УДК 621.315:004.032.26

ПРЕДСТАВЛЕННЯ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Фурман І. О., Мірошник О. О.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Запропоновано використовувати вейвлет-аналіз для представлення несинусоїдальних режимів в системах електропостачання. Для практичної реалізації вейвлет-перетворення дискретних сигналів запропоновано використовувати вейвлет-фільтри.

Постановка проблеми. Відомо, що перетворення Фур'є, що широко використовується в сучасних засобах аналізу параметрів електроенергетичних сигналів, що мають місце в електротехнічних комплексах (ЕТК), застосовується лише для стаціонарних сигналів. За допомогою них можна отримати лише інформацію про частотний спектр сигналу в певному часовому інтервалі. Тому вони не підходять для аналізу напруги та струму, що постійно змінюються, тому що для детального аналізу необхідна не тільки інформація про їх частотний зміст, але і час появи певних частотних компонентів у сигналі. Також, слід зазначити, що дані перетворення можливі лише для кінцевих сигналів, що унеможливлює аналіз параметрів сигналу в режимі реального часу [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З аналізу літературних даних [2, 3] випливає, що на практиці мають місце нестаціонарні сигнали, для яких за допомогою Фур'є-перетворення по вмісту вищих складових спектра практично неможливо оцінити місце розташування особливостей на часовій залежності сигналу і їх характер. Тому для нестаціонарних сигналів (а саме такими є осцилограми електричних сигналів у СЕП 0,38/0,22 кВ) труднощі прямого та зворотного перетворення Фур'є (і, відповідно, швидкого перетворення Фур'є) багаторазово зростають. У зв'язку із цим для аналізу нестаціонарних електричних сигналів ЕТК пропонується використовувати вейвлет-аналіз.

При аналізі несинусоїдальних режимів СЕП дуже зручно представити електричний сигнал у вигляді сукупності його послідовних наближень. Таку можливість дає теорія кратномасштабного аналізу, яка базується на теорії функціональних просторів.

Мета статті. Показати можливості вейвлет-аналізу для представлення несинусоїдальних режимів в системах електропостачання.

Основні матеріали дослідження. Під кратномасштабним аналізом розуміється опис простору $L^2(R)$ через ієрархічні вкладені підпростори *Vm*, які не перетинаються і об'єднання яких представляється в межаж $L^2(R)$, тобто

$$\ldots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \ldots,$$
$$\bigcap_{m\in Z} V_m = \{0\}, \overline{\bigcup_{m\in Z} V_m} = L^2(R). \quad (1)$$

Далі, ці простори мають наступну властивість: для будь-якої функції $f(x) \in Vm$ її стисла версія буде належати простору V_{m-l}

$$f(x) \in V_m \Leftrightarrow f(2x) \in V_{m-1}. \quad (2)$$

І, нарешті, остання властивість кратномасштабного аналізу: існує така функція $\phi(x) \in V_0$, що її зміщення $\phi_{0,n}(x) = \phi(x-n)$, $n \in Z$ утворюють ортонормований базис простору V_0. На рис. 1 схематично показані дані вкладені простори.

З рис. 1 видно, що область $L^2(R)$ побудована з множини "кілець", які є різницею між двома сусідніми просторами. Ці різницеві простори позначаються через W_m і визначаються як ортогональні доповнення областей V_m до V_{m-1}

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m, \ \bigcap_{m\in Z} W_m = \{0\}, \overline{\bigcup_{m\in Z} W_m} = L^2(R). \quad (3)$$

