

О. Ф. Буткевич, д-р. техн. наук, проф.;  
В. В. Чижевський, асп.

## ВИЯВЛЕННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НЕБЕЗПЕКИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄДНАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

*Подано результати досліджень різних методів аналізу сигналів щодо можливості їх застосування в режимі реального часу для виявлення небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаних енергосистем.*

### Вступ

Одна із задач комплексної проблеми забезпечення стійкості об'єднаних енергосистем (ОЕС) полягає у своєчасному виявленні в режимі реального часу загрози коливного порушення їх стійкості. Виникнення низькочастотних коливань режимних параметрів ОЕС, пов'язаних з протифазними коливаннями на домінантних власних частотах ОЕС певних груп генераторів, поєднаних слабкими електричними зв'язками (такі зв'язки є тим «слабким місцем», яке «рветься»), може призводити до коливного порушення стійкості ОЕС у разі надмірного зростання з плином часу амплітуди таких коливань. Виникнення зазначених коливань може спричинятися як аварійними збуреннями в ОЕС, так і флуктуаціями навантажень електроспоживання, якщо вони відбуваються з частотою, близькою до домінантних власних частот ОЕС. Демпфірування низькочастотних коливань в енергооб'єднаннях світу покладається, здебільшого, на «системні стабілізатори» та відповідні засоби силової електроніки (*FACTS* та ін.), однак світовий досвід експлуатації енергосистем свідчить, що ефективність застосування таких засобів може бути недостатньою, і процес виникнення та зростання амплітуд низькочастотних коливань режимних параметрів ОЕС може бути довготривалим, призводячи, в кінцевому результаті, до знеструмлення значної кількості споживачів [1]. Отже, незалежно від наявності засобів автоматичного демпфірування низькочастотних коливань режимних параметрів ОЕС, диспетчерському персоналу повинна оперативно надаватися інформація щодо виникнення загрози коливного порушення стійкості ОЕС, щоб він мав можливість вжити необхідні заходи і не допустити «розхитування» ОЕС, яке призводить до порушення її стійкості.

Для обробки сигналів широко використовують методи спектрального аналізу, однак їх використання є коректним у разі, якщо сигнали пов'язані із стаціонарними випадковими процесами. Що ж стосується процесів функціонування ОЕС, то їх можна вважати квазістаціонарними лише на окремих часових відрізках. Це викликає і певні обмеження щодо застосування зазначених методів у розв'язанні задач, що стосуються аналізу режимів ОЕС. Питання можливості практичного застосування методів спектрального аналізу, здавалося б, зводиться до визначення довжини (тривалості) часових інтервалів, на яких режими ОЕС можна вважати квазістаціонарними, однак такий підхід априорі негативно впливатиме на точність визначення частот спектру, насамперед на можливість ідентифікації близьких частот. Тому було перевірено властивості також і інших методів обробки сигналів в аспекті можливості їх використання для розв'язання зазначеної задачі.

### Матеріали дослідження

Викладений нижче підхід до оперативного виявлення загрози коливного порушення стійкості ОЕС враховує результати досліджень, частково наведених в [2, 3], і передбачає використання в центрі диспетчерського керування ОЕС результатів синхронізованих вимірювань режимних параметрів (місцями зазначених вимірювань можуть бути як контрольовані перетини ОЕС, так і шини електростанцій). Контролюючи зміну амплітуд низькочастотних складових коливань режимних параметрів, оцінюють їхні «внески» до результуючих коливань режимних параметрів: за «динамікою» зростання зазначених «внесків» можна дійти висновку щодо існування загрози коливного порушення стійкості ОЕС. Для своєчасного виявлення загрози коливного порушення стійкості ОЕС відповідний процес обробки результатів синхронізованих вимірювань повинен відбуватися в реальному часі неперервно.

Для перевірки можливості використання попередньо відібраних методів (перевірки їх придатності)

для виявлення загрози коливного порушення стійкості ОЕС було синтезовано різні сигнали, у складі яких були і близькі за частотами складові. Серед сигналів були як ті, що відповідали стаціонарним процесам, так і сигнали, амплітуди та частоти яких змінювалися зі зміною часу. Крім того, до складу окремих тестових сигналів вводився білий шум.

