

## АНАЛІЗ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

**А.А.Марченко, О.В.Тимохін, А.О.Тимохіна**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. e-mail: [a.planida@ukr.net](mailto:a.planida@ukr.net)

*Робота присвячена питанням математичного аналізу низькочастотних коливань, що можуть виникати в електроенергетичних мережах при значних збуреннях. Зокрема розглянуто класичний підхід, що ґрунтується на використанні математичного апарату перетворень Фур'є, та більш сучасний, що ґрунтується на використанні математичного апарату вейвлет-перетворень. У роботі проведено аналіз реальних даних, отриманих з пристроїв системи моніторингу перехідних режимів, із використанням вищезазначених математичних апаратів та проведено порівняльний аналіз обох підходів, зокрема їхніх переваг та недоліків. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** низькочастотні коливання потужності, перетворення Фур'є, вейвлет-функції.

Коливання потужності є характерними для будь-якої енергосистеми, це пов'язано зі зміною навантаження в мережі та такими збуреннями, як відключення генераторів чи ліній. Але внаслідок аварій у мережі з'являються низькочастотні коливання (НЧК) потужності, які є однією з головних проблем надійності та функціонування енергомереж у всьому світі, оскільки наявність таких коливань може значно знизити допустимі перетоки потужностей у мережі, призвести до порушення стійкості та зумовити значні соціально-економічні втрати. Тому виявлення та ліквідація НЧК є одним з головних завдань.

*Метою роботи є виявлення НЧК потужності за допомогою вейвлет-перетворення, що дає змогу створити систему моніторингу НЧК у енергосистемах реального часу.*

Як відомо [1], важливість та складність задачі забезпечення стійкості енергосистеми при виникненні низькочастотних коливань призвели до необхідності розробки нових методів її оцінки, що засновані на детальному вивченні динамічних властивостей енергооб'єднань.

Як правило, власні частоти електромеханічних коливань знаходяться у діапазоні 0,1–2 Гц. Серед них є як локальні, так і загальносистемні коливання, що характеризують практично всю енергосистему. Локальні коливання характеризують параметри взаємних коливань синхронних машин у підсистемах, загальносистемні – коливання підсистем або груп генераторів відносно один одного.

Верхню частину спектра низькочастотних синхронних коливань (від 1,5 до 3 Гц) складають власні частоти електромагнітних процесів енергосистеми [1]. Серед особливостей низькочастотних коливань є їхнє стохастичне виникнення, а також те, що вони є коливальні, затухаючі.

Існує багато методів для визначення частот, що присутні в електромережі після виникнення аварії. Найбільш відомим серед них є спектральний аналіз – один з методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад дослідного сигналу. На даний момент спектральні методи досліджень отримали широке розповсюдження. При проведенні досліджень використовують добре розроблені теоретично обґрунтовані методи, а також застосовують складну спектроскопічну апаратуру. Найбільш розповсюдженими методами спектрального аналізу є: перетворення Фур'є з неперервним часом та швидке перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення та методи Вінгера-Вілла і Проні [5].

*Перетворення Фур'є з неперервним часом* – математична основа, яка пов'язує часовий або просторовий сигнал (або деяку модель цього сигналу) з його представленням у частотній області. Даний метод є основою для більшості методів спектрального аналізу.

Трансформація Фур'є дає змогу виявити частоти, котрі містяться в деякому залежному від часу сигналі. Такі вимірювання проводяться особливо часто для сигналів з періодичними компонентами, що зустрічаються, наприклад, при вимірюванні коливань, змінюються і повторюються так швидко, що їх не можна зобразити графічно чи обчислити їхню залежність від часу. До переваг даного методу належать гарна пропрацьованість та закінченість теорії; до недоліків – використання апріорно заданого базису (функції синусу, косинусу, меандрових функцій Уолша) та важкість отримання інформації про локалізацію у часі компонентів сигналу [1].