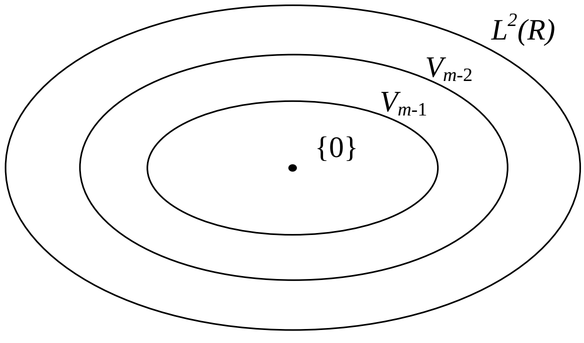

Рисунок 1 – Кратномасштабне представлення $L^2(R)$

Оскільки функції $\phi_{0,n}(x)$ утворюють ортонормований базис простору V_0, то функції

$$\phi_{m,n}(x) = 2^{-m/2}\phi\left(2^{-m}x - n\right) \quad (4)$$

утворюють ортонормований базис простору V_m. Ці базисні функції називаються масштабуючими, тому що вони створюють масштабовані версії функцій в $L^2(R)$. Із кратномасштабного аналізу випливає, що функція $f(x)$ в $L^2(R)$ може бути представлена множиною послідовних її наближень $f_m(x)$ в V_m. Інакше кажучи, функція $f(x)$ є межа апроксимацій $f_m(x) \in V_m$ при m прагнучому до $-\infty$

$$f_m(x) = \lim_{m\to-\infty} f_m(x). \quad (5)$$

Звідси з'являється можливість аналізу функції або сигналу на різних рівнях розподілу або масштабу [4]. Змінна m називається масштабним коефіцієнтом або рівнем аналізу. Якщо значення m велике, то функція в V_m є груба апроксимація $f(x)$, і деталі відсутні. При малих значеннях m має місце точна апроксимація. З визначення кратномасштабного аналізу випливає, що всі функції в V_m можуть бути представлені як лінійна комбінація масштабиуючих функцій. Насправді $f_m(x)$ є ортогональна проекція $f(x)$ на V_m

$$f_m(x) = \sum_n \left\langle \phi_{m,n}(x), f(x) \right\rangle \phi_{m,n}(x) = \sum_n c_{m,n}\phi_{m,n}(x). \quad (6)$$

Оскільки $\phi(x) = \phi_{0,0}(x) \in V_0 \subset V_{-1}$, то можна записати

$$\phi_{0,0}(x) = 2^{1/2}\sum_n h_n \phi_{-1,n}(x) = 2\sum_n h_n \phi(2x-n), \quad (7)$$

де h_n – деяка послідовність. Вираз (7) називається масштабуючим рівнянням і є одним з основних у теорії вейвлет-анализу.

Функція $\phi(x)$ та послідовність h_n тісно зв'язані між собою. З урахуванням (7) одержимо:

$$\phi_{m+1,k}(x) = 2^{1/2}\sum_p h_p \phi_{m,p-2k}(x) =$$
$$= 2^{(-m+1)/2}\sum_p h_p \phi\left(2^{-m}x - (p-2k)\right). \quad (8)$$

Одна з основних ідей вейвлет-представлення сигналів полягає в розбивці наближення до сигналу на дві складові – грубу (апроксимуючу) і витончену (деталізуючу) – з наступним їх дробленням з метою зміни рівня декомпозиції сигналу. Це можливо як у часовий, так і у частотній областях представлення сигналів вейвлетами [110].

На практиці в сучасних обчислювальних системах для цифрової обробки та аналізу електроенергетичних сигналів використовуються їх дискретизовані версії. Для цього широко використовуються елементи теорії цифрової фільтрації.

Практична реалізація вейвлет-перетворення дискретних сигналів також ґрунтується на застосуванні цифрових фільтрів [4, 5]. При цьому, важливу роль відіграє проблема їх вибору та розрахунків. Загальний вид схеми для аналізу-синтезу несинусоїдальних сигналів представлений на рис. 2. Усі фільтри даної схеми є казуальними. Зміщення фільтрів здійснюються шляхом множення на комплексну експоненту. Вхідний сигнал S ділиться на дві частини шляхом фільтрації низькочастотним (НЧ) фільтром H, який робить зсув сигналу на p відліків, і високочастотним (ВЧ) фільтром G, який зміщує сигнал на q відліків. Після проріджування здійснюється кодування сигналів. Секція синтезу виконує інтерполяцію сигналів і фільтрацію зміщеними фільтрами F і E. Після множення на 2 для збереження величини амплітуди обидва сигнали складаються. У результаті чого виходить вихідний сигнал [113].

