УДК 621.391

СЕГМЕНТОВАНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ ПРИ РОЗРАХУНКАХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

А. В. Волошко, канд. техн. наук., Т. М. Лутчин, асп. (НТУУ «КПІ»)

Предлагается использовать предварительно вейвлет-преобразование исследуемых выборок при частичном поиске данных без потери их точности. Представлены варианты оптимального выбора информативных данных, а также способы проверки достоверности восстановленных режимных параметров электропотребления.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, частичный поиск данных, связь вейвлет-коэффициентов, точность, режимные параметры электропотребления.

Пропонується використовувати попередньо вейвлет-перетворення досліджуваних вибірок при частковому пошукові даних без втрати їх точності. Представлені варіанти оптимального вибору інформативних даних, а також способи перевірки достовірності відновлених режимних параметрів електроспоживання.

Ключові слова: вейвлет-перетворення, частковий пошук даних, зв'язок вейвлет-коефіцієнтів, точність, режимні параметри електроспоживання.

Preliminary use of wavelet-transformation of data samples under study during the partial search of data without loss of their accuracy is proposed. Variants of the optimal selection the information-bearing data and methods to verify reliability of recovery operation power consumption parameters are presented.

Keywords: wavelet-transformation, partial search of data, connection of wavelet-coefficients, accuracy, regime power consumption parameters.

Вступ. При розв'язанні задач енергетики часто необхідно оперувати неповним об'ємом інформації про параметри режимів і енергосистеми в цілому. Наприклад, у задачах прогнозування графіків навантажень використовуються лише значення сумарної (або середньої) і максимальної потужностей. Для періоду максимального споживання слід враховувати кількісне значення потужності, а також момент безпосереднього прояву його піку. Останнім часом особливої актуальності набуває питання споживання у нічні періоди доби. У зв'язку зі зниженням темпів економічного розвитку знижується обсяг промислових потужностей. Таким чином, в енергосистемі необхідно додатково контролювати рівень мінімального споживання, щоб спланувати роботу маломаневрених об'єктів.

Попереднє вейвлет-перетворення (ВП) графіків споживання дозволяє усунути вплив шумів, виявити прояв піків та провалів, а також застосовувати не весь графік навантаження, а лише інформативну його частину (сегмент) з необхідними даними для розв'язання поставлених завдань. ВП дозволяють розв'язувати складні задачі, пов'язані насамперед з оптимальною класифікацією та систематизацією даних [1]. У цьому випадку необхідними умовами є мінімальна втрата інформації у процесі її обробки та оптимальна точність при подальшому відновленні вхідних даних.

Постановка задачі. Пропонується використовувати ВП для забезпечення сегментованого пошуку даних без втрати точності.

Виклад основного матеріалу дослідження. За базовий підхід до вейвлет-аналізу прийнято кратномасштабний аналіз (КМА) початкових даних. При дослідженні сигналів їх корисно зображати у вигляді набору послідовних наближень грубої (апроксимуючої) і уточненої (деталізуючої) складових [2]. Апроксимуючі *c* та деталізуючі *d* коефіцієнти визначаються відповідно як сума та різниця значень апроксимуючих коефіцієнтів першої та другої половини інтервалу [3] з подальшим їх уточненням ітераційним методом:

$$c_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(C_{m\text{-}1,\,2n} + C_{m\text{-}1,\,2n+1}\right);$$

$$d_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(C_{m\text{-}1,\,2n} - C_{m\text{-}1,\,2n+1}\right),$$

де $n \in [0;\ N-1]$ – порядковий номер вейвлет-коефіцієнта (ВК) на *m*-ому рівні вейвлет-розкладу сигналу *C*; *N* – кількість значень вихідної вибірки, яка повинна відповідати 2^m, інакше початкову вибірку необхідно доповнити нульовими значеннями для виконання зазначеної умови.

Кожен рівень уточнення відповідає масштабу 2^m аналізу (декомпозиції) та синтезу (реконструкції) сигналу. Представлення складових сигналу вейвлетами можна розглядати як у часовій, так і у частотній областях.

