

УДК 519.876.2:629.735.03(043.2)

В.В. ПАНІН<sup>1</sup>, С.В. ЄНЧЕВ<sup>2</sup>, С.С. ТОВКАЧ<sup>2</sup><sup>1</sup>Київська державна академія водного транспорту ім. П.К. Сагайдачного, Київ, Україна<sup>2</sup>Національний авіаційний університет «НАУ», Київ, Україна

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ІМПУЛЬСІВ У ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМИ ГТД ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

*Стаття присвячена розв'язку задачі автоматичної ідентифікації імпульсних сигналів в електронних системах керування, що в процесі діагностування двигунів за реєстрованими параметрами є визначальним для ефективності діагностування. Розглядається спосіб ідентифікації послідовності імпульсів у електронних системах керування авіаційними газотурбінними двигунами за допомогою вейвлет-аналізу. Описана ідея кратномасштабного аналізу на найпростішому прикладі – вейвлетах Хаара. Наведено процедуру пірамідального розкладу, а також її практичну реалізацію на прикладі вейвлета Добеші.*

**Ключові слова:** ідентифікація, дискретне вейвлет-перетворення, автоматизація, апроксимація, кратномасштабний аналіз, скейлінг-функції, фільтр.

### Вступ

У загальному випадку ідентифікація розуміється як ступінь співвідношення апріорної теоретичної і емпіричної інформації про деякий реальний об'єкт з тим, що отримана на основі її сполучень модель в принципі ототожнюється з реальністю (ідентифікованою) [1]. Також поширене визначення ідентифікації як ототожнення моделі з об'єктом у сенсі пошуку оцінки оператора, який зв'яже вихід моделі деякого об'єкта зі входом. В цьому випадку під визначення підпадають як методи оцінювання параметрів моделей типу найменших квадратів або максимального правдоподібності, так і адаптивні методи прогнозування.

Розв'язок задачі ідентифікації послідовності імпульсів в електронних системах керування (ЕСК) в процесі діагностування двигунів за реєстрованими параметрами є визначальним для ефективності діагностування.

### 1. Постановка проблеми

Розглянемо випадок, коли кожен елемент деякого ансамблю електронної системи керування ГТД передають сигнали однієї і тієї ж форми і амплітуди, причому форма сигналів різних елементів не є ідентичною, а амплітуда залежить від відстані між конкретним елементом і точкою реєстрації (рис. 1).

Теоретично, задача ідентифікації полягає в тому, щоб з експериментальних даних виділити кілька послідовностей, які збігаються за формою імпульсів, кожна з яких, імовірно, генерується якимось одним

елементом малого ансамблю. В ідеалі, в просторі характеристик, що описують форму імпульсів, повинні утворитися кластери, які відповідають динаміці окремих елементів.

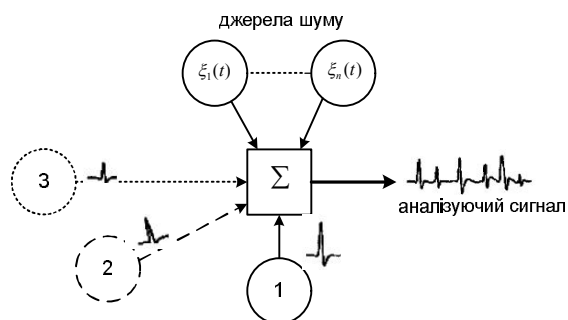


Рис. 1. Сигнали окремих елементів в сумарному відгуку ансамблю даних елементів

Якщо вдається розрізнити деяку кількість кластерів і відокремити їх один від одного, то завдання ідентифікації може вважатися успішно вирішеною. Однак на практиці ця задача є технічно дуже складною через істотний рівень фоновому шуму, який адитивно додається до сигналу і призводить до різних спотворень форми імпульсів. Шум може мати різну природу, і його спектр перекривається зі спектром сигналу, що значно ускладнює фільтрацію. Даний фактор обумовлює появу неминучих помилок ідентифікації.

Задача ідентифікації послідовності імпульсів може вирішуватися шляхом візуального зіставлення їх форми і розділення по групах вручну. Такий підхід слід визнати неефективним через велику кіль-

кість даних, які потрібно проаналізувати і розсортувати, людина, яка вирішує дану задачу візуально, буде вимушена приймати суперечливі рішення про приналежність конкретного імпульсу до тієї чи іншої групи шляхом досить швидкого перегляду його форми, що збільшує число неправильно класифікованих імпульсів, тобто помилку ідентифікації [1,2]. В силу цих обставин виникає необхідність автоматизації процесу поділу реєстрованих імпульсів по групах.

