

УДК 621.314

*Представлено підхід до побудови системи моніторингу якості електричної енергії у реальному часі, який полягає у побудові просторово-часового розподілу інформаційного сигналу і подальшого ортогонального аналізу частотно-часових змін його спектральних компонент. Впровадження узагальненого коефіцієнту визначення наявності спотворення якості електричної енергії дозволило проводити її моніторинг у реальному часі*

*Ключові слова: якість електричної енергії, ортогональні вейвлет-перетворення, децентралізовані системи електропостачання, узагальнений коефіцієнт якості*

*Представлен подход к построению системы мониторинга качества электрической энергии в реальном времени, заключающийся в построении пространственно-временного распределения информационного сигнала и дальнейшего ортогонального анализа частотно-временных изменений его спектральных компонент. Внедрение обобщенного коэффициента определения наличия ухудшения качества электрической энергии позволило проводить ее мониторинг в реальном времени*

*Ключевые слова: качество электрической энергии, ортогональные вейвлет-преобразования, децентрализованные системы электропостачания, обобщенный коэффициент качества*

# СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**Є. Т. Володарський**

Доктор технічних наук, професор  
Кафедра автоматизації  
експериментальних досліджень\*

E-mail: vet-1@ukr.net

**А. В. Волошко**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра електропостачання  
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту\*

E-mail: a-voloshko@yandex.ru

\*Національний технічний університет  
«Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. 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 знаходитись у межах допустимих рівнів, встановлених у нормативних документах [1, 2]. 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.

Так за даними зарубіжних досліджень [3] втрати країн Європи від неякісної електричної енергії щорічно сягають десятки млрд. євро. Аналогічні дані по Україні на даний час відсутні, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються тільки науковці, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію щорічного зросту (в США, наприклад, за останні десять років вони подвоїлись).

## 2. Літературний огляд

Як відомо, існує дві основні групи спотворень якості електричної енергії: стаціонарні (або квазістаціонарні) і спотворення, що змінюються у часі [2]. Гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг відносяться до першої групи, а перехідні процеси напруги (voltage transient), зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші височастотні спотворення складають другу групу.

Велика кількість методів обробки інформаційних сигналів використовується для визначення показників якості електричної енергії. Так одним із найбільш поширених є, так званий, метод середньоквадратичних значень на основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією, яка забезпечує задовільну апроксимацію амплітуди основної частоти електричної мережі. Перевагою даного методу є його простота, швидкість обчислень, незначний об'єм пам'яті для зберігання результатів обчислень [8]. Але його результати дуже залежать від розміру обчислювального вікна і при цьому не розрізняються гармоніки та компонентні шуму. На даний час цей метод використовується тільки для визначення середньоквадратичного зна-

чення напруги електричної мережі та для автоматичної класифікації сигналів.

Необхідно також відмітити широке застосування для визначення показників якості електричної енергії фільтрів Калмана, які визначають просторовий стан моделі сигналу для визначення амплітуди і фази основної частоти і гармонік навіть за наявності шуму [9]. Недоліком є велика похибка при визначенні короткочасних і високочастотних спотворень.

Найбільш широко використовуваним апаратом для аналізу параметрів якості електричної енергії є швидке перетворення Фур'є (ШПФ), яке трансформує сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонент [10]. Але алгоритм Фур'є має декілька джерел методичних похибок, які призводять до зниження точності результатів аналізу та його якісного спотворення. Головним недоліком є обмеженість частотної роздільності та недостатня точність оцінки частоти окремої гармонічної компоненти. У першому випадку – це роздільна здатність розділення двох спектральних компонент із близькими частотами, а в другому – правильність визначення частоти відокремленої гармонічної компоненти.

Для підвищення точності проведення перетворення Фур'є застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіювання (коли довжина часової вибірки не дорівнює періоду функції, яка аналізується) виконується синхронізація частоти дискретизації із частотою сигналу [11], доповнення нулями вихідної вибірки аналізуємого сигналу [12] або застосовуються часові або спектральні вікна [13]. Ефективним засобом зменшення спектральних витоків є застосування віконних функцій у відповідності із інтерполяційним алгоритмом [14, 15].

Але дані способи не забезпечують збільшення частотної роздільності. Застосування часових або спектральних вікон дозволяє зменшити ефект розсіювання внаслідок погіршення частотної роздільності (у зв'язку із виключенням частини інформації про аналізуємую функцію), а у випадку доповнення вихідної вибірки нулями збільшується вибірність оцінювання частот вузькосмугових спектральних піків завдяки зменшенню нерівномірності амплітудно-частотної характеристики і, відповідно, похибок, які пов'язані із її нерівномірністю.