Розкладання функцій на вейвлетні ряди на рівні *m* виконується за виразом [3]

$$S(m,t) = \sum_{n=0}^{2^m-1} c_{m,n} \cdot \varphi_{m,n}(\mathrm{t}) + \sum_{n=0}^{2^m-1} d_{m,n} \cdot \psi_{m,n}(\mathrm{t}),$$

де $\varphi_{m,n}(t)$ і $\psi_{m,n}(t)$ – ортонормовані базиси розкладання апроксимуючих і деталізуючих коефіцієнтів відповідно.

Значення коефіцієнтів більш високого рівня *m* відновлюються парою коефіцієнтів $c_{m-1,n}$ та $d_{m-1,n}$ [3]:

$$C_{m,2n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(c_{m-1,n} + d_{m-1,n}\right);$$

$$C_{m,2n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(c_{m-1,n} - d_{m-1,n}\right),$$

і, відповідно, за ними здійснюється відновлення вихідних значень сигналів.

В основному при обробці даних за допомогою вейвлет-аналізу використовуються підходи, які передбачають повне відновлення сигналу. Аналізуючи алгоритми розрахунків, можна прийти до висновку, що виникає хибне сприйняття алгоритмів спрощення схем повної декомпозиції сигналу за алгоритми стиснення даних. Наприклад, алгоритм Мала, за допомогою якого скорочуються обсяги обчислень, відноситься до типу перетворень повного відновлення даних без втрати точності. Забезпечення вказаних результатів для дослідження різних форм сигналів можливе лише при виконанні умови рівності чисельності вхідних та вихідних значень, що й передбачається вищеназваним

алгоритмом. Відповідно до алгоритму Мала [2] КМА при послідовному збільшенні значень рівня *m* приводить до швидких ітераційних обчислень:

$$c_{m+1,n} = \sum_i h_i c_{m,2n+i};$$

$$d_{m+1,n} = \sum_i g_i c_{m,2n+i},$$

де h_n та g_n – низькочастотний і високочастотний фільтри.

Зазначені рівняння забезпечують пірамідальний алгоритм обчислення всіх ВК на всіх рівнях розкладу *m*, проте лише для апроксимуючих *c* та деталізуючих *d* коефіцієнтів з першим порядковим номером ($n = 1$).

При застосуванні алгоритму Мала використовується лише однозначний підхід до розв'язання задач. Таким чином, у ряді задач знижується ефективність використання ВП за рахунок вибору малоінформативних або складних для подальшого аналізу коефіцієнтів.

Можливості часткового вибору вейвлет-коефіцієнтів (ВК) для відновлення вхідної інформації без втрат її точності підтверджується використанням ВК тільки останнього кроку ВП [5].

У випадках, коли обрані ВК відповідно до алгоритму Мала не відображають повний спектр властивостей, які містилися у автоматично «відкинутих» ВК, здійснюються зміни процесу розкладу сигналу [4]. У результаті формуються бінарні збалансовані дерева, які на практиці широко застосовуються для пошуку та сортування інформації (рис. 1) [2].