*Швидке перетворення Фур'є (ШПФ)* – це не один з різновидів перетворення Фур'є, а назва цілого ряду ефективних алгоритмів, призначених для швидкого обчислення дискретно-часового ряду Фур'є [6].

Основна ідея ШПФ – ділення  $N$ -точкового дискретно-часового перетворення Фур'є (ДЧПФ) на два та більш малих ДЧПФ, кожний з яких можна обчислити окремо, а потім лінійно підсумувати з іншими для того, щоб отримати ДЧПФ вихідної  $N$ -точкової послідовності. Ці ДЧПФ меншого розміру можна поділити, в свою чергу, на ще менші ДЧПФ відповідно менших послідовностей. У загальному випадку обчислення  $N$ -точкового ДЧПФ потребує виконання  $\log_2 N$  кроків з операціями додавання, та  $N/2$  – з операціями множення на кожному кроці [6].

Вейвлет-перетворення сигналів є узагальненням спектрального аналізу, типовий представник якого – класичне перетворення Фур'є.

Вейвлети мають вигляд коротких хвильових пакетів з нульовим середнім значенням, локалізованих по осі аргументів (незалежних змінних), інваріантних до зсуву і лінійних до операції масштабування (стиснення / розтягування). За локалізацією у часовому і частотному представленнях вейвлети займають проміжне положення між гармонійними функціями, локалізованими за частотою, і функцією Дірака, локалізованою у часі [3, 4]. До переваг вейвлет-перетворення належать можливість отримання інформації про спектральний склад дослідного процесу і його зміни у часі та просторі, а до недоліків – використання апріорно заданих базисів (вейвлети Хаара, Мейера та ін.), що вносять додаткову похибку в результати дослідження [1].

Для проведення порівняльного аналізу вищезазначених методів були використані дані зміни перетоку потужності та частоти по лінії Західноукраїнська – Вінниця для аварії від 10.12.12 р. при вимкненні блоку 1000 МВт на РАЕС, отримані з пристроїв РЕГІНА-Ч, встановлених на лінії. Початок аварії о 7:53:40 (рис. 1).

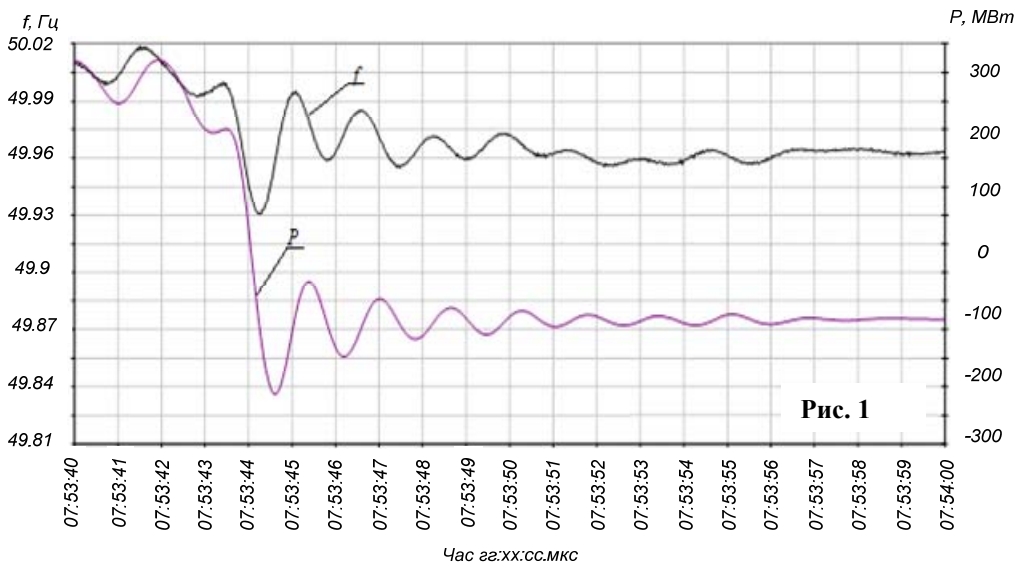


Рис. 1

аварії (у першому вікні розкладання) та 0,5859 Гц – після 4 с аварії (у другому вікні розкладання), але Фур'є аналіз не дає змоги визначити як моменти появи домінуючих частот, так і закони їхньої зміни впродовж періоду розкладання.