В основному, розглянуті вище засоби ідентифікації спотворень, застосовуються для простих (однотипових) спотворень. Стосовно до електроенергетичних систем необхідно відмітити їх особливість – це наявність в одному інтервалі часу (періоді) декількох типів спотворень сигналу. Ідентифікація двох типів спотворень висвітлена такими вченими, Abdel-Galil (2004 p.) [16] та He (2006 p.) [17]. У подальшому Riberio у 2007 році запропонував принцип поділу електричного сигналу на ряд простих компонент для класифікації спотворень у електричній мережі [18]. Але запропонований підхід був досить складним і не дозволяв класифікувати флікер (коливання частоти), інтергармонікитанесиметрію. Lieu у 2007 році запропонував водночас версії машини опорних векторів (SVM) для ідентифікації складних спотворень. Хоча це і дозволило ідентифікувати гармоніки і напругу одночасно, але ідентифікація потребувала багато часу та попередньо зі-

браних даних для тренування моделі [19]. Hyvarinen у 1999 p. [20] запропонував метод ICA (Independend component analysis), який у 2009 p. D. Ferreira [21] модифікував для ідентифікації декількох одночасних спотворень. Цей метод був здатний виділяти інформацію між незалежними джерелами спотворень для моделювання експериментальних даних. Але його застосування в електричній мережі дає значну похибку, яка обумовлена наявністю шумових компонент та інших інформаційних сигналів.

Застосування вейвлет-аналізу для ідентифікації і класифікації спотворень якості електричної енергії інтенсивно почало розроблятися на початку 2000 року. Слід відмітити роботи Yang (2000 p.), Elmitwally та Yang (2001 p.) [22], Gaouda (1999 p.), головною метою яких ставилось усунення шуму спотвореного сигналу його визначенням та локалізацією. Подальші дослідження показали суттєву залежність вектору ознак ідентифікації від шуму. Dwivedi (2009 p.) [23] запропонував простий і комплексний метод для побудови вектору ознак ідентифікації спотворень сигналу при наявності шуму. Даний метод не потребував рутинної роботи по видаленню шуму обробкою кожного вейвлет-коефіцієнту і базувався на техніці Колмогорова-Смирнова [24].

Аналіз літературних джерел дозволив окреслити основні існуючі методи ідентифікації типу спотворень якості електричної енергії:

- штучні нейронні мережі (скриті марківські моделі). Досліджувались ученими Perunicic (1998 p.), Santoso (2000 p.), Gaouda (2002 p.), Gaing (2004 p.), Mishra (2008 p.), Zwe-Lee Ching (2004–2012 p. p.) [25];
- 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.) [26];
- 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.) [27];
- SVM – методологія навчання за прецедентами (Bishop, Moulin, Lin, Axelberg, Roberts [28];
- комбіновані методи – штучні нейронні мережі та SVM [29];
- вейвлети та моделі Маркова [30], експертні системи із нечіткою логікою та Фур'є-аналіз [31].

Аналіз застосування даних методів дозволив окреслити найважливіші проблеми при класифікації спотворень електричної енергії, які не достатньо вирішені на даний час. До них відносяться наступні:

- більшість методів класифікації розрізняють тип спотворень без аналізу їх появи в той час, як однакові типи спотворень можуть виникати за різними причинами;
- у значній кількості методів розглядаються окремо або спотворення
- перехідних процесів, або короткочасних і високочастотних, що не дозволяє застосування уніфікованих методик та методів їх визначення;
- можливо визначити час появи спотворення та його тривалість тільки за допомогою декількох методів класифікації;

- на компактність і локалізацію властивостей сигналу у часово-частотному просторі суттєво впливає вибір базису розкладання сигналу, що в свою чергу призводить до появи похибок класифікації;
- кількості та місцезнаходження джерела спотворення якості електричної енергії у СЕП відомі дуже приблизно, а рівень спотворень, які вони вносять, практично невідомий (при цьому відмічено, що джерел спотворень може бути декілька);
- нормування окремих показників якості електричної енергії (ПЯЕ) здійснюється за умови, що в даний момент часу має місце тільки один тип порушення ЯЕЕ. Тобто, одночасна дія декількох типів спотворень не розглядається і не враховується;
- на даний час відсутній безперервний контроль параметрів ЯЕЕ.

Виходячи із вищенаведеного, для побудови системи моніторингу параметрів якості електричної енергії, необхідно розробити такі методи та алгоритми, що їх реалізують, які дозволять:

- визначати та ідентифікувати спотворення напруги і струму незалежно від типу електрообладнання, що спричинило дані спотворення (характер певного типу спотворення відрізняється в залежності від типу електрообладнання);
- забезпечити виявлення причини виникнення спотворення та встановити джерело такого спотворення;
- забезпечити визначення окремих типів спотворення, які одночасно наявні у електричній мережі;
- зменшити вплив шуму на достовірність ідентифікації спотворень сигналів у електричній мережі;
- розробити узагальнений коефіцієнт (параметр) визначення наявності спотворення ЯЕЕ, який би дозволив проведення моніторингу якості електричної енергії у реальному часі.

У даній статті розглянуто підхід до побудови системи моніторингу якості електричної енергії у плані розроблення узагальненого коефіцієнту (ідентифікатора) визначення наявності спотворення якості електричної енергії, час його появи та тривалості у реальному часі.

### 3. Постановка проблеми

Модернізація сучасних електроенергетичних систем на базі Smart Grid технологій [4] тісно пов'язана із розвитком систем електропостачання (СЕП). Як відомо, розподільні електричні мережі традиційно розробляються і експлуатуються пасивно від джерел електричної енергії і системи передачі до кінцевих споживачів. У даній ситуації воедино збирається велика кількість потоків електричної енергії, які направлені від підстанцій до споживача. Оператори розподільної системи не мають можливості і необхідності активно контролювати потоки електричної

енергії. Саме з цієї причини у даний час такі системи в основному пасивні [5].

