

## ВИМІРЮВАННЯ ПОВІЛЬНИХ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

В. М. Ванько, Н. М. Клепач

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: vvm@lp.edu.ua, nataliafeshchuk@mail.ru

На основі аналізу особливостей виконання вейвлет-перетворення запропоновано реалізацію методики вимірювання повільних збурень і змін напруги за допомогою дискретної трансформації. Розглянуто специфіку обчислення масиву вейвлет-перетворення, виходячи з параметрів базових функцій. Наведено вирази для визначення необхідних показників якості електроенергії в мережі. Теоретично обґрунтовано потребу використання новітніх математичних методів опрацювання інформації під час формування теоретичних засад оцінювання якості електроенергії та узагальнити їх як за умови спотворень напруги в усталеному режимі роботи мережі, так і під час виникнення і перебігу негативних процесів – часових перенапруг, западин напруги та імпульсних відхилень форми напруги в мережах. Досліджено методи контролю і вимірювання одиничних показників якості електроенергії під час повільних коливань і спотворень напруги та динамічних відхилень і змін форми напруги.

**Ключові слова:** показники якості електроенергії, повільні відхилення напруги, вейвлет-перетворення, частотна характеристика, електрична енергія.

## MEASURING OF SLOW VOLTAGE DEVIATIONS USING THE DISCRETE WAVELET-TRANSFORMATIONS

V. M. Van'ko, N. M. Klepach

National University “Lviv Polytechnic”

On the base of the analysis of wavelet-conversion performing peculiarities the realization of slow indignation and voltage change measuring methods with the help of discrete transformation is proposed. The special feature of wavelet-coefficient array calculation proceeding from its start basic function parameters is considered. The expressions aimed at determining the necessary indices of the network electric energy quality are presented. Need for the use of advanced mathematical methods of information processing in the formation of theoretical principles of electricity quality evaluation and their generalization under condition of voltage distortions in the steady state of the network, and during the emergence and progress of negative processes – time overvoltage, voltage and pulse shape variations of voltage is theoretically justified. Methods for monitoring and measuring the performance of individual power quality indices under slow vibrations and voltage distortion and dynamic deviations voltage and its changes are investigated.

**Keywords:** power quality indicators, slow voltage fluctuation, wavelet-transform, frequency response, slow deflection voltage, electricity.

**Актуальність проблеми.** Електрична енергія (ЕЕ) – один із найважливіших матеріальних продуктів суспільства, який знайшов застосування у всіх сферах людської діяльності. Покращення якості ЕЕ у будь-якій галузі промисловості гарантує нормальний перебіг технологічних процесів, а це, своєю чергою, сприяє випуску запланованої кількості продукції належної якості. Крім того, підвищення якості ЕЕ безпосередньо відображається на умовах життя та діяльності людей. Проблема якості ЕЕ знаходиться у центрі уваги багатьох дослідників і працівників сфери електроенергетики. За встановлених режимів експлуатації енергооб'єктів, які забезпечують ЕЕ відповідне коло споживачів, причинами погіршення якості ЕЕ вважають різкозмінні навантаження в електричних мережах. Вони призводять до появи відносно повільних у часі коливань напруги мережі. Їх описують такими показниками якості (ПЯ) ЕЕ: встановлене відхилення середньоквад-

© В. М. Ванько, Н. М. Клепач, 2016

ратичного значення (СКЗ) напруги  $\sigma_{uc}$ , розмах зміни напруги  $\sigma_{up}$ , доза флікера  $P_f$ , частота повторення змін напруги  $F_{uz}$ , відхилення частоти змінної напруги  $\Delta f$  [1]. Характерною особливістю таких змін напруги мережі є випадковість, порушення періодичності і стаціонарності перебігу, що не дозволяє використовувати традиційні методи дослідження цих сигналів, наприклад за допомогою трансформації Фур'є. Тому важливе значення має пошук нових рішень цієї актуальної наукової задачі.

Вдосконалення моніторингу якості електроенергії через аналіз групи ПЯ ЕЕ (на основі вейвлет-перетворення), а також отримання більшого об'єму інформації про досліджуваний об'єкт, дасть можливість детальніше аналізувати причини погіршення якості ЕЕ.

