

## УЗАГАЛЬНЕНИЙ ІДЕНТИФІКАТОР НАЯВНОСТІ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**А.В. Волошко\***, докт. техн. наук  
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,  
Пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.  
E-mail: [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)

*Розробка заходів по забезпеченню якості електричної енергії можлива тільки після оцінки фактичного стану якості електричної енергії у всіх вузлах електричної мережі. Тому в основу системи забезпечення необхідної якості електричної енергії повинно бути покладено систему її моніторингу. Представлено підхід до побудови системи моніторингу якості електричної енергії у реальному часі шляхом розробки узагальненого ідентифікатора наявності спотворення якості електричної енергії незалежно від його типу, часу появи та тривалості на основі побудови просторово-часового розподілу інформаційного сигналу і подальшого ортогонального аналізу частотно-часових змін його спектральних компонент. Це дає змогу створення системи моніторингу якості електричної енергії в реальному часі на відміну від існуючих методів, під час застосування яких проводиться послідовна обробка вимірювального сигналу для визначення окремих показників якості електричної енергії, що унеможливує його проведення в реальному часі. Бібл. 10, рис. 2.*

**Ключові слова:** якість електричної енергії, спотворення параметрів якості електричної енергії, вейвлет-аналіз.

**Вступ.** Аналіз сучасного стану електроенергетичної галузі України свідчить, що її інтеграція з електроенергетичним сектором країн ЄС можлива тільки за умови дотримання жорстких вимог до параметрів якості електричної енергії, які повинні знаходитися у межах допустимих рівнів, встановлених у нормативних документах [1]. При цьому слід зауважити, що якість електричної енергії в значній мірі впливає на надійність функціонування електроенергетики України і є постійно діючим фактором, який може призводити до необґрунтованих економічних втрат як безпосередньо енергопостачальних компаній, так і багатьох споживачів електричної енергії.

Одним із заходів вирішення даних питань є створення системи моніторингу якості електричної енергії в реальному часі на основі такого математичного апарату, який би надавав змогу проводити не тільки визначення наявності спотворень якості електричної енергії, але і необхідність подальшої обробки вимірювальної інформації і при цьому бути адаптивним до сингулярної поведінки інформаційного сигналу.

**Літературний огляд.** Як слідує із нормативних документів [1], показники якості електричної енергії розподіляються на дві групи: безперервні явища, тобто відхилення від номінального значення, що мають місце протягом усього часу, та випадкові події з напругою, тобто раптові та істотні відхилення від нормальної чи бажаної форми кривої напруги. Гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг відносяться до першої групи, а перехідні процеси напруги, зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші високочастотні спотворення складають другу групу.

Велика кількість методів обробки інформаційних сигналів використовується задля визначення показників якості електричної енергії. Всім їм притамані як переваги так і недоліки для застосування їх в системах моніторингу якості електричної енергії (ЯЕЕ).

Аналіз літературних джерел дав змогу окреслити основні існуючі методи ідентифікації наявності та типу спотворень якості електричної енергії:

- штучні нейронні мережі (скриті марківські моделі). Досліджувалися ученими Perunicic (1998 p.), Santoso (2000 p.), Gaouda (2002 p.), Gaing (2004 p.), Mishra (2008 p.), Zwe-Lee Ching (2004–2012 p.p.) [2];
- на основі експертних систем – Santoso (2000 p.), Styvaktakis (2001, 2002 p.), Chung (2002–2009 p. p.), Reaz (2007–2011 p. p.) та адаптивної нечіткої експертної системи – Ibrahim (2001 p.) [3];
- експертні системи із нечіткою логікою – Dash (2000 p.), Tharak (2003 p.), Zau (2004 p.), Chilukuri (2004–2008 p. p.), Ortiz (2006–2009 p. p.), Bizjak (2006–2010 p. p.) [4];
- SVM – методологія навчання за прецедентами (Bishop, Moulin, Lin, Axelberg, Roberts [5];

- комбіновані методи – штучні нейронні мережі та SVM [6];
- вейвлети та моделі Маркова [7];
- експертні системи із нечіткою логікою та Фур'є-аналіз [8].