Враховуючи постійно зростаючий попит на електричну енергію, постає необхідність введення в дію нових генеруючих потужностей. Широке впровадження, так званих, розосереджених джерел електричної енергії перетворює централізовану пасивну систему електропостачання в децентралізовану геоінформаційну систему електропостачання. При цьому, електричні мережі стають активними елементами енергосистем.

Розосереджена генерація – це джерела електричної енергії, з'єднані безпосередньо із розподільною електричною мережею, або підключені до такої мережі з боку електроспоживачів. Встановлення такої генерації, завдяки появі великої кількості додаткових взаємозв'язків, суттєво впливає на інформаційні потоки, які пов'язані із вирішенням цілого ряду задач не притаманних діючим централізованим системам електропостачання. Це стосується задач, які виникають, як при проектуванні, так і експлуатації систем електропостачання [6]. А саме: поява зворотних (від споживача до електричної мережі) потоків електричної енергії; генерація в електричну мережу гармонік високого порядку; утруднення регулювання напруги електричної мережі та підтримання балансу реактивної потужності; необхідність погодження графіків електричного навантаження (ГЕН) джерел розосередженої генерації із режимами роботи систем СЕП; можливість включення таких джерел енергії на паралельну роботу і поява локальних енергетичних мікросистем і т. і.

Все це свідчить, що режими роботи СЕП характеризуються динамічними характеристиками, появою додаткових інформаційних, економічних та фінансових відносин і самі СЕП потребують системної модернізації. У першу чергу це стосується створення інформаційної інфраструктури, складовою частиною якої має бути система моніторингу параметрів режиму СЕП.

Як відмічалось раніше, одним із важливих параметрів режиму електропостачання, який є суттєвою складовою, що впливає на ефективність функціонування та експлуатації СЕП, а також на розміри збитків як від енергопостачальних організацій, так і споживачів є якість електричної енергії. А оскільки якість електричної енергії впливає не тільки на обладнання електричної мережі, а і на електрообладнання споживачів, і, як наслідок, обумовлює зниження ефективності технологічних процесів (сприяє випуску неякісної продукції, збільшенню питомих витрат електроенергії на одиницю продукції і т. і. ), то дотримання нормованої якості електричної енергії є важливою і основною вимогою забезпечення функціонування СЕП [7].

### 4. Ціль та задачі дослідження

Ціль – моніторинг наявності спотворень якості електричної енергії у реальному часі.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан методів оцінювання якості електричної енергії.
2. Обґрунтувати підхід до підвищення ефективності визначення параметрів якості електричної енергії, який дозволить би проводити

моніторинг якості електричної енергії у реальному часі.

3. Ввести узагальнений показник наявності спотворення якості електричної енергії, який дозволить визначати наявність спотворення незалежно від типу його спотворення, тривалості та часу виникнення.

## 5. Розробка узагальненого ідентифікатора наявності спотворення якості електричної енергії

Як відмічалось раніше, моніторинг параметрів ЯЕЕ у реальному часі неможливий на даний час, оскільки їх визначення потребує часу для збору даних та їх статистичної обробки. А також, у більшості випадків, кожен параметр ЯЕЕ потребує для свого визначення окремого алгоритму та математичного апарату. На даний час не існує узагальненого параметру 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. У ортогональних перетвореннях, в якості 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  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  від часу  $u$  і масштабу  $s$  є 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 фокусуватись на локальних структурах сигналу за допомогою процедури наближення та віддалення об'єктів, яка поступово зменшує/збільшує масштабний параметр. Особливості і негладкі структури сигналу як правило містять основну інформацію про його характеристики. Оскільки локальна гладкість сигналу характеризується зменшенням амплітуди вейвлет-перетворення зі зменшенням масштабу, деталізація місць «аномалій» у сигналі проводиться шляхом аналізу їх локальних максимумів [32].

Як відомо, щоб охарактеризувати структури з особливостями (зміна параметрів сигналу у електричній мережі), необхідно надати точне кількісне відображення гладкості сигналу  $f(t)$ . Скористаємось для цього показниками Ліпшиця, які дозволяють виміряти рівномірну гладкість на часових інтервалах, а також і у довільній точці  $v$ . Якщо  $f(t)$  має особливість при  $t=v$ , яка означає, що функція недиференційована в даній точці, то показник Ліпшиця при  $t=v$  характеризує сингулярну поведінку функції.

Тобто, зменшення амплітуди коефіцієнтів вейвлет-перетворення в залежності від масштабу зв'язано з рівномірною і точковою гладкістю сигналу Ліпшиця.