**Аналіз останніх досліджень та розв'язання проблеми.** Як показано раніше [2, 3], ефективним шляхом забезпечення точних вимірювань ПЯ ЕЕ вважають застосування дискретного вейвлет-перетворення (ДВП). За його допомогою зручно опрацьовувати дискретизовані в часі сигнали напруги, отримані з досліджуваної мережі. Використання ДВП доцільне також з огляду на простоту його реалізації і побудови відповідної структури засобу вимірювання, а також, виходячи з потреби забезпечення необхідного рівня метрологічних характеристик вимірювача ПЯ ЕЕ.

В основу ДВП покладена ідея розкладу досліджуваного сигналу  $f_U(t)$ , котрий подається у вигляді дискретного  $\{f_U(k)\}$ , на низькочастотну (згладжену) і високочастотну (деталізовану) складові, що детально описано раніше [2, 3]. При цьому для перетворення формують родину базових вейвлет-функцій – масштабувальних  $\varphi_{mn}(t)$  та деталізувальних  $\psi_{mn}(t)$  – для кожного  $j$ -го рівня розкладу. Кожній базовій функції ставлять у відповідність фільтри розкладу: низькочастотний з  $n$  ваговими коефіцієнтами  $\{g_n\}$  і високочастотний – з  $\{h_n\}$ .

Внаслідок проведеного  $(j+1)$ -го рівня ДВП отримуємо масиви коефіцієнтів апроксимації

$$a_{j+1,x} = (a_{j,n}, \varphi_{j+1,x}) = \sum_n \overline{g_n} \cdot a_{j,n+2x} \quad (1)$$

та деталізувальних коефіцієнтів

$$d_{j+1,x} = (a_{j,n}, \psi_{j+1,x}) = \sum_n \overline{h_n} \cdot a_{j,n+2x} \quad (2)$$

завдяки інформації з попереднього  $j$ -го перетворення –  $\{a_{j,n}\}$ , а на початку алгоритму – на основі значень  $\{f_U(k)\}$ . Причому  $x$  – параметр інтервалу контролю на кожному рівні перетворення досліджуваної функції  $\{f_U(k)\}$ .

Таким чином, застосовуючи ДВП для  $f_U(t)$ , маємо результуючу матрицю вейвлет-коефіцієнтів, котра складається з сукупності деталізувальних коефіцієнтів  $d_{j,k_j}$  та останнього рядка апроксимаційних коефіцієнтів  $a_{N,k_j}$

$$DA_{j\Sigma} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{12}\dots\dots\dots d_{1k_1} \\ d_{21}d_{22}\dots\dots\dots d_{2k_2} \\ \dots\dots\dots \\ d_{j1}d_{j2}\dots\dots\dots d_{jk_j} \\ \dots\dots\dots \\ d_{J1}d_{J2}\dots\dots\dots d_{Jk_J} \\ a_{J1}a_{J2}\dots\dots\dots a_{Jk_J} \end{pmatrix} \cdot \quad (3)$$

Розглянемо приклади ДВП для ймовірних варіантів повільних коливань напруги  $f_U(t)$  мережі. З огляду на відомі дослідження [4–9] можна зосередитися на сигналах напруги у вигляді двох складових: низькочастотної та основної компоненти промислової частоти. При цьому діапазон зміни частот  $f_c$  першої складової варто розглядати від 0,1 до 20 Гц. Для оцінювання впливу ймовірної зміни амплітудного значення  $U_{mc}$  цього сигналу на фоні основної компоненти (з амплітудою  $U_{mS} = 318$  В та частотою  $f_S = 49,5$  Гц) порівнюватимемо результати ДВП при  $U_{mc1} = 7$  В та  $U_{mc2} = 1$  В. Тобто математична модель сигналу повільних коливань напруги мережі матиме вигляд

$$f_U(t) = U_{mS} \cdot \sin(2\pi \cdot f_S \cdot t) + U_{mc} \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t). \quad (4)$$