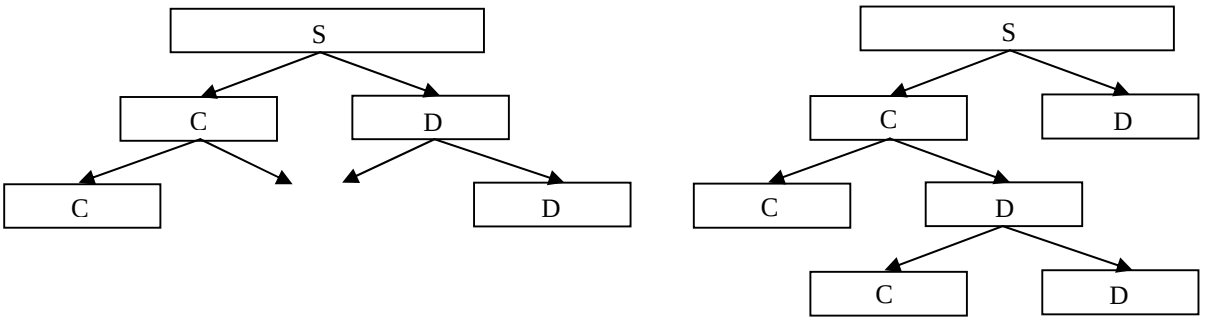


Рис. 1. Бінарні збалансовані дерева ВП

Вищенаведені способи аналізу інформації ґрунтуються на особливості ВК – застосування ВП до кожного початкового значення вибірки 2^m разів:

$$k_{m,n} = f(2^m \cdot n + i\big|_1^{2^m}) \Leftrightarrow S_n.$$

Тому у випадку довільного вибору значень для відновлення сигналу існує ймовірність ускладнення алгоритму розрахунку. При цьому схема може загромаджуватися надлишковою кількістю коефіцієнтів або ускладнюватися підбором нових способів рішення, тобто виникає необхідність аналізу коефіцієнтів. Попередньо зарезервувавши кілька шляхів відновлення даних, у спір-

них ситуаціях або при виникненні збоїв при передачі інформації досить просто встановлюється етап з невідповідністю, який у подальшому коректується.

Для оптимального вибору параметрів слід також враховувати структуру функціональних зв'язків ВК, яка відображає взаємозв'язок між перетвореними даними на всіх рівнях розкладу, особливо при необхідності збереження точності з мінімальним обсягом даних.

Функціональні залежності між ВК на всіх рівнях розкладу простіше встановлювати при вертикальному та горизонтальному аналізі структур дерева декомпозиції. Зобразимо прояв залежностей між компонентами ВК та початковим сигналом на прикладі восьмого значення вхідної вибірки при $N = 16$ (рис. 2).

Як показано на рис. 2, *а*, на першому рівні розкладу дане значення буде входити до складу ВК першого рівня у вигляді четвертої складової по порядку, на другому – у вигляді другої, на третьому – першої і на останньому рівні входить до складу всіх коефіцієнтів $k_{4,n}$ [5].

Наведена схема (рис. 2, *а*) відображає кількість вхідних даних у складі перетворених значень. Детальніше розглянемо рівні розкладу сигналу. З рис. 2 випливає, що ВК на першому рівні може розраховуватися за двома вхідними значеннями, другого рівня – за чотирма, третього рівня − за вісьмома і т. д. Цей принцип зберігається для перетворень з довільним обсягом вибірок значень.