Вимірювання цього асимптотичного убавання еквівалентне наближенню структур сигналу при масштабі, який прямує до нуля. Припускаємо, що вейвлет  $\psi$  має  $n$  нульових моментів і належить  $C^n$  ( $n$  – разів безперервно диференційована функція) з швидко спадаючими похідними. Це означає, що для довільних  $0 \leq k \leq n$  і  $m \in \mathbb{N}$  ( $N$  – множина додатних значень чисел, включаючи і нуль) існує константа  $C_m$ , така, що

$$\forall t \in \mathbb{R} \left| \psi^{(k)}(t) \right| \leq \frac{C_m}{1+|t|^m}.$$

Теорема, яка зв'язує рівномірну гладкість Ліпшиця  $f(t)$  на інтервалі з амплітудою її вейвлет-перетворення при малих масштабах наступна [16, 21]. Якщо  $f \in L^2(\mathbb{R})$  задовольняє умові Ліпшиця  $\alpha$ ,  $\alpha \leq n$ , на  $[a, b]$ , то існує  $A > 0$  таке, що

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

Нерівність (3) являється умовою асимптотичного спадання  $|Wf(u,s)|$ , якщо  $s$  прямує до нуля. Перевіримо це ствердження на прикладі вейвлет-аналізу досліджуваного сигналу із наявністю розривів першого роду (рис. 1).

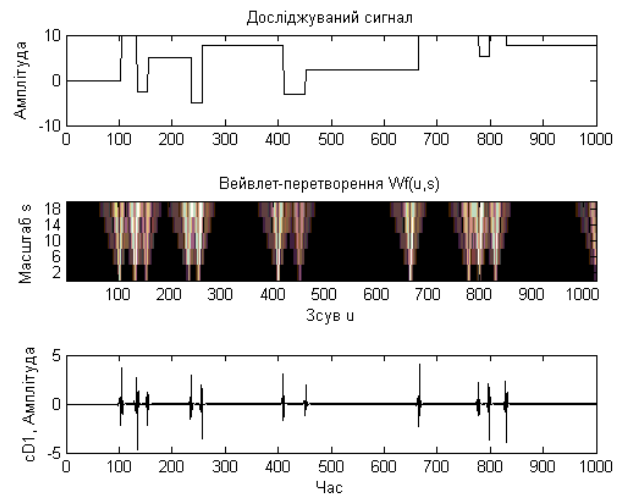


Рис. 1. Вейвлет-перетворення  $Wf(u,s)$  обчислене для сигналу  $f(t)$ , зсув  $u$  та масштаб  $s$  змінюються відповідно вздовж горизонтальної та вертикальної осей

Як видно на рис. 1, при зменшенні масштабу функція  $|Wf(u,s)|$  характеризує дрібномасштабні зміни довкілля  $u$ . Чорні, сірі та білі точки відображають відповідно додатні, нульові та від'ємні вейвлет-коефіцієнти [32].

Зменшення амплітуди вейвлет-перетворення не вимірюється безпосередньо у масштабно-часовій площині  $(u,s)$ , а контролюється за його максимальним значенням. Термін «максимум модуля» буде використовуватись для опису довільної точки  $(u_0, s_0)$ , такої, що  $|Wf(u, s_0)|$  має локальний максимум в точці  $u = u_0$ .

Оскільки інформаційні потоки в електроенергетиці представлені у вигляді дискретних часових рядів, нами застосовується дискретне вейвлет-перетворення (у подальшому – вейвлет-перетворення).

У дискретному представленні вейвлет-перетворення неперервної функції  $f(t)$ , яка рівномірно обирається

з кроком  $N^{-1}$  на відрізку  $[0, 1]$ , може бути обчислене з масштабом  $N^{-1} < s < 1$ . Для розгляду маємо дискретний сигнал  $f[n]$  тривалістю  $N$ . Його дискретне вейвлет-перетворення обчислюється для масштабів  $s=a^j$ , де  $a=2^{1/v}$ , і  $v$  забезпечує проміжні масштаби в кожному напівінтервалі  $[2^j, 2^{j+1}]$ .

Нехай  $\psi(t)$  – вейвлет, носій якого міститься на відрізку в  $[-K/2, K/2]$ . При  $2 \leq a^j \leq NK^{-1}$  дискретний вейвлет, масштабований на  $a^j$ , визначається як

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi\left(\frac{n}{a^j}\right).$$

Даний дискретний вейвлет має  $Ka^j$  ненульових значень на відрізку  $[-N/2, N/2]$ .

Масштаб  $a^j$  має бути більше 2, в протилежному випадку крок вибірки може бути більше носія вейвлета. Тому при обчисленні найменший масштаб вейвлет-перетворення обмежений розділенням дискретних даних. Як відомо [32], 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  $Wf(u, s)$ .

При кожному масштабі  $2^j$  представлення максимумів дає значення  $Wf(u, 2^j)$  там, де  $|Wf(u, 2^j)|$  – локальний максимум. При цьому, коли значення функції  $f(t)$  зрушене на  $\tau$ , кожне  $Wf(u, 2^j)$  також зрушене на  $\tau$ , як і їх максимуми.

## 6. Апробація результатів дослідження

Для перевірки адекватності теоретичного рішення та його практичну значимість проведемо порівняльний аналіз результатів обробки сигналів за допомогою Фур'є та вейвлет-аналізу. Розглянемо моделі двох характерних видів сигналів, перший – це наявність стрибків першого роду (рис. 2, а, та рис. 3, а), другий – одночасна наявність у сигналі декількох гармонік – третьої та п'ятої (рис. 2, б, рис. 3, б).

