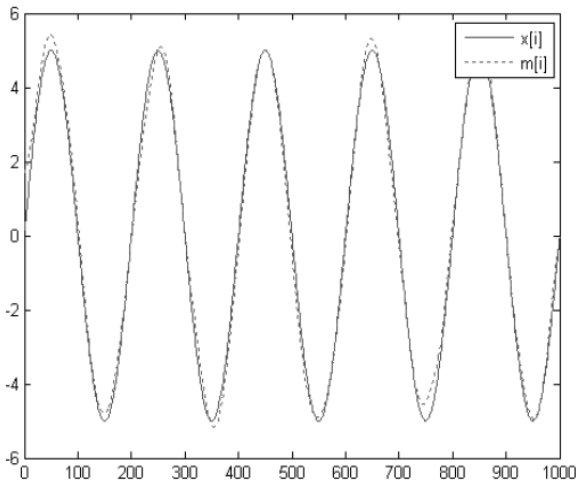


Рис.2. Графіки  $x[i], m[i], i = \overline{1, n_2}$  для  $\sigma_v = 2$

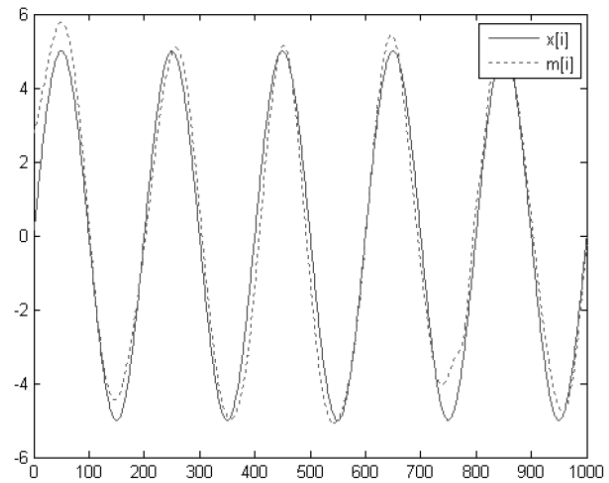


Рис.4. Графіки  $x[i], m[i], i = \overline{1, n_2}$  для  $\sigma_v = 5$ .

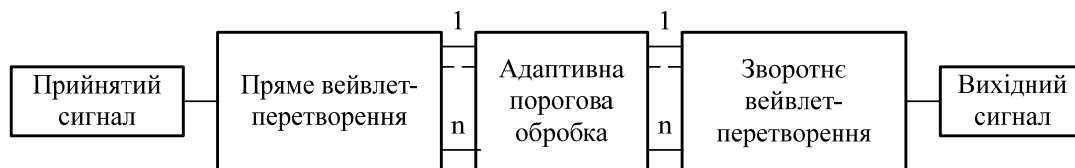


Рис.5. Блок-схема адаптивної вейвлет-обробки сигналу

### Висновок

Таким чином, виконано побудову АФ на основі вейвлету Добеші, зроблена оцінка якості роботи цього фільтра. Розроблений вейвлет-фільтр дозволяє проводити спектральний аналіз реальних сигналів, отриманих в результаті проведення експериментальних досліджень. Застосування вейвлет-перетворення дозволяє детально розглядати сигнал, досліджувати ті області сигналу, які можуть містити інформацію про пошкодження. Цей метод дозволяє діагностувати пошкодження на ранніх стадіях, коли вони не помітні при зовнішньому огляді. Подальший розвиток цієї області дозволить виявляти дефекти і місця їх дислокації, знижуючи експлуатаційні витрати та дозволить найбільш ефективно використовувати двигуни.

### Список літератури

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. / С. Малла – М.: Мир, 2005. – 671 с.
2. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Наука, 1991. – 100 с.
3. Пахомов Г.И., Пахомов Ю.Г. Применение вейвлетов для обработки сигналов // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления / Г.И. Пахомов, Ю.Г. Пахомов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 86 с
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практики / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 440 с.
5. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MatLab 7.0 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями / Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.