Спочатку, щоб пересвідчитися, що нестационарність процесів впливає на результати аналізу сигналів, наведемо деякі результати вейвлет-аналізу двох досить простих сигналів: сигналу  $x_1(t) = \exp(0,07t) \cdot \sin(2\pi t \cdot 1,8)$ , амплітуда коливань якого змінюється зі зміною часу, та сигналу  $x_2(t) = \exp(0,07t) \cdot \sin(2\pi t \cdot (1,8 + 0,05t))$ , у якого не лише амплітуда, але і частота коливань змінюється зі зміною часу. Ширина вікна спостереження становила 1 с, зсув вікна — 1 с, частота формування вибірки даних — 50 Гц. На рис. 1—4 показано графіки обвідних амплітуд сигналів  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$ .

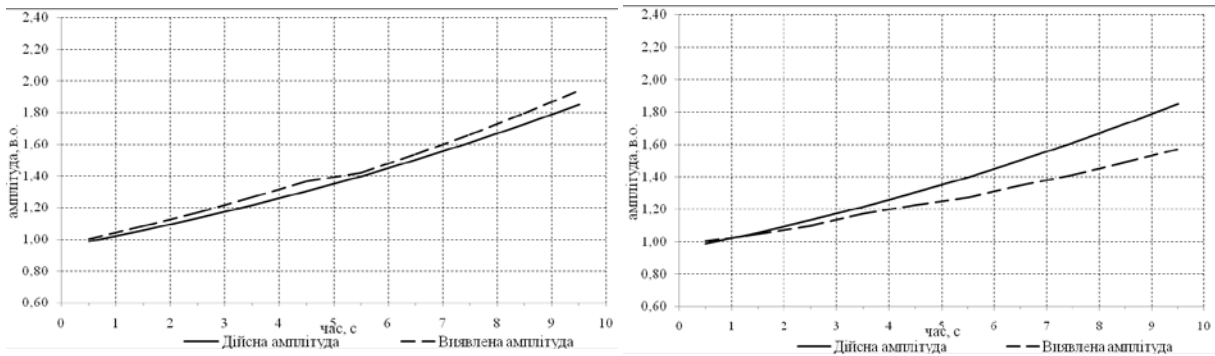


Рис. 1. Результати аналізу сигналів  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$ , отримані з використанням вейвлету Хаара:  
а —  $x_1(t)$ ; б —  $x_2(t)$

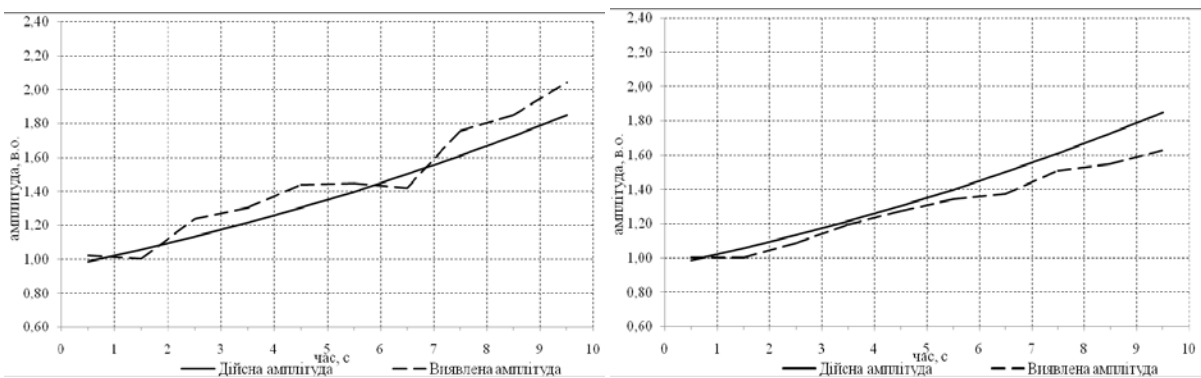


Рис. 2. Результати аналізу сигналів  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$ , отримані з використанням вейвлету Гаусса 4:  
а —  $x_1(t)$ ; б —  $x_2(t)$ .