Для усунення вищезазначеного недоліку Фур'є аналізу запропоновано використання більш сучасного підходу, а саме вейвлет-аналізу [2, 7]. Для розкладу сигналу, представленого на рис. 1, за допомогою вейвлет-функцій було обрано як материнський вейвлет «Морле», математичне представлення якого

$$\psi(t) = e^{j\omega_0 t} \cdot e^{-t^2/2}.$$

У результаті розкладання та нормалізації коефіцієнтів розкладання було отримано

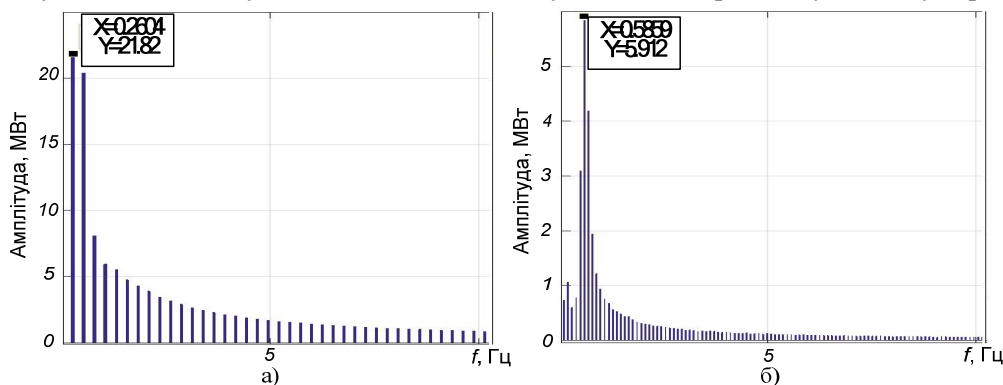


Рис. 2

тривимірне представлення вейвлет-розкладу, що показано на рис. 3. Початок вікна розкладання відповідає часу початку аварії. На графічному поданні (вид зверху): вісь абсцис – час, ординат – частота, амплітуда сигналу (потужність) – направлена вгору. На графіку позначено пікові точки, які визначаються візуально.

Для оцінки можливостей вейвлет-розкладання для побудови моніторингу НЧК у режимі реального часу було проведено вейвлет-розклад дослідних даних по залежності зміни потужності на лінії Західноукраїнська – Вінниця із зсувом часового вікна розкладання. Часовий зсув був обраний довільно і складає 7 с до початку аварії. Результат розкладу показано на рис. 4.

Аналіз отриманого розкладання показав зсув піку коливання частотою 0,59 Гц з часу 6,54 с у час 13,54 с, що відповідає зсуву вікна розкладання у 7 с. Аналогічні результати були отримані і для інших інтервалів зсуву.

З іншого боку, вейвлет розкладання можна розглядати як частотний фільтр, де кожний зріз по осі ординат – це представлення складової даної частоти у дослідному сигналі. Для демонстрації фільтруючих властивостей вейвлет-перетворення на рис. 5 показано зрізи по осі ординат вейвлет-розкладу для виявлених домінуючих частот. Очевидно, що амплітуди коливань потужностей на домінуючих частотах, отриманих як зрізи вейвлет-розкладання, впродовж часу не є постійними, що дозволяє досліджувати зміну амплітуд коливань у часі.

**Висновки.** 1. У порівнянні з математичним апаратом перетворень Фур'є вейвлет-перетворення дозволяє забезпечити двовимірну розгортку сигналу за часом та частотою.

2. Кожний зріз вейвлет-розкладу за частотою можна розглядати як фільтр для цієї частоти, що дозволяє досліджувати зміну його амплітуди у часі, в той час як перетворення Фур'є не дає такої інформації.