Виходячи з діапазону ймовірних змін  $f_c$  та рекомендацій [3], вибрали кількість рівнів ДВП  $j = 9$ . Для сигналу з  $f_c = 12,0$  Гц наведено (рис. 1) графіки вейвлет-коефіцієнтів дев'яти рівнів результуючої декомпозиції ДВП. Перетворення виконане за допомогою пари базових функцій  $\phi_{mn}(t)$  і  $\psi_{mn}(t)$  – дискретних функцій Меєра (dmeu) [3]. Слід брати до уваги, що коли частота  $f_c$  складової  $f_U(t)$  потрапляє в проміжок між значеннями центральних частот сусідніх рівнів ДВП, то енергія цієї складової розподіляється між ними. Наприклад, на рис. 1 енергія основної компоненти з  $f_S$  розподіляється між першим  $\{d_1\}$  та другим  $\{d_2\}$  рівнями, а основна енергія низькочастотної складової з  $f_c$  розміщується на четвертому рівні  $\{d_4\}$ .

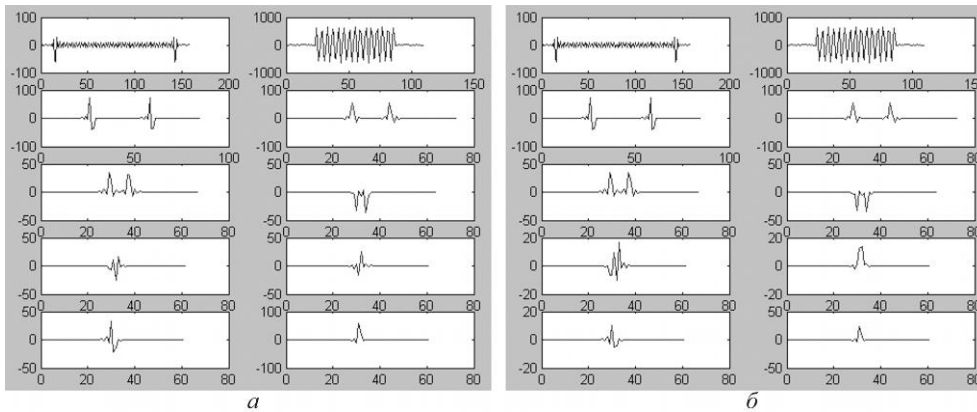


Рис. 1. Графіки вейвлет-коефіцієнтів дев'яти рівнів результуючої декомпозиції ДВП ( $d_1, d_2, \dots, d_9, a_9$ ) для  $U_{mc1} = 7$  В (а) та  $U_{mc2} = 1$  В (б) з частотою  $f_c = 12,0$  Гц.

Для сигналу з  $f_c = 5,9$  Гц (рис. 2) отримаємо графіки вейвлет-коефіцієнтів ДВП з тими ж двома варіантами амплітуд низькочастотної складової. При цьому основна енергія останньої знаходиться на рівні  $\{d_5\}$ .

Якщо розглядаємо варіант сигналу з  $f_c = 1,0$  Гц, то головний внесок енергії потрібної складової є на рівні  $\{d_7\}$  (рис. 3). Коли є сигнал з  $f_c = 0,2$  Гц, то основна енергія цієї складової розміщена на рівнях  $\{d_1\}$  і  $\{a_1\}$  (рис. 4).

З наведених графіків можна зробити висновок, що через суттєву різницю у рівнях між обома складовими досліджуваних сигналів для їх отримання у дискретній формі все-таки потрібно застосовувати аналого-цифровий перетворювач з розрядністю вихідних кодів не менше дванадцяти.