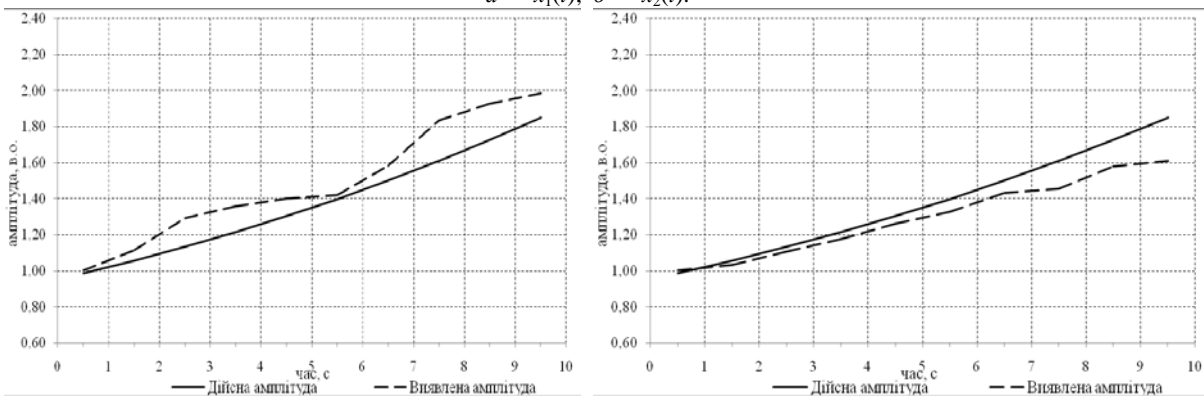


Рис. 3. Результати аналізу сигналів  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$ , отримані з використанням вейвлету Добеші-2:  
а —  $x_1(t)$ ; б —  $x_2(t)$

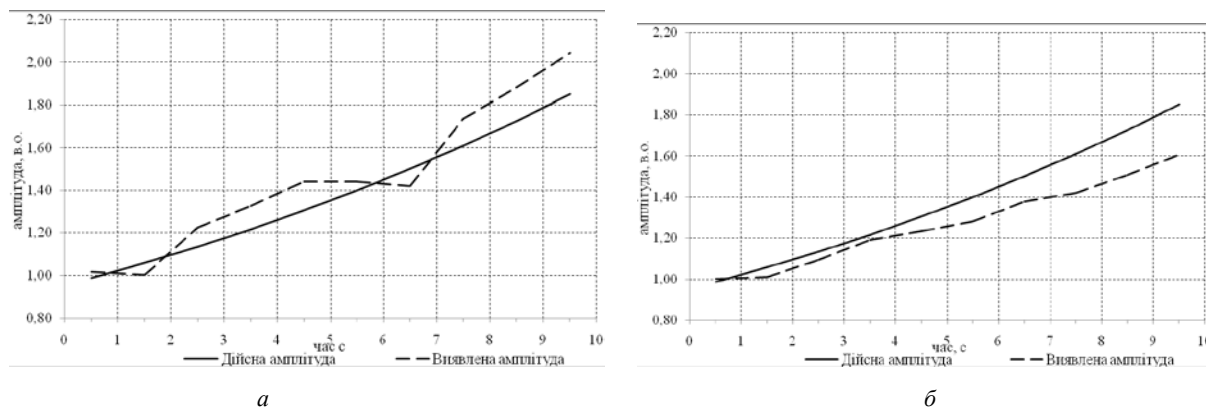


Рис. 4. Результати аналізу сигналів  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$ , отримані з використанням вейвлета «сомбреро» («мексиканський капелюх»): а —  $x_1(t)$ ; б —  $x_2(t)$

Усі показані на рис. 1—4 результати свідчать, що вейвлет-аналіз дозволяє якісно правильно визначити характер зміни амплітуди наведених сигналів, але у разі сигналу  $x_1(t)$  в усіх випадках отримані дещо завищені значення амплітуд, а у разі сигналу  $x_2(t)$  — навпаки, дещо занижені.