На рис. 3  $cD1 - cD4$  – деталізуючі коефіцієнти вейвлет-перетворення першого – четвертого рівня ( $j$  – від 1 до 4).

Результати Фур'є-аналізу свідчать про наявність аномалій у сигналі (рис. 2, а) та наявність третьої та п'ятої гармоніки (рис. 2, б), але без ідентифікації часу їх виникнення та тривалості. Результати вейвлет-аналізу, які представлені на рис. 3, а, показують наступне. Значення вейвлет-коефіцієнтів першого рівня вейвлет-аналізу ( $Wf(u, 2^1)$ ) –  $cD1$  свідчать про наявність аномалій у сигналі, характеризують час їх виникнення та тривалість. Зменшення масштабу вейвлет-перетворення дозволяє деталізувати аномалії ( $cD2 - cD4$ ). Рівень розкладання залежить від частоти дискретизації, яка обирається відповідно до теореми Котельникова. У нашому випадку при частоті дискретизації 12,8 кГц маємо 1024 дискретних значення, що відповідає рівню вейвлет-декомпозиції  $j = \log(1024) = 7$ . Аналіз рис. 3, б показує не тільки наявність у сигналі третьої та п'ятої гармоніки (частотний діапазон  $cD5$  відповідає 200–400 Гц, а  $cD6 - 100-200$  Гц), а і їх тривалість.

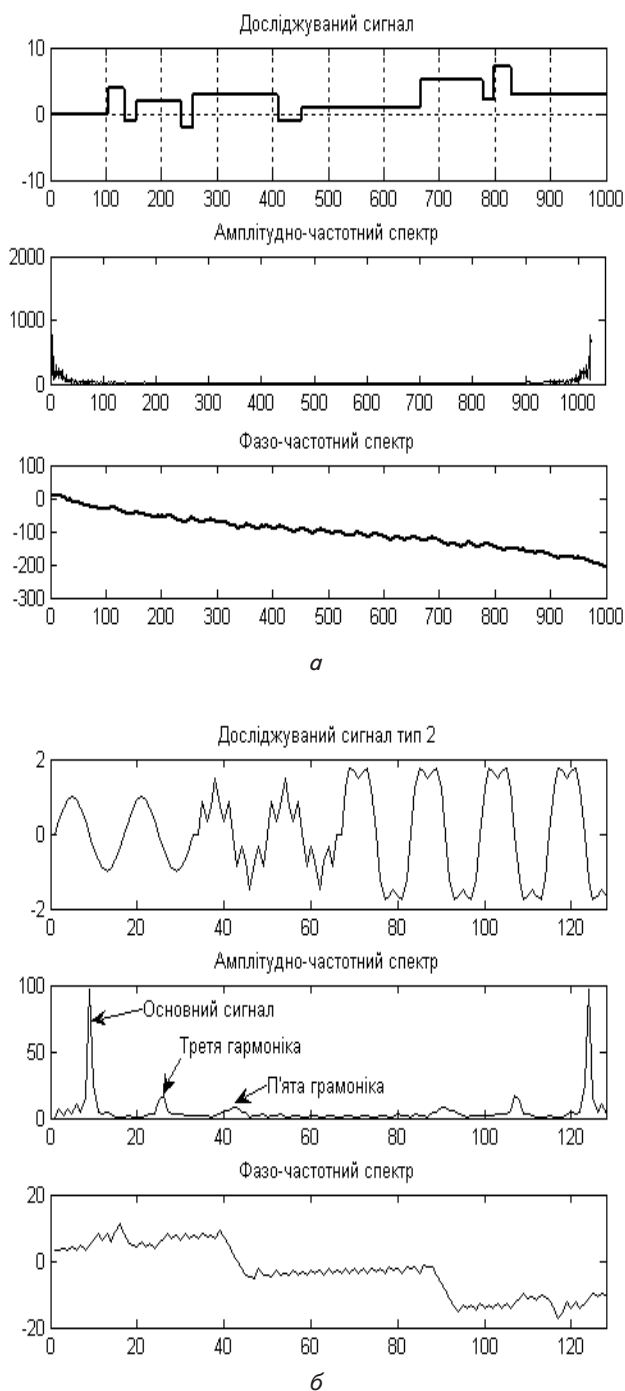


Рис. 2. Результати проведення Фур'є-аналізу сигналів із наявністю: а – розривів I роду (перепадів амплітуди) та б – третьої та п'ятої гармонік

Таким чином застосування вейвлет-перетворення дозволяє виявити час виникнення спотворень сигналу, та їх тривалість за рахунок порівняльного послідовного зменшення масштабу і тим самим розбиття сигналу на частотні піддіапазони.

Проаналізуємо вплив наявності спотворень, які присутні в інформаційному сигналі, на результати його ортогонального перетворення (рис. 4–7).