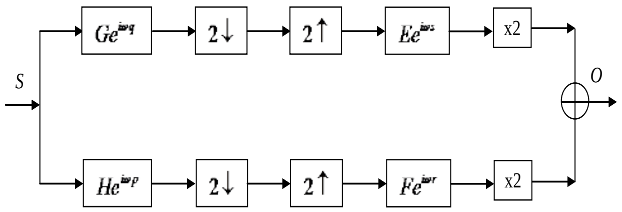

Рисунок 2 – Двополосна схема аналізу-синтезу електричних сигналів: H і F – низькочастотні фільтри, G і E – високочастотні фільтри

Система аналізу-синтезу описується в області Фур'є в такий спосіб:

$$O(\omega) = \left[F(\omega)H(\omega)e^{i\omega(p+r)} + E(\omega)G(\omega)e^{i\omega(q+s)}\right]S(\omega) +$$
$$+\left[F(\omega)H(\omega+\pi)e^{i\omega(p+r)}e^{ip\pi} + E(\omega)G(\omega+\pi)e^{i\omega(q+s)}e^{ip\pi}\right]\times$$
$$\times S(\omega+\pi), \quad (9)$$

де O – вихідний сигнал системи.

Друга частина (9) являє собою викривлення через накладення спектрів і повинна бути усунута для повного відновлення сигналу. Це може бути досягнуто у випадку $p + r = q + s$, і тоді

$$F(\omega) = G(\omega+\pi),\ E(\omega) = -H(\omega+\pi),$$
$$|p-q| \bmod 2 = 0. \quad (10)$$

або

$$F(\omega) = G(\omega+\pi),\ E(\omega) = -H(\omega+\pi),$$
$$|p-q| \bmod 2 = 1. \quad (11)$$

З урахуванням (3.9) функція передачі буде мати такий вигляд

$$T(\omega) = \left[H(\omega)G(\omega+\pi) - G(\omega)H(\omega+\pi)\right]e^{i\omega(p+r)}. \quad (12)$$

Для досягнення повного відновлення фільтри повинні розраховуватися так, щоб $H(\omega)G(\omega+\pi) - G(\omega)H(\omega+\pi)$ дорівнювало чистій затримці. Далі, необхідно вибрати p, q, r і s так, щоб загальна затримка системи дорівнювала нулю. Тоді маємо для парних фільтри

$$p = (L_H - 2)/2,\ q = (L_G - 2)/2, \quad (13)$$

і для непарних

$$p = (L_H - 1)/2,\ q = (L_G - 3)/2, \quad (14)$$

де LH і LG означають довжини фільтрів H и G. Для симетричних фільтрів затримка системи буде дорівнює нулю, якщо покласти $r = q + 1$ і $s = p + 1$.

Для того щоб $H(\omega)G(\omega+\pi)-G(\omega)H(\omega+\pi)$ дорівнювало величині затримці, можна взяти, наприклад, фільтр G, коефіцієнти якого дорівнюють коефіцієнтам H, але записані у зворотному порядку і через один помножені на (–1). У частотній області це означає

$$G(\omega)=H(-\omega+\pi)e^{i(-\omega+\pi)(L_n-1)}. \qquad (15)$$

Враховуючи казуальність фільтра G, одержимо

$$T(\omega)=\left[H(\omega)H(-\omega)-H(\omega+\pi)H(-\omega+\pi)e^{i\pi(L_n-1)}\right]\times \\ \times e^{i\omega(p+r+1-L_n)}. \qquad (16)$$

Затримка досягається, якщо

$$H(\omega)H(-\omega)+(-1)^{L_n}H(\omega+\pi)H(-\omega+\pi)=1, \qquad (17)$$

у результаті чого виходить система з повним відновленням.