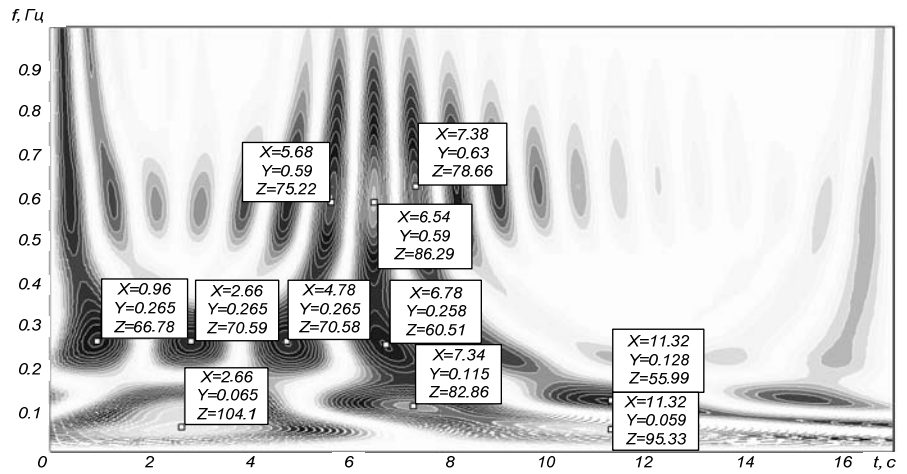


Рис. 3

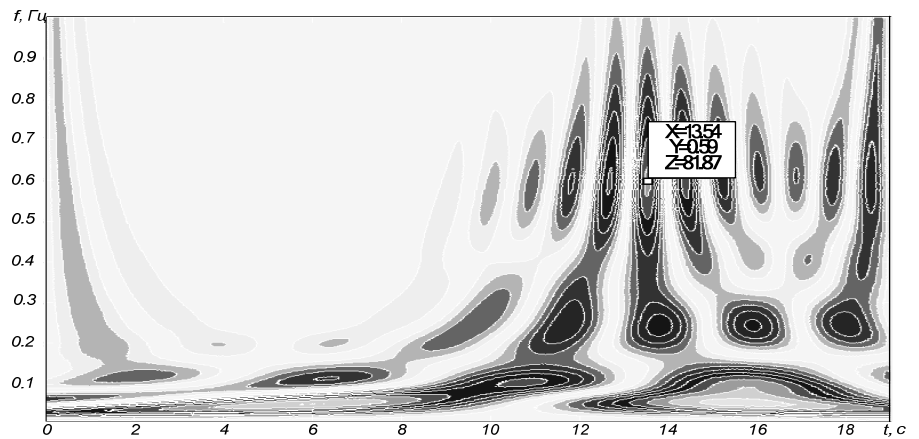


Рис. 4

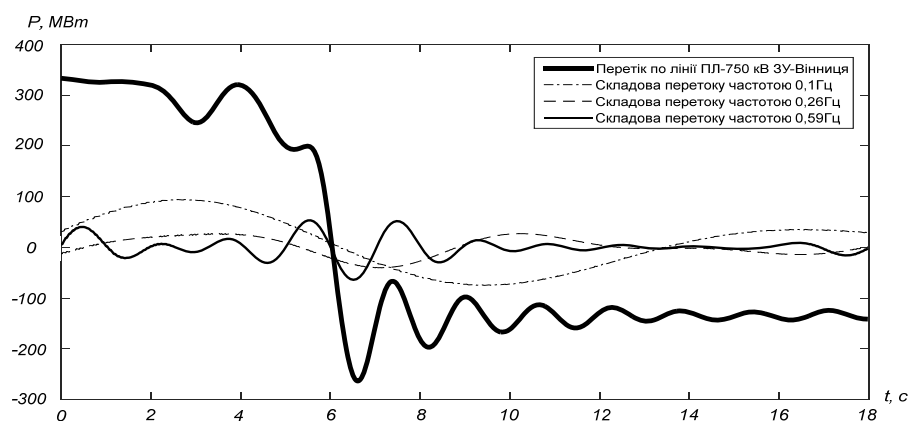


Рис. 5

3. Використання вейвлет-перетворення дає змогу побудувати систему моніторингу низькочастотних коливань у енергосистемах реального часу.