Проблемі автоматичної ідентифікації імпульсних сигналів посвячено багато робіт [2,5,7]. До числа простих способів поділу імпульсів відноситься порогове сортування (або амплітудне детектування) і різні геометричні методи. Сортувати імпульси, вводючи пороговий рівень, вдається далеко не завжди. Якщо сигнали, що фіксуються в точці реєстрації від різних елементів, є порівнянними за амплітудою (така ситуація виникає у разі, коли відстані від точки реєстрації до цих елементів є приблизно однаковими), то порогове сортування не дозволить забезпечити їх якісну ідентифікацію.

В останні роки для вирішення даної задачі стали застосовувати вейвлет-аналіз.

## 2. Ідентифікація імпульсних сигналів на основі вейвлет-аналізу

Ідентифікація імпульсних сигналів на основі вейвлет-аналізу заснована на коефіцієнтах дискретного вейвлет-перетворення (ДВП). Розглянемо основні деталі даного підходу.

Неперервне вейвлет-перетворення передбачає розкладання сигналу  $f(t)$  по базису, сконструйованому із солітоноподібної функції  $\psi(t)$ . В рамках цього підходу проводяться масштабні перетворення тільки однієї функції – «материнського» вейвлету. Кратномасштабний аналіз базується на іншій ідеології. Він використовує ортонормовані базиси вейвлетів, щоб здійснювати математичний опис «прирощення інформації», необхідний для переходу від грубого наближення до більш точного [5]. Ця концепція вперше виникла при вирішенні прикладних задач аналізу зображень. Вона передбачає послідовні наближення до досліджуваного сигналу  $f(t)$  на різних масштабах. Фактично мова йде про те, щоб апроксимувати сигнал на деяких інтервалах і проаналізувати відхилення від апроксимуючих функцій. У цьому контексті простежується схожість з алгоритмом аналізу флуктуацій відносно тренду (АФТ), але кратномасштабний аналіз є більш потужним інструментом, в рамках якого апроксимуючі функції на різних рівнях роздільної здатності взаємопов'язані і ортогональні один одному при зсувах

вздовж часової осі. Звідси випливає, що далеко не будь-яка функція може використовуватися для апроксимації. Метод АФТ є значно простішим підходом, коли застосовувані для апроксимації локального тренда функції на різних масштабах ніякими математичними формулами не пов'язані, вибираються довільним чином, і ця обставина обмежує можливість даного методу. На відміну від кратномасштабного аналізу, метод АФТ не підходить для вирішення завдань синтезу і не дозволяє характеризувати взаємозв'язок флуктуації відносно тренду при масштабних перетвореннях.

Проілюструємо ідею кратномасштабного аналізу на найпростішому прикладі – вейвлетах Хаара. В рамках даного підходу вводиться в розгляд скейлінг-функція  $\varphi(t)$ , яку іноді називають масштабною функцією або «материнським» вейвлетом. Для скейлінг-функції виконується властивість:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1, \quad (1)$$

тобто її середнє значення не дорівнює нулю, як у випадку «материнського» вейвлету  $\psi(t)$ . Для вейвлетів Хаара вигляд функцій  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$  зображений на рис.2, а.

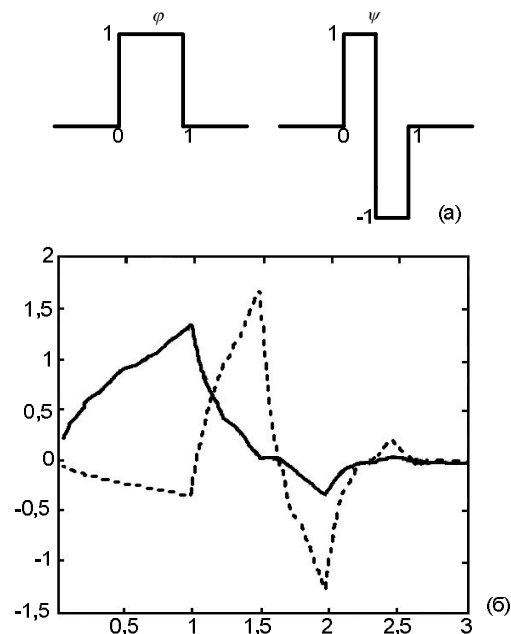


Рис. 2. Скейлінг-функції і вейвлети Хаара (а) і Добеші  $D^4$  (б)