За допомогою вейвлетів сигнал представляється сукупністю хвильових пакетів – вейвлетів, що утворені на основі деякої вихідної (базисной) функції. Ця сукупність різна в різних частинах часового інтервалу визначення сигналу і представляє останній з тим або іншим ступенем деталізації. Такий підхід називають вейвлет-аналізом сигналів [5].

Число вейвлетів, що використовується при розкладанні сигналу задає рівень декомпозіції сигналу. При цьому за нульовий рівень декомпозиції приймається сам сигнал, а рівні декомпозиції утворюють спадаюче вейвлет-дерево того чи іншого виду. Точність представлення сигналу в міру переходу на більш низькі рівні декомпозиції знижується, але зате з'являється можливість вейвлет-фільтрації сигналів, видалення із сигналів шумів і ефективної компресії сигналів.

Очевидно, що для представлення сигналів, як в локальних областях їх збурень, так і в усьому часовому інтервалі зміни сигналів, треба мати можливість стискати або розтягувати вейвлети і переміщати їх по часовій осі.

Вейвлет-аналіз пропонує для обробки даних великий набір інструментів, які допомагають розділити вихідний сигнал на складові і побачити його структуру в різних масштабах. Термін фільтрація означає більше, ніж просте усунення різного роду перешкод. Вейвлет-фільтри настільки багатофункціональні, що дозволяють, регулюючи свої налаштування, не тільки боротися з шумами, але також витягувати ті компоненти корисного сигналу, які не завжди можуть бути безпосередньо виявлені. Робота вейвлет-фільтрів зводиться до наступного. На першому етапі по вихідному сигналу будують набір коефіцієнтів, тобто вейвлет-спектр. Параметри зсуву і розтягування вейвлета можуть варіюватися в широкому діапазоні в залежності від поставленої задачі. За спектром можна оцінити, в тому числі і візуально, розподіл складових за масштабами. Далі слід вибрати один з варіантів відбору вейвлет-коефіцієнтів. В обох випадках потрібно виконати зворотне перетворення, враховуючи при цьому, які коефіцієнти з отриманого набору слід використовувати, а які ні.

Висновок. Представлення несуносоїдальних спотворень напруги за допомогою вейвлетів довело свою перевагу перед Фур'є-перетворенням у задачах аналізу нестаціонарних сигналів, які мають місце в СЕП ЕТК, завдяки локалізованості як у часовій, так і в частотній області. Ключова ідея полягає в тому, щоб декомпозувати осциллограму напруги на складові, які являють собою його згладжену і деталізовану версії. А потім, використовуючи їх, виявити та виділити різні типи відхилень якості електроенергії.

Список використаних джерел

1. Шидловский А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
2. Липский А. М. Взаимосвязь показателей качества электроэнергии в сетях с резкопеременными нагрузками / А. М. Липский. – Электричество, 1983. – №8. – С. 50–52.
3. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер. – Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
4. Сапунов М. Вопросы качества электроэнергии / М. Сапунов. – Новости электротехники. – 2001. – №5. – С. 10–11.
5. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов / Л. М. Гольденберг. – Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь. – 1990. – 256 с.

Аннотация

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Фурман И. А., Мирошник А. А.

Предложено использовать вейвлет-анализ для представления несинусоидальных режимов в системах электроснабжения. Для практической реализации вейвлет-преобразования дискретных сигналов предложено использовать вейвлет-фильтры.

Abstract

PRESENTATION NON-SINUSOIDAL REGIME IN POWER SYSTEMS USING WAVELET ANALYSIS

I. Furman , O. Miroshnyk

A wavelet analysis used to represent non-sinusoidal modes in power systems. For practical implementation of wavelet transform digital signals suggested to use wavelet filters.