Аналіз особливостей застосування даних методів показав наступне. Використання скритих марківських моделей потребує знання статистичних властивостей сигналів. Метод опорних векторів використовується в основному для вирішення задач класифікації та регресійного аналізу, а нейромережеві експертні системи, зазвичай, призначені для розв'язання задач діагностики та прогнозування. При цьому слід враховувати, що навчання та перенавчання штучних нейронних мереж є багатопараметричною задачею нелінійної оптимізації та вимагає багато часу. Таким чином застосування зазначених методів для ідентифікації спотворень ЯЕЕ в реальному часі не можна вважати достатньо ефективним.

Враховуючи вищевикладене, у даній роботі розглядається швидке перетворення Фур'є як один із найпоширеніших методів визначення параметрів якості електричної енергії та метод вейвлет-аналізу, просторово-часові властивості якого є цілком прийнятними для виявлення наявності спотворення ЯЕЕ, його початку і тривалості та подальшого визначення та класифікації цього спотворення.

**Метою даної роботи** є розроблення узагальненого ідентифікатора визначення наявності спотворення ЯЕЕ незалежно від його типу, часу появи та тривалості у реальному часі.

#### **Розробка способу однозначної ідентифікації наявності спотворень якості електроенергії.**

На даний час не існує узагальненого ідентифікатора визначення наявності довільного типу спотворень. Тому актуальною із науково-практичної точки зору є розробка способу однозначної ідентифікації погіршення ЯЕЕ у реальному часі. Як показують результати багатьох досліджень для аналізу структури сигналів різноманітної тривалості необхідні частотно-часові атоми з різноманітними часовими носіями.

В ортогональних перетвореннях як сімейства таких частотно-часових атомів застосовується вейвлет-функція  $\psi_{u,s}(t)$  в результаті її масштабування на величину  $s$  і зсуву на величину  $u$

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right). \quad (1)$$

При цьому, ортогональне перетворення  $\psi \in L^2(R)$  від часу  $u$  і масштабу  $s \in \text{наступним}$ :

$$Wf(u,s) = \left\langle f, \psi_{u,s} \right\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt, \quad (2)$$

де  $\langle f, \psi_{u,s} \rangle$  – скалярний добуток.

Як слідує із виразу (2), вейвлет-перетворення може фокусуватися на локальних структурах сигналу за допомогою процедури наближення та віддалення об'єктів, яка поступово зменшує/збільшує масштабний параметр. Особливості та негладкі структури сигналу часто містять основну інформацію щодо його характеристики. Оскільки локальна гладкість сигналу характеризується зменшенням амплітуди вейвлет-перетворення зі зменшенням масштабу, в роботі досліджено особливості і перепади сигналу шляхом аналізу локальних максимумів вейвлет-перетворення за малих масштабів, що дало змогу деталізувати місця «аномалій» у сигналі [9].

Як відзначається в науковій літературі, зменшення амплітуди вейвлет-коефіцієнтів в залежності від масштабу пов'язано з рівномірною і точковою гладкістю Ліпшиця сигналу. Вимірювання цього асимптотичного убудання еквівалентне наближенню структур сигналу за масштаба, який прямує до нуля. Тобто, якщо  $f \in L^2(R)$  задовольняє умові Ліпшиця  $\alpha$ ,  $\alpha \leq n$  на  $[a, b]$ , то існує  $A > 0$  таке, що

$$\forall (u,s) \in [a,b] \times R^+ \quad |Wf(u,s)| \leq As^{\alpha+1/2}. \quad (3)$$

Нерівність (3) є умовою асимптотичного спадання  $|Wf(u,s)|$ , якщо  $s$  прямує до нуля. При цьому, у разі зменшення масштабу  $s$  функція  $|Wf(u,s)|$  характеризує дрібномасштабні зміни довкілля  $u$ . Масштаб  $s$  має бути більше 2, в протилежному випадку крок вибірки може бути більше носія вейвлета. Тому під час обчислення найменший масштаб вейвлет-перетворення обмежений

розділенням дискретних даних. Як відомо, дискретне вейвлет-перетворення обчислюється з масштабом  $2^j \geq s \geq \mu N^{-1}$ , де  $\mu$  може бути достатньо велике для того, щоб усунути вплив неточної вибірки на вейвлети найменшого масштабу. Тому найбільший масштаб  $2^j$  потрібно обирати так, щоб він був меншим, ніж відстань між двома послідовними особливостями у часі для того, щоб запобігти впливу інших особливостей на  $Wf(u, s)$ .