1. Бердин А.С., Герасимов А.С. Методы исследования нелинейных и нестационарных свойств низкочастотных колебаний в энергосистеме / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – Екатеринбург, 2013. – С. 1–7.
2. Корепанов В.В., Кулеш М.А., Шардаков И.Н. Использование вейвлет-анализа для обработки экспериментальных вибродиагностических данных. – Пермь, 2007. – 64 с.
3. Мандрикова О.В., Горева Т.С. Метод идентификации структурных компонентов сложного природного сигнала на основе вейвлет-пакетов / Цифровая обработка сигналов. – Москва, 2010. – С. 45–50.
4. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
5. Шрюфер Е. Обробка сигналів. Цифрова обробка дискретизованих сигналів. – К.: Либідь, 1992. – 296 с.
6. David Brandwood. Fourier transforms in radar and signal processing. – Boston, 2003. – 212 p.
7. Fuhr H. Abstract Harmonic Analysis of Continuous Wavelet Transforms. – Springer, 2005. – 200 p.

УДК 621.311

### АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Марченко А.А., Тимохин А.В., Тимохина А.А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. e-mail: a.planida@ukr.net

*Работа посвящена вопросам математического анализа низкочастотных колебаний, которые могут возникнуть в электроэнергетических системах при значительных возмущениях. Рассмотрен классический подход, который базируется на использовании математического аппарата преобразования Фурье, и более современный – на основе вейвлет-преобразований. В работе проведен анализ реальных данных, полученных с устройств системы мониторинга переходных режимов, с использованием вышеуказанных математических аппаратов и проведен сравнительный анализ обоих подходов, в частности, их преимуществ и недостатков. Библи. 7, рис. 5.*  
**Ключевые слова:** низкочастотные колебания мощности, преобразование Фурье, вейвлет-функции.

### ANALYSIS OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN POWER SYSTEM USING THE WAVELET TRANSFORM

Marchenko A., Tymokhin O., Tymokhina A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. e-mail: a.planida@ukr.net

*Work is devoted to the mathematical analysis of low-frequency oscillations that can occur in power systems with significant perturbations. The classical approach based on the use of the mathematical approach of the Fourier transform, and more modern which is based on wavelet transforms. Article presents analysis of real data from devices wide area measurement systems, using referred above two mathematical apparatus. Consequently, results gave possibility to make conclusion of comparative analysis of this two approaches, in particular, their advantages and disadvantages.*  
References 7, figures 5.

**Key words:** low-frequency oscillations of power, Fourier transform, wavelet functions.

1. Berdin A.S., Gerasimov A.S. Methods for the study of nonlinear and non-stationary properties of low-frequency oscillations in power systems / Modern trends of development of systems of relay protection and automation of power systems. – Ekaterinburg, 2013. – Pp. 1–7. (Rus)
2. Korepanov V.V., Kulesh M.A., Shardakov I.N. Using the wavelet analysis for processing experimental data, experimental vibrodiagnostic. – Perm, 2007. – 64 p. (Rus)
3. Mandrikova O.V., Goreva T.S. The method of identification of the structural components of a complex natural signal based on wavelet packet / Tsifrovaia obrabotka signalov. – Moskva, 2010. – Pp. 45–50. (Rus)
4. Smolentsev N.K. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB. – Moskva: DMK Press, 2005. – 304 p. (Rus)
5. Shriufer E. Signal processing. Digital processing of sampled signals. – Kyiv: Lybid, 1992. – 296 p. (Ukr)
6. David Brandwood. Fourier transforms in radar and signal processing. – Boston, 2003. – 212 p.
7. Fuhr H. Abstract Harmonic Analysis of Continuous Wavelet Transforms. – Springer, 2005. – 200 p.

Надійшла 25.03.2015

Остаточний варіант 06.07.2015