На рис. 2, б  $\varphi(t)$  зображена суцільною лінією,  $\psi(t)$  – пунктиром. Їх перемасштабування призводить до наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi(2t) + \varphi(2t-1), \\ \psi(t) &= \varphi(2t) - \varphi(2t-1), \end{aligned} \quad (2)$$

із яких стає ясним відмінність між ними. При про-

веденні аналізу сигналів функції  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$  відіграють роль фільтрів нижніх і верхніх частот.

Введемо наступне позначення:

$$\varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{2^{j/2}} \varphi\left(\frac{t}{2^j} - k\right). \quad (3)$$

При різних значеннях масштабу спостереження і зсуву, які характеризуються параметрами  $j$  і  $k$ , можна обчислити коефіцієнти апроксимації

$$s_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{j,k}(t) dt. \quad (4)$$

Для вибраного рівня роздільної здатності отримані коефіцієнти називають *дискретною апроксимацією* сигналу на масштабі  $j$ . Підсумовування скейлінг-функцій з відповідними коефіцієнтами дозволяє отримати так звану *неперервну апроксимацію* сигналу  $x(t)$  на даному масштабі [6]:

$$x_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_{j,k} \varphi_{j,k}(t). \quad (5)$$

На малих масштабах ця неперервна апроксимація наближається до аналізованого сигналу  $x(t)$ . Для ілюстрації розглянемо приклади апроксимації для одного періоду синусоїди, представленого на рис. 3.

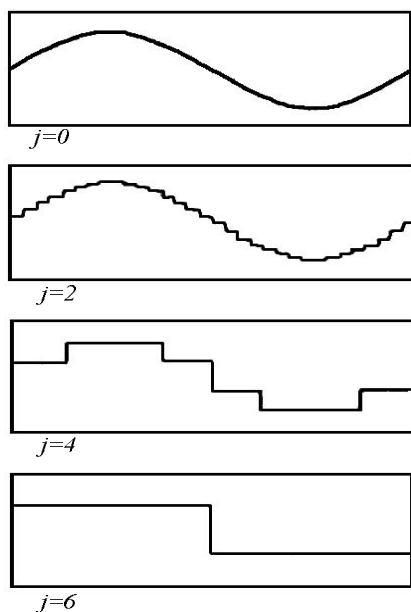


Рис. 3. Апроксимація синусоїди на різних рівнях роздільної здатності  $j$

### 3. Аналіз флуктуацій тренду за допомогою вейвлетів

Використовуваний варіант скейлінг-функції (рис. 2, а) є доволі простим і представляє цінність через наочність опису. Застосовувані на практиці сімейства вейвлетів і відповідних їм функцій  $\varphi(t)$  зазвичай мають значно більш складний вигляд (див.,

наприклад, рис. 2, б), однак до них застосовні всі формули, записані для вейвлетів Хаара, тому ми продовжимо опис теорії кратномасштабного аналізу для найбільш простого випадку, маючи на увазі, що використовуватися він може і для інших базисів. Ідеологія неперервної апроксимації дозволяє здійснювати опис «тренду» аналізованого процесу на вибраному масштабі спостереження, після чого може бути проведений детальний аналіз флуктуації щодо цього тренду за допомогою вейвлетів.

Будь-яку функцію  $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$  на деякому довільному рівні роздільної здатності  $j_n$  можна розкласти в ряд виду:

$$x(t) = \sum_k s_{j_n,k} \varphi_{j_n,k}(t) + \sum_{j \leq j_n} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t). \quad (6)$$

Для вибраного масштабу (рівня роздільної здатності)  $j_n$  можна записати наступний вираз:

$$x(t) = x_{j_n}(t) + \sum_{j \leq j_n} \mu_j(t). \quad (7)$$

На основі формули (8) можна записати:

$$x_{j-1}(t) = x_j(t) + \mu_j(t), \quad (8)$$

тобто якщо до апроксимації на довільному вибраному масштабі  $j$  додати деталізацію сигналу  $\mu_j(t)$ , яка описує флуктуації щодо апроксимуючого тренду, то буде отримана апроксимація на наступному, більш детальному рівні роздільної здатності  $(j-1)$ . В цьому і полягає основна ідея кратномасштабного аналізу або, в термінології деяких робіт, багатомасштабного аналізу [5].