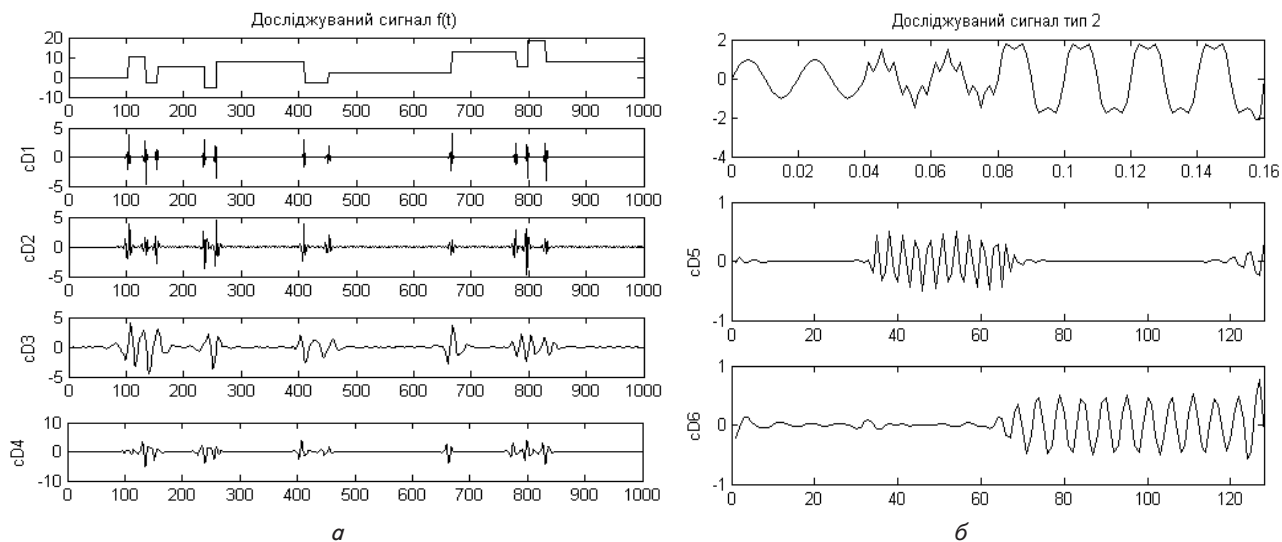


Рис. 3. Результати проведення вейвлет-аналізу для сигналів із наявністю: *а* – розрив I роду (перепадів амплітуди) та *б* – третьої та п'ятої гармонік

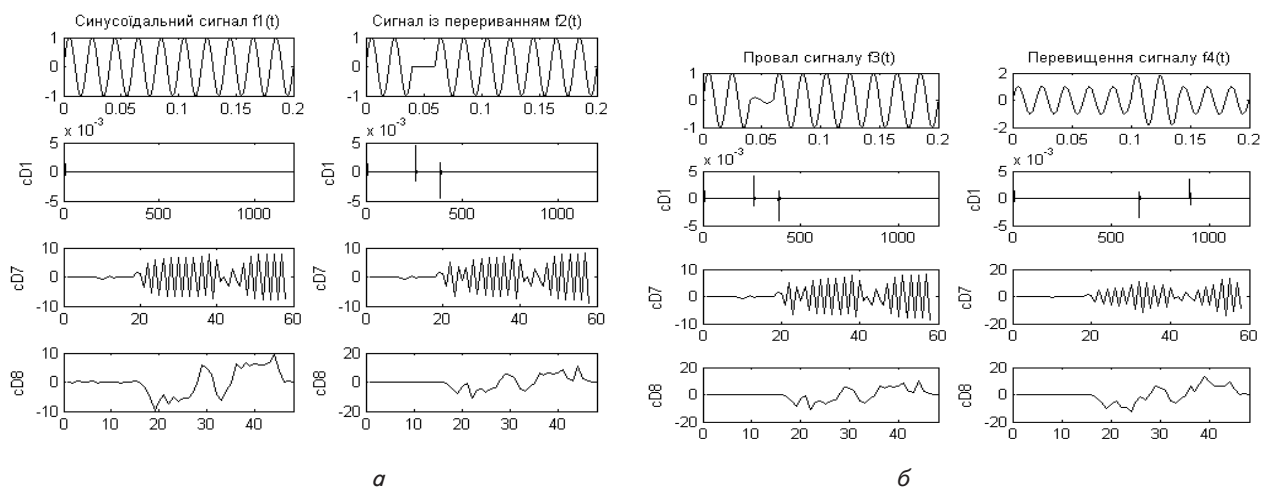


Рис. 4. Вейвлет-перетворення чистого синусоїдального сигналу та синусоїдального сигналу: *а* – із наявністю спотворення типу переривання амплітуди; *б* – із наявністю провалу напруги та перевищення номінального значення