За кожного масштабу  $2^j$  представлення максимумів дає значення  $Wf(u, 2^j)$  там, де  $|Wf(u, 2^j)|$  – локальний максимум. При цьому, коли значення функції  $f(t)$  зсунуте на  $\tau$ , кожне  $Wf(u, 2^j)$  також зсунуте на  $\tau$ , як і їхні максимуми.

#### Апробація результатів дослідження.

Задля перевірки адекватності теоретичного рішення та його практичної значимості було проведено порівняльний аналіз результатів обробки сигналів за допомогою Фур'є та вейвлет-аналізу. Як інформаційні сигнали було вибрано наступне: наявність розривів I роду (перепадів амплітуди) та наявність третьої та п'ятої гармонік на різних періодах основного сигналу.

Результати Фур'є-аналізу свідчили про наявність аномалій у сигналі (розривів I роду) та наявність третьої й п'ятої гармоніки, але без ідентифікації часу їхнього виникнення та тривалості. Результати вейвлет-аналізу показали наступне. Наявність вейвлет-коефіцієнтів першого рівня вейвлет-декомпозиції ( $Wf(u, 2^j)$ ) – cDI свідчили про наявність аномалій у сигналі (розривів I роду), наявність 3 та 5 гармонік в сигналі із зазначенням часу їхнього виникнення та тривалості протяжності.

Проаналізуємо вплив наявності спотворень ЯЕЕ, які присутні в інформаційному сигналі, на результати його ортогонального перетворення (рис. 1 та 2). Рис. 1 – вейвлет-декомпозиція інформаційних сигналів: а – синусоїдальний сигнал та наявність перевищення номінального значення напруги; б – синусоїдальний сигнал із наявністю шуму (SNR – 20%) та пониження номінального значення напруги. Рис. 2 – вейвлет-декомпозиція сигналу з провалом номінального значення (а) та знешумленого сигналу (б).