Розглянемо інший синтезований сигнал, до складу якого введено 3 низькочастотні складові (з частотами 0,05 Гц, 0,09 Гц та 1,2 Гц), складову основної частоти 50 Гц, дві складові з частотами 150 та 250 Гц і білий шум. Зазначений сигнал подавався (імітувався) вибіркою дискретних значень. Частота дискретизації сигналу під час формування вибірки становила 200 Гц. Амплітуда складової тестового сигналу, що відповідає частоті 50 Гц, залишалася незмінною на часових відрізках  $[0, 10, 0]$  та  $[10, 5... 20]$  секунд, а в інтервалі  $[10, 0... 10, 5]$  секунд вона змінювалася за законом  $A(t) = 1 + 0,5\sin(2\pi(t-10))$ . Графіки обвідних амплітуд різних складових тестового сигналу (за винятком білого шуму) показано на рис. 5: суцільною лінією — складової з частотою 0,05 Гц; штриховою лінією — складової з частотою 0,09 Гц; штрих-пунктирною лінією — складової з частотою 1,2 Гц; пунктирною лінією — складових з частотами 150 Гц та 250 Гц. Амплітуди усіх складових сигналу зведено до амплітуди основної складової (50 Гц) і подано у відносних одиницях (в. о.). Максимальний рівень білого шуму не перевищував 5 % від амплітуди складової 50 Гц. Частота основної складової сигналу змінювалася протягом 20 с від 50...49 Гц лінійно.

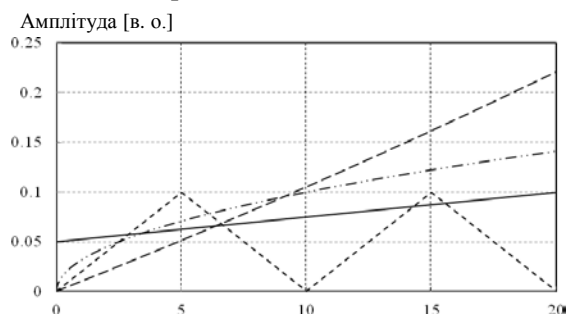


Рис. 5. Зміна у часі амплітуд складових тестового сигналу

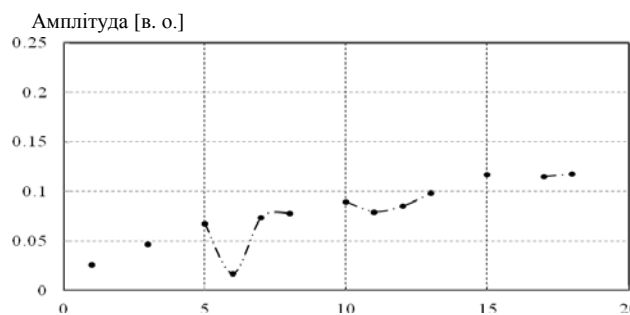


Рис. 6. Зміна у часі амплітуди складової тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц (ширина вікна — 2 с, зсув вікна — 1 с)

Під час дослідження різних методів аналізу з використанням різних тестових сигналів, зокрема і вищезазначеного, бралася до уваги їх «розрізняльна спроможність», швидкодія відповідних програмних процедур (кількість обчислювальних операцій) та ін. Наприклад, перетворення Гільберта-Хуанга [4, 5], яке можна використовувати для дослідження нестационарних процесів, у порівнянні з методом Проні, дозволяє забезпечити високу швидкодію відповідних обчислювальних процедур. Однак воно має і суттєвий недолік — точність перетворення за частотою  $f_p$  [Гц] залежить від ширини вікна спостереження  $t_b$  [с]:  $f_p \approx (t_b)^{-1}$ . Отже, для того, щоб можна було виявити складову, якій відповідає частота 0,09 Гц, ширина вікна спостереження повинна бути не меншою від 11,1...с, а для виявлення складової, якій відповідає частота 0,05 Гц, потрібно мати ширину вікна спостереження, не меншою від 20 с. За інших умов виявлення зазначених складових не гарантовано. Наприклад, у разі використання вікна спостереження шириною у 10 с забезпечується надійне виявлення складової, якій відповідає частота 1,2 Гц (хоча і з деякою похибкою за частотою, викликаною, насамперед, зміною частоти