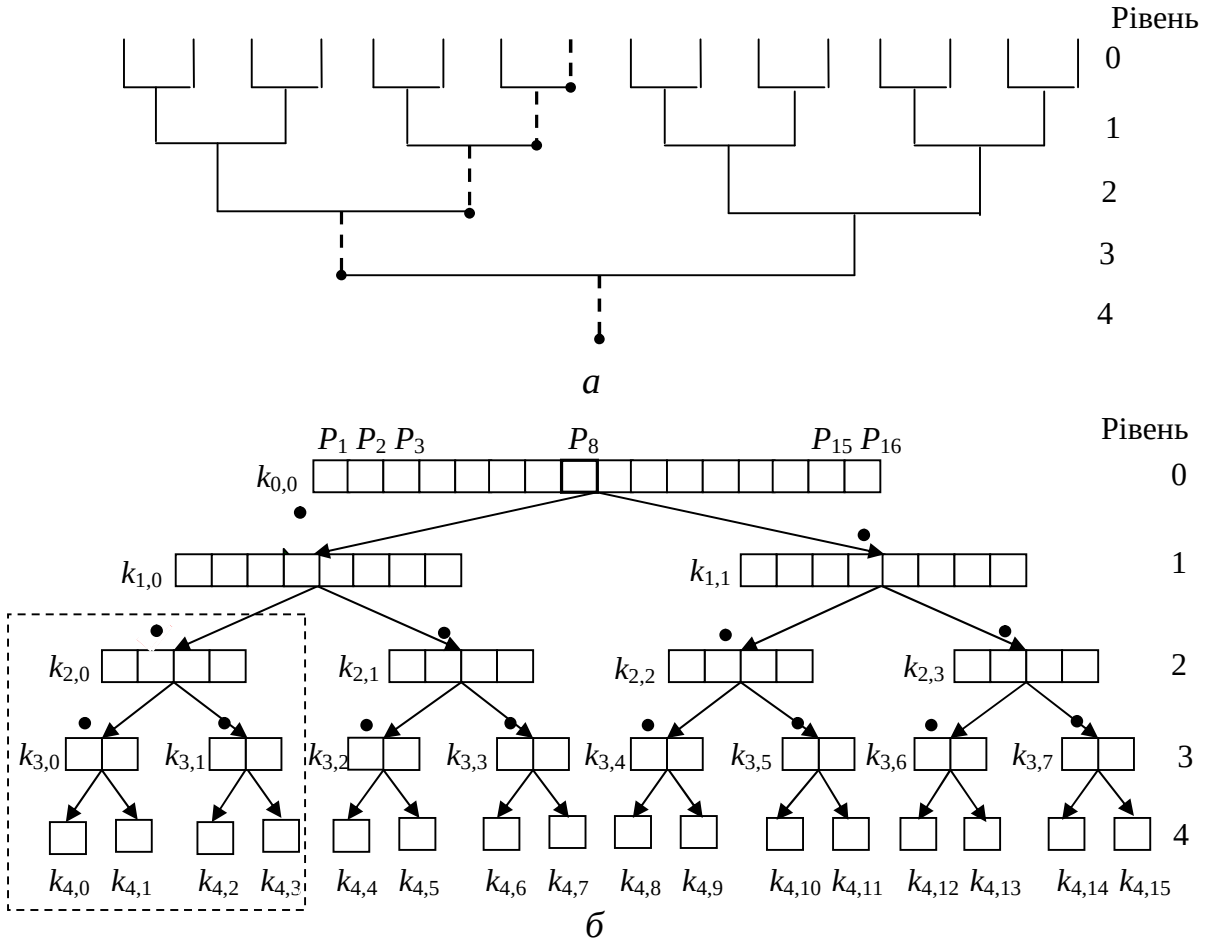


Рис. 2. Функціональна схема ВП (*а*) та її відображення на прямій схемі пакетного розкладу сигналу (*б*)

Як було зазначено раніше, дерево КМА складається з 2^m параметрів складових ВК на всіх m рівнях перетворення. Наявність такої кількості величин дозволяє розширити способи відновлення вхідного сигналу. Далі вибираємо шляхи розрахунку. Необов'язково задаватися базовими коефіцієнтами останнього рівня, що особливо важливо в умовах контролю вимірюваних сигналів. Перевірка реалізується 2^m шляхами:

$$P_i = f(k_{m,1}, k_{m,2}, k_{m,3}, (m-2)k_{m,n}),$$

де m та n – коефіцієнти, які не повторюються.

У випадку відновлення вхідних значень корисними для розрахунку є ВК, які містять інформацію про шукане значення. При відновленні восьмого значення вхідної вибірки (рис. 2, *б*) раціонально застосовувати перетворені коефіцієнти, в яких присутня функціональна залежність із шуканою величиною (необхідні коефіцієнти відзначені пунктирними лініями на рис. 2, *а*). Наведений принцип формування зв'язків відноситься до потокової побудови: шукане значення приймається у вигляді джерела, кожний рівень розкладу являє собою поріг, висота якого зі збільшенням рівня m постійно зменшується. Відповідно до вищевикладеного принципу виключається можливість подвійного трактування наявності вхідних значень у складових ВК.

Для наочності особливості зв'язків між ВК будуть здійснюватися на основі коефіцієнтів, які входять до виділеної пунктиром області на рис. 2, *б*.