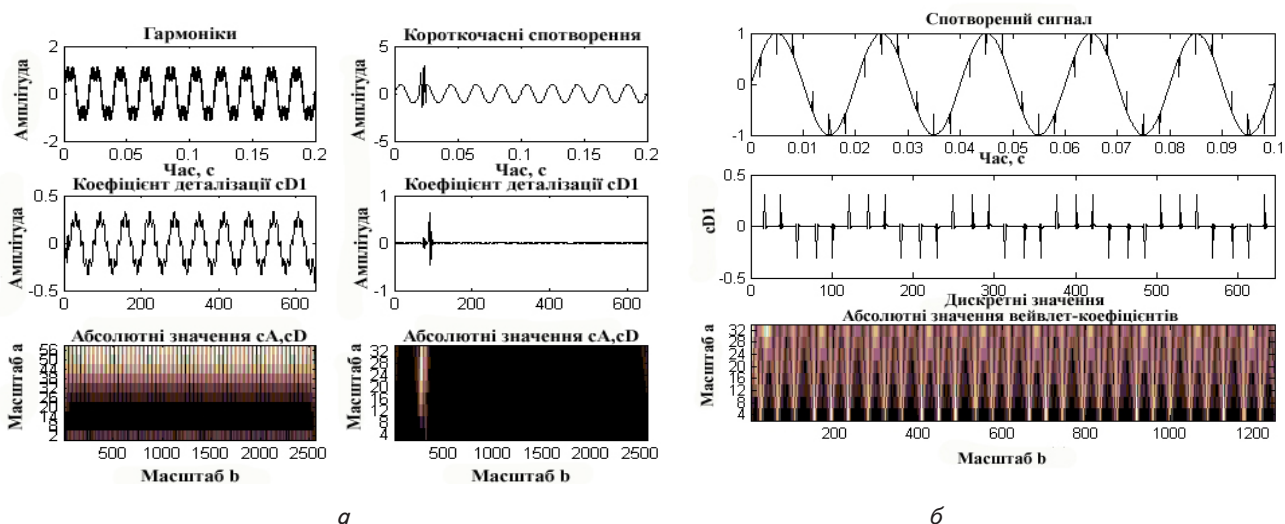


Рис. 5. Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу: *а* – із наявністю спотворення типу високочастотні гармоніки, короткочасні спотворення; *б* – із наявністю повторюваних високочастотних спотворень

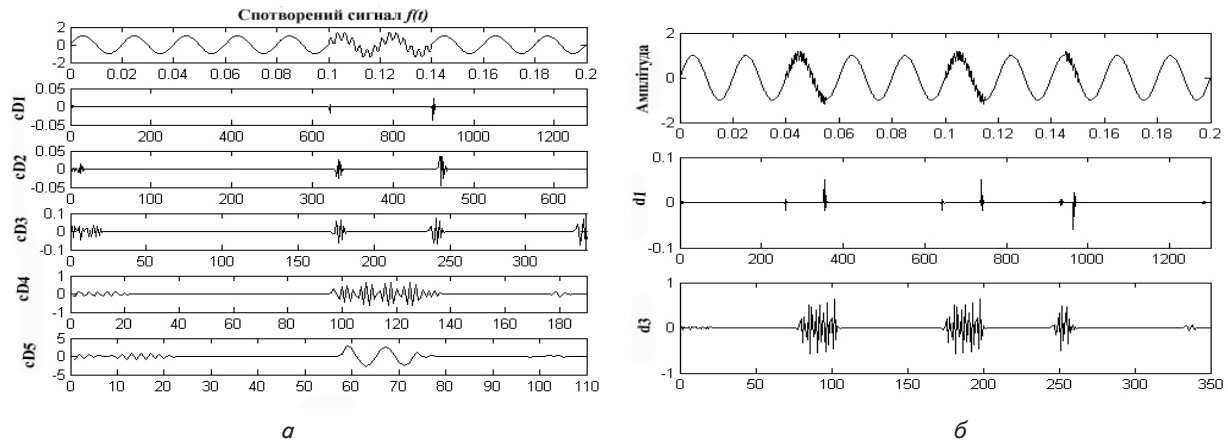


Рис. 6. Вейвлет-перетворення синусоїдального сигналу:

*а* — із наявністю третьої гармоніки на періоді 0.1 с — 0.14 с; *б* — із наявністю коливальних високочастотних спотворень

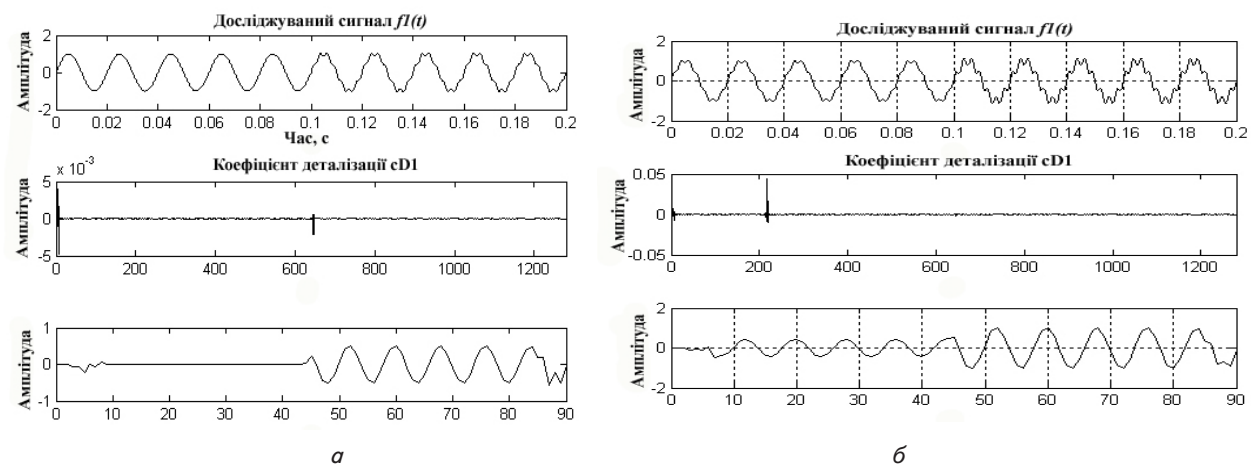


Рис. 7. Вейвлет-перетворення спотворених сигналів: *а* — наявність сьомої гармоніки із визначеного періоду; *б* — наявність гармоніки із періодичною зміною амплітуди