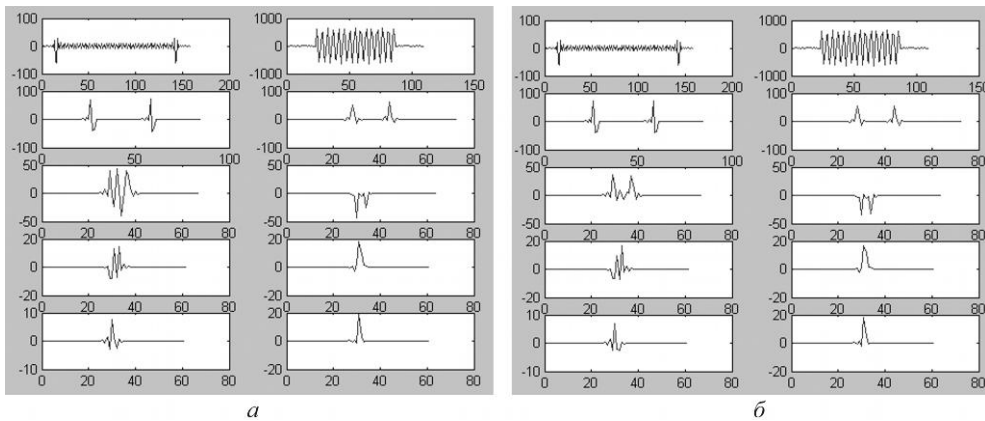


Рис. 2. Графіки вейвлет-коефіцієнтів дев'яти рівнів результуючої декомпозиції ДВП ( $d_1, d_2, \dots, d_9, a_9$ ) для  $U_{mc1} = 7$  В (а) та  $U_{mc2} = 1$  В (б) з частотою  $f_c = 5,9$  Гц.

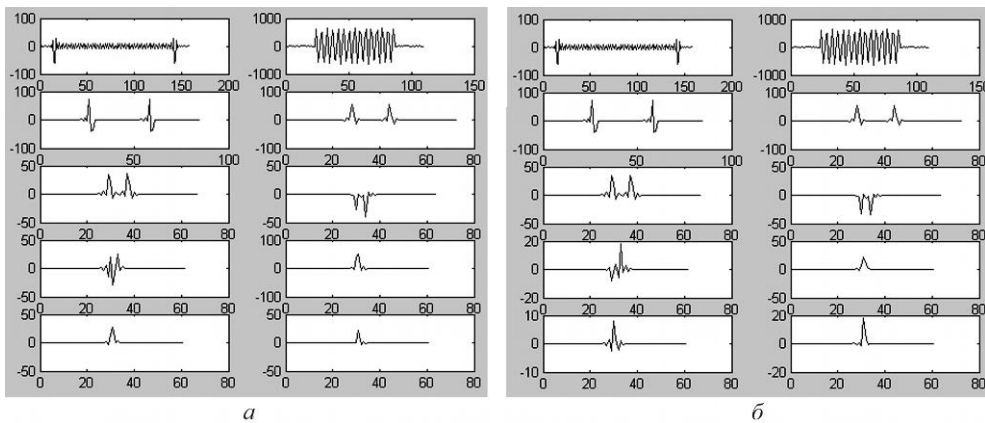


Рис. 3. Графіки вейвлет-коефіцієнтів дев'яти рівнів результуючої декомпозиції ДВП ( $d_1, d_2, \dots, d_9, a_9$ ) для  $U_{mc1} = 7$  В (а) та  $U_{mc2} = 1$  В (б) з частотою  $f_c = 1,0$  Гц.

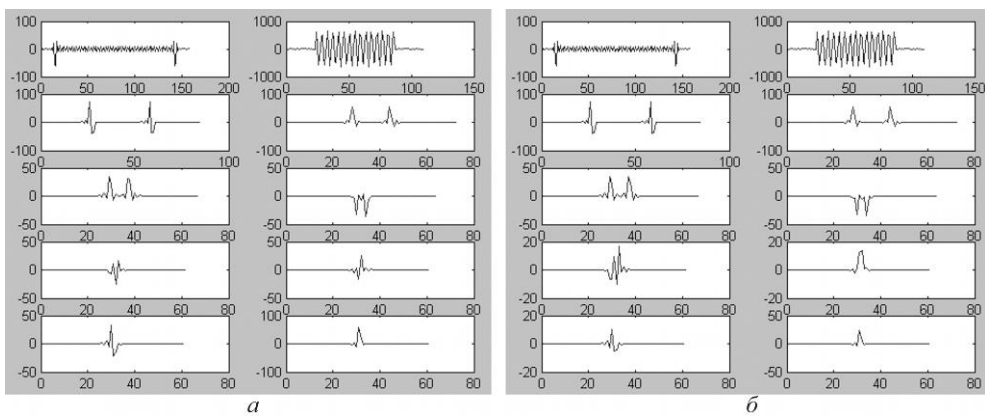


Рис. 4. Графіки вейвлет-коефіцієнтів дев'яти рівнів результуючої декомпозиції ДВП ( $d_1, d_2, \dots, d_9, a_9$ ) для  $U_{mc1} = 7$  В (а) та  $U_{mc2} = 1$  В (б) з частотою  $f_c = 0,2$  Гц.