Враховуючи особливість розкладу ВП, зробимо висновок, що за будь-якими компонентами ВК m-го рівня, які виходять зі спільного вузла, та ВК $(m-1)$ рівня, від якого відходить розгалуження кількістю $N/2^m$, можна визначити інші невідомі компоненти.

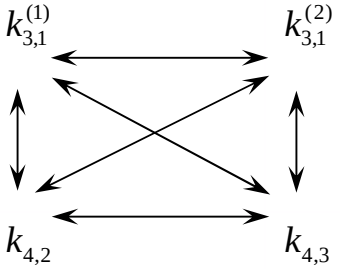


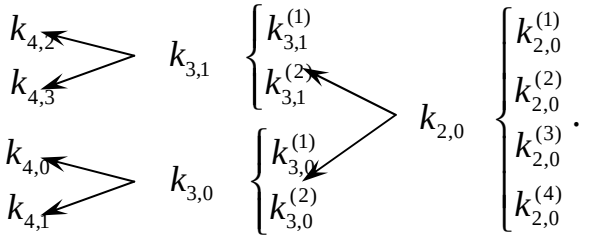
Рис. 3. Можливі варіанти знаходження компонент і безпосередньо ВК з урахуванням взаємозв'язності. Індекси (1) і (2) − номери по порядку складової ВК

У загальному випадку, в залежності від кількості рівнів розкладу, коефіцієнти яких приймаються до уваги, всього можливо комбінацій:

$$N_{\text{комб}} = \left(\left(\left(2\frac{N}{2^m} + \frac{N}{2^{m-1}}\right)2 + \frac{N}{2^{m-2}}\right)\times\ldots\times 2 + \frac{N}{2^{m-\log_2 N}}\right), \text{ або } N_{\text{комб}} = 2\frac{N}{2^{m-j}} + \frac{N}{2^{m-j-1}},$$

якщо розрахунок ведеться не з останнього рівня m.

Тоді для досліджуваної області (див. рис. 2, *б*) схема визначення складової $k_{2,0}^{(2)}$ така:



Як окремий випадок розглянемо ситуацію, коли відомі всі значення ВК на певному рівні, що походять від одного ВК вищого рівня. У цьому випадку розрахунки на рівнях, які знаходяться між ними, слід пропустити. Наприклад, якщо відомі $k_{4,0}^{(.)} - k_{4,3}^{(.)}$, то розрахунок ВК $k_{3,1}^{(.)}$ і $k_{3,2}^{(.)}$ на третьому рівні не виконується і відбувається перехід від четвертого до другого рівня.

Згідно з рис. 3 знаходимо $k_{2,0}^{(2)}$. Нехай задана сусідня складова $k_{2,0}^{(1)}$. Додатково має бути відоме будь-яке значення з лівої гілки. Можливі варіанти у даному випадку представлення наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Способи відновлення ВК на вищих рівнях розкладу

$k_{3,0}^{(2)}$	$k_{4,0}$	$k_{4,1}$	$k_{3,1}^{(1)}$
$k_{3,0}^{(1)}$	$k_{4,2}$	$k_{4,3}$	$k_{3,1}^{(2)}$
√	√		√
√		√	√

Далі виділяються складові, які необхідно вибирати при подальшому відновленні сигналу із другого рівня розкладу. За своїми властивостями складові ВК неоднаково корисні для розв’язання зазначеної задачі. Так, наприклад, $k_{2,0}^{(2)}$ і $k_{2,1}^{(2)}$; $k_{2,2}^{(2)}$ і $k_{2,3}^{(2)}$ підходять для відновлення сигналу, але недопустимо брати за основу складові ВК, які виходять з різних вузлів. Такі дії приведуть до перехрещування функціональних зв’язків, і від раціональної моделі відновлення сигналу відбувається перехід до загальної, згідно з якою необхідна кількість складових ВК прирівнюється до кількості значень вхідної вибірки даних. Зазначимо, що відомості про шукану величину повинні міститися хоча б в одній складовій ВК.