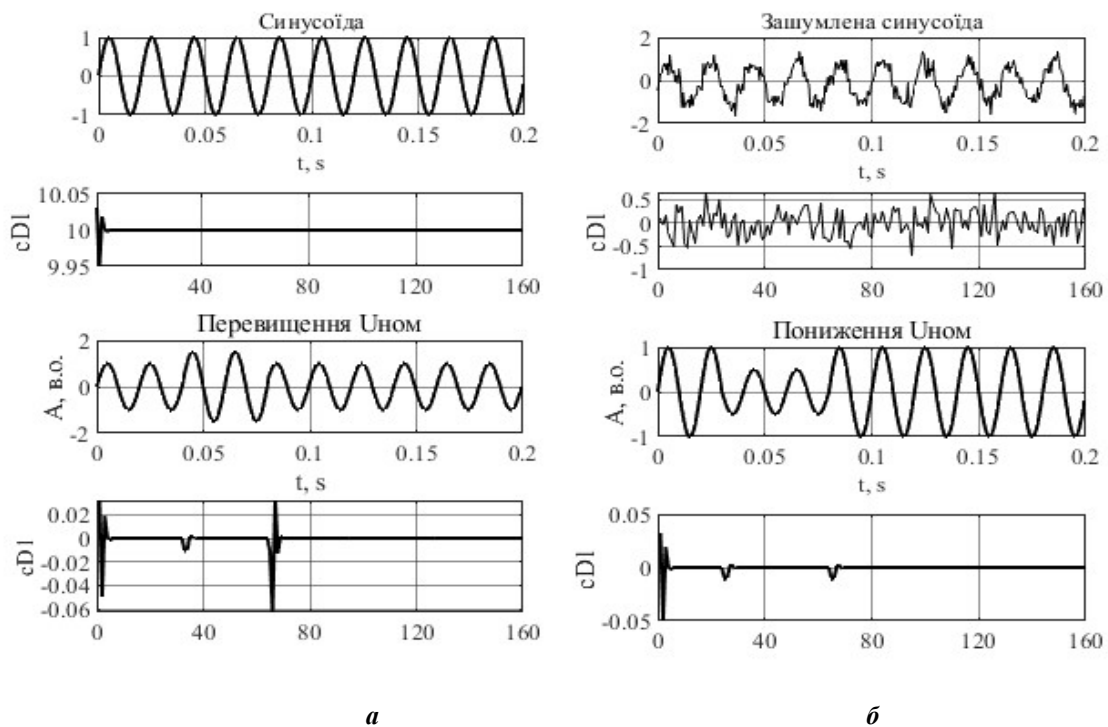


Рис. 1

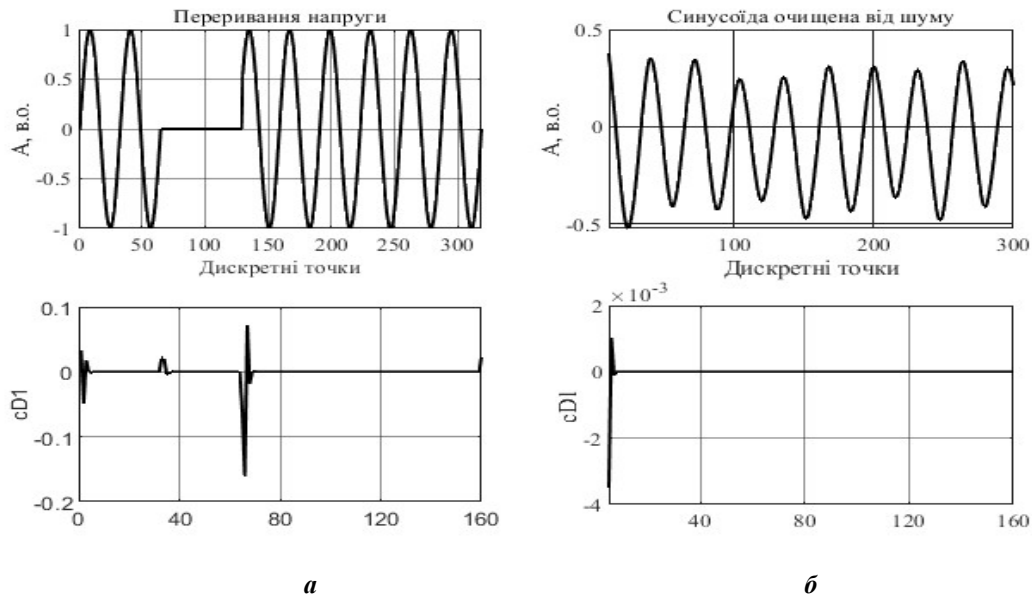


Рис. 2

Видалення шумової компоненти (розглядалася наявність адитивного білого Гаусового шуму із середнім нулем і стандартним відхиленням  $\sigma$ ) проводилося вибором адаптивного порогового значення шуму  $\lambda_{\text{адап}} = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{лок}}}$ , де  $\sigma_{\text{лок}}$  – локальна середньоквадратична похибка досліджуваного сигналу та типу порогової обробки [10]

$$c\hat{D}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(cD_{j,k}) \left( |cD_{j,k}| - \eta \left( \lambda_j, 0 |cD_{j,k}| \right) \lambda_j \right), & |cD_{j,k}| \geq \lambda_j \\ 0, & |cD_{j,k}| \leq \lambda_j \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\lambda_j$  – порогове значення  $j$ -го рівня вейвлет-перетворення;  $cD_{j,k}$  – деталізуючий вейвлет-коефіцієнт  $j$ -го рівня. За умови  $\eta \rightarrow \infty$  вираз (4) є еквівалентним жорсткій пороговій обробці, а у випадку  $\eta \rightarrow 1$  (у нашому випадку) – м'якій. Як слідує із результатів дослідження наявність спотворення в сигналах любого типу призводить до появи значення деталізуючого коефіцієнта першого рівня вейвлет-декомпозиції ( $cD1$ ), відмінного від нуля.

За наявності синусоїдального сигналу  $cD1 = 0$  інформаційний сигнал не містить спотворень. Спотворення типу пониження / перевищення номінального значення напруги (інформаційного сигналу) та переривання напруги призводить до появи значення коефіцієнту  $cD1$  з позначенням початку та закінчення спотворення. Наявність шумової компоненти в інформаційному сигналі призводить до появи деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції, відмінного від нуля.