Як відомо [1, 3], для визначення більшості з наведених вище повільних ПЯ ЕЕ використовують СКЗ функції  $f_U(t)$ . На основі знайденої матриці вейвлет-коефіцієнтів (3) протягом одного інтервалу вимірювання  $t_B$ , що містить  $N_B$  точок дискретизації сигналу  $\{f_U(k)\}$ , СКЗ цієї функції

$$(f_U)_{ck} = \sqrt{\frac{1}{N_B} \cdot \left[ \sum_n (a_{J,n+2x})^2 + \sum_n \sum_{j=1}^J (d_{j,n+2x})^2 \right]}, \quad (5)$$

де  $j = 1, 2, \dots, J$ .

Відповідно до праці [1], для інтервалу  $t_B$  одразу можна визначити один з повільних ПЯ ЕЕ

$$\sigma_{u_{ec}} = \frac{(f_U)_{ck} - 1}{U_{ном}} \quad (6)$$

для мережі з номінальною напругою  $U_{ном}$ . Як було вказано, одним з важливих ПЯ ЕЕ є розмах зміни напруги

$$\sigma_{u_p} = \frac{|(f_U)_{ck,r} - (f_U)_{ck,r+1}|}{U_{ном}}, \quad (7)$$

який визначають як відносну зміну між двома сусідніми екстремумами СКЗ напруги чи екстремумом і горизонтальною кривою зміни СКЗ напруги протягом інтервалу дослідження. Цей ПЯ ЕЕ можна застосувати для аналізу дози флікера  $P_\phi$  як низькочастотної функції зміни СКЗ напруги. У такому разі під час застосування ДВП у трактуванні ПЯ за виразом (7) матрицю (3) можна подати у вигляді деталізованої характеристики відхилень напруги мережі, тобто як певне розширене тлумачення формули (6), а саме:

$$\sigma_{u_{ec}} = |(\sigma_{u_{ec1}} \sigma_{u_{ec2}} \dots \sigma_{u_{ecJ}})|. \quad (8)$$

Йдеться про застосування виразу (6) і відповідної модифікації (5) для кожного з рівнів декомпозиції ДВП  $\{f_U(k)\}$ , як показано на рисунках. Таке тлумачення (8) дозволяє виокремити відхилення напруги мережі, пов'язані окремо зі зміною СКЗ основної складової промислової частоти та з відхиленнями, викликаними низькочастотними коливаннями у мережі.

## ВИСНОВКИ

На підставі використаного методу вейвлет-перетворення сигналів напруги показано можливість вдосконалення моніторингу якості ЕЕ у мережах завдяки отриманню розширеної інформації про процеси, що виникають і призводять до утворення повільних збурень напруги і, відповідно, до погіршення роботи різноманітного устаткування.

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К.: Держстандарт України, 1999. – 32 с. – Введ. 01.01.2000.
2. Białasiewicz J. T. Falki i aproksymacje. – Warszawa: Wydawnictwo Nauk.-Techn., 2004. – 254 s.
3. Ванько В. М. Вимірювання показників якості електроенергії на основі дискретного вейвлет-перетворення // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 551. – С. 13–18.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 332 с.
5. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
6. Овчаренко Н. И. Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
7. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
8. Сегеда М. С. Электричні мережі та системи. – Львів: НМК ВО, Каменярь, 1999. – 296 с.
9. Jakość energii elektrycznej w sieciach niskiego napięcia. Zmiana zasad projektowania sieci dla poprawy jakości energii elektrycznej / A. Dan, P. Santarius, J. Gavlas, M. Kuźela. – Wrocław: Polskie Centrum Promocji Miedzi S. A., 2002. – 48 s.

Одержано 06.10.2015