Таким чином, для оптимізації моделі відновлення одного або кількох значень вихідної вибірки необхідно відслідковувати функціональні зв’язки між ВК на всіх рівнях розкладу.

Відмітимо, що при формуванні вибірки ВК із застосуванням додаткових нульових значень не слід використовувати наявні взаємовиключні залежності між ВК останнього рівня ВП, а також на поточних рівнях ВП виключати вплив неповноти вхідної вибірки, який проявляється у вигляді нульових і дубльованих значень ВК.

Це питання набуває особливої актуальності при роботі з графіками, які стосуються змін деяких параметрів протягом доби (12 значень − за 2 години, 24

і 48 − погодинні та півгодинні графіки і т.д.). Відповідно необхідно 16, 32 і 64 вхідних значень, що відповідає доповненню 25 % від загальної вибірки додатковими нульовими значеннями. Всі співвідношення для відновлення значення залишаються дійсними, але принцип вибору ВК табл. 1 можна розширити до показаного у табл. 2.

Таблиця 2. Варіанти вибору ВК

ВК	$\{k_{3,0}^{(.)};\ k_{4,0};\ k_{4,1}\}$	$\{k_{3,1}^{(.)};\ k_{4,2};\ k_{4,3}\}$	$\{k_{4,0};\ k_{4,1};\ k_{4,2};k_{4,3}\}$
Кількість ВК у вибірці	2	1	–
	1	2	–
	–	–	3

При необхідності пошуку мінімальних, середніх чи максимальних значень у класичній теорії [6] здійснюється безпосередньо аналіз графіка вздовж осей абсцис та ординат. При застосуванні вейвлет-аналізу використовується набір функцій для: $P_c = f\left(k_{m,0}\right)$, де $k_{m,0}$ – ВК останнього рівня вейвлет-розкладу m; $P_{\min/\max} = f$ **(**3 значення з $k_{m,n\in[1-4]}$; по одному значенню з кожного рівня, починаючи з $(m - 3)$, за принципом: 2 $№_{п/п}$ або (2 $№_{п/п}$ + 1) значення, $№_{п/п}$ – порядковий номер вибраного ВК на попередньому рівні**)**. Після проведених дій аналізуються ВК останнього рівня розкладу, які відповідають за відхилення згрупованих значень кількістю 2^m у парі. Таким чином, здійснюється пошук мінімальних / максимальних значень з обмеженням кількості ітераційних порівнянь.

Висновки. З метою визначення найбільш інформативних складових для вирішення режимних задач споживання електричної енергії обґрунтовано актуальність детального дослідження властивостей вейвлет-коефіцієнтів на всіх рівнях розкладу на основі аналізу результатів пакетного вейвлет-перетворення. Для відновлення даних без втрати точності та в умовах неповноти вхідної вибірки вказано варіанти способів декомпозиції розкладу сегментів графіка навантаження. Підвищення якості та ефективності контролю переданої інформації досягається у результаті використання представлених способів перевірки знайдених вейвлет-коефіцієнтів.

1. *Фокин Ю. А.* Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю. А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.

2. *Яковлев А. Н.* Введення у вейвлет-преобразования / А. Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

3. *Волошко А. В.* Методы и средства обработки сигналов и изображений / А. В. Волошко // Электроника и связь. – 2010. – Вып. 4. – С. 59–64.

4. *Иванов Б. Н.* Дискретная математика. Алгоритмы и программы. Расширенный курс / Б. Н. Иванов. – М.: Известия, 2011. – 512 с.

5. *Волошко А. В.* Локальне відновлення закодованої інформації / А. В. Волошко, Т. М. Лутчин. – Зб. наук. праць Інституту електродинаміки НАНУ. − 2010. – С. 93−97.

6. *Седов А. В.* Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства / А. В. Седов, И. И. Надтока // Изд-во Ростовского университета. − Ростов н/Д. – 2002. – 320 с.

Надійшла до редакції 15.10.2012
Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. М. Чермалихом