У загальному випадку взаємозв'язок функцій  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$  з їх перемасштабованими і зміщеними модифікаціями можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} h_k \varphi(2t-k), \\ \psi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} g_k \varphi(2t-k), \end{aligned} \quad (9)$$

де існування множника  $\sqrt{2}$  пов'язано з традиційною формою швидких алгоритмів і нормування функцій  $\varphi_{j,k}(t)$  і  $\psi_{j,k}(t)$ , а параметр  $M$  визначає довжину області завдання вейвлету (наприклад, для вейвлету Хаара  $M=1$ ). Зазначимо, що коефіцієнти  $h_k$  і  $g_k$  взаємопов'язані [3, 6]:

$$g_k = (-1)^k h_{2M-k-1}. \quad (10)$$

Ці коефіцієнти не є довільними, а визначаються, виходячи із властивостей скейлінг-функцій і вейвлетів. Розглянемо приклад їх обчислень для випадку  $M=2$ . Враховуючи ту обставину, що зміщені один відносно одного скейлінг-функції є ортогональними, можна записати наступну рівність:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t)\varphi(t-l)dt = \delta_{0l}. \quad (11)$$

Підставивши вираз (11), отримаємо перше обмеження на коефіцієнти фільтра  $h_k$ :

$$\sum_k h_k h_{k+2l} = \delta_{0l}. \quad (12)$$

Умова  $\int_{-\infty}^{\infty} t^n \psi(t)dt = 0$ , що дозволяє ігнорувати повільну нестационарність (поліноміальний тренд) для  $n = 0, \dots, M-1$ , приводить до виразу

$$\sum_k k^n g_k = \sum_k (-1)^k k^n h_k = 0. \quad (13)$$

Накінець, з умови нормування (1) запишемо:

$$\sum_k h_k = \sqrt{2}. \quad (14)$$

Для окремого випадку ( $M=2$ ) останні 3 формули, записані в явному вигляді, приводять до системи рівнянь:

$$\begin{aligned} h_0 h_2 + h_1 h_3 &= 0, \\ h_0 - h_1 + h_2 - h_3 &= 0, \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 &= 0, \\ h_0 + h_1 + h_2 + h_3 &= \sqrt{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Розв'язок цієї системи [7] є коефіцієнти фільтра:

$$\begin{aligned} h_0 &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(1 + \sqrt{3}), \\ h_1 &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(3 + \sqrt{3}), \\ h_2 &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(3 - \sqrt{3}), \\ h_3 &= \frac{1}{4\sqrt{2}}(1 - \sqrt{3}), \end{aligned} \quad (16)$$

визначають вейвлет Добеші  $D^4$  (верхній індекс відповідає числу коефіцієнтів  $h_k$ ). Як вже зазначалося, при практичній реалізації ДВП функції  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$  в явному вигляді не розглядають, а за допомогою процедури пірамідального розкладу [7] обчислюють коефіцієнти  $s_{j,k}$  і  $d_{j,k}$ , скориставшись таблицею значень  $h_k$ .

Процедуру пірамідального розкладу схематично зображено на рис. 4.

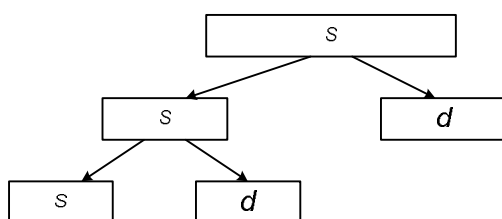


Рис. 4. Схематичне представлення алгоритму пірамідального розкладу

Проілюструємо її практичну реалізацію на прикладі вейлета Добеші  $D^4$ . ДВП часового ряду  $x(i)$  можна представити у вигляді множення матриці наступного вигляду:

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & & & & \\ h_3 & -h_2 & h_1 & -h_0 & & & & \\ & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & & & \\ & h_3 & -h_2 & h_1 & -h_0 & & & \\ \dots & \dots & & & & \dots & \dots & \\ & & & & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ & & & & h_3 & -h_2 & h_1 & -h_0 \\ h_2 & h_3 & & & & & h_0 & h_1 \\ h_1 & -h_0 & & & & & h_3 & -h_2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

На першому кроці, після множення матриці (17) розмірності  $8 \times 8$  на вектор