основної складової тестового сигналу від 50...49 Гц), у п'ятьох вікнах спостереження виявлено складову, якій відповідає частота 0,09 Гц (оскільки значення ширини вікна у 10 с близьке до 11,1... с), однак, складову тестового сигналу, якій відповідає частота 0,05 Гц, не було виявлено. Слід зауважити, що у разі використання вікна спостереження шириною у 2 с складову тестового сигналу, якій відповідає частота 1,2 Гц, теж було виявлено у 13 із 19 вікон (рис. 6), хоча і з деякою похибкою (визначені значення частоти знаходилися у своїй більшості на рівні 1,42 Гц).

Для коректного і надійного розв'язання задачі виявлення загрози коливного порушення стійкості ОЕС доцільно в реальному часі використовувати певну послідовність процедур обробки інформації: спочатку виконується попередня фільтрація даних, одержаних від засобів цифрової реєстрації сигналів, визначаються частоти домінуючих складових коливань режимних параметрів ОЕС, оцінюються «енергетичні внески» низькочастотних складових коливань режимних параметрів до результуючих коливань, використовуючи для такого оцінювання зміну амплітуд низькочастотних складових по відношенню до основної складової коливань (50 Гц).

### Висновки

1. Результати дослідження різних методів аналізу сигналів з використанням синтезованих багатоконпонентних сигналів, що відповідають стаціонарним і нестаціонарним процесам, свідчать, що за однакових «стартових» умов далеко не всі методи можуть успішно справлятися з поставленою задачею виявлення низькочастотних складових сигналів та адекватним відтворенням характеру зміни їхніх амплітуд з плином часу.

2. В результаті виконаних досліджень визначено як доцільні для застосування (в аспекті розв'язання поставленої задачі) методи, так і вимоги до формування та обробки інформації (дискретних вибірок даних — результатів реєстрації режимних параметрів, що надходять в центр диспетчерського керування з відповідних об'єктів ОЕС), які забезпечують найкращі показники застосування кожного із відібраних методів для виявлення в реальному часі небезпеки коливного порушення стійкості ОЕС.

3. Для забезпечення надійного виявлення небезпеки зростання питомої ваги домінуючих низькочастотних складових у коливаннях режимних параметрів ОЕС є доцільним одночасне незалежне використання окремо налаштованих різних процедур обробки інформації (зі своїми вікнами спостереження, різними за шириною), які являють собою реалізацію методів Проні, вейвлет-аналізу, Гільберта-Хуанга та ін.

4. Виконання в реальному часі на кожному часовому інтервалі (у кожному вікні спостереження) зазначених процедур пов'язане з великою кількістю обчислювальних операцій, що потребує використання обчислювальних засобів відповідної потужності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Arango O. J. Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System / O. J. Arango, H. M. Sanchez, D. H. Wilson. — Identification and Remedial Actions», CIGRE Session, 2010 — P. 2—105.
2. Експериментально-модельні дослідження динамічних властивостей електроенергетичних систем / О. Ф. Буткевич, В. С. Буланая, О. Б. Рибіна, В. В. Чижевський // Техн. електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки : темат. вип. — Ч. 4. — 2008. — С. 37—40.
3. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб'єднань / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України : зб. наук. праць. Спец. вип. — 2010. — С. 72—77.
4. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis / Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. L. [and others]. — Proc. R. Soc. London, 1998. — Vol. 454. — P. 903—995.
5. Laila D. S. A Refined Hilbert–Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring / Laila D. S., Messina A. R., Bikash C. P. // IEEE Trans. on Power Systems. — May 2009. — Vol. 24. — No. 2. — P. 610—620.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 20.10.11  
Рекомендована до друку 25.11.11

**Буткевич Олександр Федотович** — головний науковий співробітник.

Інститут електродинаміки НАН України;

**Чижевський Володимир Валерійович** — асистент кафедри електричних мереж та систем.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