### Висновки.

1. Аналіз отриманих результатів вейвлет-декомпозиції синусоїдального сигналу та сигналів із наявністю спотворень якості електричної енергії (значення деталізуючих коефіцієнтів першого рівня декомпозиції) показує можливість безпосереднього виявлення спотворень та визначення початку та/або закінчення дії відповідного спотворення за значенням деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції. Даний деталізуючий коефіцієнт першого рівня вейвлет-перетворення має нульові значення у більшості точок за виключенням тих, в яких порушення відбувається.

2. Наявність деталізуючого коефіцієнта вейвлет-аналізу ( $cD1$ ) слугує як узагальнений ідентифікатор наявності спотворення якості електричної енергії незалежно від його типу. В протилежність підходу запропонованого в даній роботі, у інших роботах проводиться послідовна обробка вимірювального сигналу для визначення окремих показників якості електричної енергії, що

унеможливує розробку системи проведення моніторингу якості електричної енергії в реальному часі.

3. Подальша вейвлет-декомпозиція інформаційного сигналу ( $j \rightarrow J_{\text{необх}}$ , який залежить від максимальної частоти інформаційного сигналу) дає змогу не тільки ідентифікувати наявність спотворення ЯЕЕ, але і, за необхідності, визначати їх тип та джерело появи.

1. EN 50160:2010&A1:2015&A2:2019&A3:2019 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. (NSAI), 2019. 36 p.
2. Zwe-Lee Gaing. Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2004. Vol. 19. No 4. Pp. 1560-1567.
3. Emmanouil S., Bollen M.H.J., Gu I.Y.H. Expert system for classification and analysis of Power system event's. *IEEE Trans. On Power Delivery*. 2002. Vol. 17. No 2. Pp. 423-428.
4. Bizjak B., Planinsic P. Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic. 12<sup>th</sup> International *Power Electronics and Motion Control* Conference. Portoroz, 30 August–1 September 2006. Pp. 1356-1360.
5. Axelberg, P., Gu I.Y.-H., Bollen M. H. Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No 3. Pp. 1297-1303.
6. Janic P. Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. No 3. Pp. 1663-1669.
7. Grouse M.S., Nowak R.D., Baraniuk R.G. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models. *IEEE Trans. Signal Processing*. 1998. Vol. 46. No 4. Pp. 886-902.
8. Dash P.K., Mishra K.S., Salama M.M.A. Classification of Power Disturbances using a Fuzzy expert system and a Fourier linear combiner. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2000. Vol. 15. No 2. Pp. 472-477.
9. Mallat S.A. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 1989. Vol. 11. Pp. 674-693.
10. Coh H.H., Liao L., Zhang D., Dai W., Lim C.S. Denoising Transient Power Quality Using an Improved Adaptive Wavelet Threshold Method Based on Energy Optimization. *Energies*. 2022. No 15. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093081>.

## GENERALIZED IDENTIFIER OF THE PRESENCE OF DISTORTIONS OF QUALITY OF ELECTRICITY

**A.V. Voloshko**

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
37, prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine.**

**E-mail: [avolosko820@gmail.com](mailto:avolosko820@gmail.com)**

*Development of measures to ensure the quality of electricity is possible only after assessing the actual state of electricity quality in all nodes of the electricity network. Therefore, the system of ensuring the required quality of electricity should be based on its monitoring system. An approach to building a real-time electricity quality monitoring system by developing a generalized identifier for the presence of electricity quality distortion regardless of its type is presented, time of occurrence and duration based on the construction of spatio-temporal distribution of the information signal and subsequent orthogonal analysis of frequency-temporal changes of its spectral components. This allows the creation of a system of real-time monitoring of electricity quality in contrast to existing methods, when using which the sequential processing of the measuring signal is carried out to determine certain indicators of the quality of electric energy, which makes it impossible to conduct it in real time. References 10, figures 2.*

**Keywords:** electricity quality, distortion of electric energy quality parameters, wavelet analysis.

Надійшла 02.06.2022  
Остаточний варіант 21.07.2022