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T, \quad (18)$$

відповідає рівню  $j=0$ , буде отриманий набір  $s$ -і  $d$ -коефіцієнтів:

$$[s_{11} \ d_{11} \ s_{12} \ d_{12} \ s_{13} \ d_{13} \ s_{14} \ d_{14}]^T. \quad (19)$$

Коефіцієнти  $d_{j,k}$  в подальших перетвореннях не беруть участь, тому їх доцільно відокремити, здійснивши перестановку елементів вектора

$$[s_{11} \ s_{12} \ s_{13} \ s_{14} \ | \ d_{11} \ d_{12} \ d_{13} \ d_{14}]^T. \quad (20)$$

Потім матриця (19) розмірності  $4 \times 4$  множиться на вектор  $s$ -коефіцієнтів, в результаті чого отримуємо вектор

$$[s_{21} \ s_{22} \ | \ d_{21} \ d_{22} \ | \ d_{11} \ d_{12} \ d_{13} \ d_{14}]^T. \quad (21)$$

## Висновки

Таким чином, ми відокремлюємо набори вейвлет-коефіцієнтів, які характеризують особливості сигналу на різних рівнях роздільної здатності.

Отримані коефіцієнти можуть використовуватися в якості характеристик для сортування форм сигналів. Ці форми сигналів можуть виступати діагностичними ознаками при розв'язку задачі ідентифікації послідовності імпульсів в ЕСК в процесі льотної експлуатації двигунів за реєстрованими параметрами.

## Література

1. Климентовский, Ю.А. Системы автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов [Текст]: учебное пособие / Ю.А. Климентовский, под ред. М.М. Митраховича. – К.: КВІЦ, 2001. – 400 с.
2. Августиниш, В.Г. Идентификация систем

управления авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.Г. Августиневич, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев; под ред. В. Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1994. – 200 с.

3. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов [Текст]: пер. с англ. / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

4. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст] / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Наука, 1991. – 100 с.

5. Пахомов, Г.И. Применение вейвлетов для обработки сигналов [Текст] / Г.И. Пахомов, Ю.Г. Пахомов // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 86 с.

6. Дьяконов, В.П. Вейвлеты. От теории к практике [Текст] / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 440 с.

7. Дремин, И.М. Вейвлеты и их применение [Текст] / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – С. 465-501.

Поступила в редакцию 1.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, декан механико-энергетического факультета О.В. Самков, Национальный авиационный университет, Київ.

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

**В.В. Панин, С.В. Енчев, С.С. Товкач**

Статья посвящена решению задачи автоматической идентификации импульсных сигналов в электронных системах управления, которые в процессе диагностирования двигателей с регистрируемыми параметрами являются определяющими для эффективности диагностирования. Рассматривается способ идентификации последовательности импульсов в электронных системах управления авиационным газотурбинным двигателем с помощью вейвлет-анализа. Описанная идея кратномасштабного анализа на простом примере – вейвлета Хаара. Приведена процедура пирамидального разложения, а также ее практическая реализация на примере вейвлета Добеші.

**Ключевые слова:** идентификация, дискретное вейвлет-преобразование, автоматизация, аппроксимация, кратномасштабный анализ, скейлинг-функции, фильтр.

### IDENTIFICATION OF IMPULSE IN ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS AIRCRAFT GTE WITH WAVELET ANALYSIS

**V.V. Panin, S.V. Enchev, S.S. Tovkach**

The article is devoted to solving the problem of automatic identification of pulse signals in electronic control systems that are in the process of diagnosing engine with recorded parameters are decisive for the efficiency of diagnosis. Considered the way of identifying the sequence of momentum in the electronic control systems of aircraft gas turbine engine using wavelet analysis. Described the idea of multiresolution analysis with a simple example – the Haar wavelet. Shows the procedure for pyramidal decomposition, as well as its practical implementation as an example of a wavelet Dobeshi.

**Keywords:** identification, discrete wavelet transform, automation, approximation, multiresolution analysis, the scaling-functions, filter.

**Панін Владислав Вадимович** – д-р техн. наук, профессор, ректор Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана П.К. Сагайдачного, Київ, Україна, e-mail: reception@maritime.kiev.ua.

**Єнчев Сергій Васильович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: esw@ukr.net.

**Товкач Сергій Сергійович** – аспірант кафедри автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: tcctit7@ukr.net.