Як слідує із аналізу даних, наведених на рис. 4, синусоїдальний сигнал має нульове значення деталізуючого коефіцієнту  $cd1$ ; сигнали із наявністю спотворень (переривання, провал та перевищення напруги) мають ненульове значення коефіцієнту першого рівня вейвлет-перетворення.

Проаналізуємо також вплив інших спотворень на результати вейвлет-перетворення (рис. 5–7).

Як показує аналіз результатів, які наведені на рис. 5, у випадку наявності любого типу із наведених спотворень, наявність коефіцієнтів першого рівня вказує на їх наявність.

Аналіз результатів дослідження (рис. 6) свідчить, що значення деталізуючого коефіцієнту першого рівня вказує на наявність спотворення, його тривалість та, відповідно до частоти гармоніки — її наявність на визначеному рівні вейвлет-розкладання.

Аналіз отриманих результатів (рис. 5–7) показує, що подібно до результатів ортогонального перетворення (рис. 4), наявність любого типу спотворення у сигналі та його тривалість (початок — закінчення) однозначно ідентифікується наявністю деталізуючого коефіцієнту першого рівня вейвлет-декомпозиції ( $cd1 > 0$ ). Тобто, даний коефіцієнт є узагальненим (для любых типів спотворень інформаційного сигналу) ідентифікатором їх наявності. Тобто, визначаючи тільки його наявність можливо проводити моніторинг яко-

сті електричної енергії у реальному часі незважаючи на те чи є інформаційний сигнал (напруга електричної мережі або струм) стаціонарним, чи ні.

## 7. Висновки

1. На основі аналізу сучасного стану методів оцінювання якості електричної енергії окреслено найважливіші проблеми при ідентифікації типу спотворень електричної енергії, які не достатньо вирішені на даний час.

2. Обґрунтовано підхід до підвищення ефективності визначення параметрів якості електричної енергії, який оснований на проведенні послідовної декомпозиції вимірювального сигналу на частотно-впорядковані просторово-ортогональні рівні, які пов'язуються із визначенням відповідних параметрів якості електричної енергії, що надає можливість проведення їх моніторингу у реальному часі.

3. Проведено визначення наявності спотворення якості електричної енергії незалежно від типу спотворення, тривалості та часу його виникнення шляхом введення узагальненого показника спотворення.

Подальші дослідження будуть проводитись щодо аналізу моделі ортогонального перетворення інформаційного сигналу на предмет можливості ідентифікації не тільки наявності спотворення, а і визначення його типу.

## Література

- ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) Электромагнитная совместимость (ЕМС) [Текст] / Частина 4-30. Методи випробувань та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. – 59 с.
- ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с.
- Office of Electricity Delivery and Energy reliability by the National Energy Technology Laboratory. Provides power quality for the digital economy. [Electronic resource] / Available at: <http://www.netldoe.gov/research/energy-efficiency/energy-delivery/smart-grid>.
- Стогній, Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
- Шон, Ф. Ч. Исследования и оценка эффективности повышения качества электроэнергии при интеграции распределенных генераций с системами электроснабжения на нескольких новых показателях [Текст] // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 7 (78). – С. 149–153.
- Праховник, А. В. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине [Текст] / А. В. Праховник, В. А. Попов, Е. С. Ярмолюк и др. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 2. – С. 7–14.
- Масленников, Г. К. Обеспечение качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / Г. К. Масленников, Е. В. Дубинский // Энергосбережение. – 2002. – № 1. – С. 56–61.
- Куско, А. Качество электрической энергии [Текст] / А. Куско, М. Томпсон. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
- Dash, P. Frequency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filter [Text] / P. Dash, A. Pradham, G. Pauda // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 3. – P. 230–238.
- Залмазон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залмазон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. – 496 с.
- Волошко, А. В. Устранение влияния неустойчивости частоты сети на точность определения качества электрической энергии [Текст] / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Техническая электродинамика. – 1994. – № 4. – С. 73–77.
- Марпл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
- Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. [Текст] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
- Andria, G. A Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy [Text] / G. Andria, H. Savino, A. Trotta // Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1989. – Vol. 38, № 4. – P. 856–863.
- Волошко, А. В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа [Текст] / А. В. Волошко // Техническая электродинамика. – 1991. – № 3. – С. 8–13.
- Abdel-Galil, T. Power quality disturbance classification using the inductive inference approach [Text] / T. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssed // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1812–1818.
- He, H. A self-organizing learning array system for power Quality classification based on wavelet transform [Text] / H. He, J. A. Starzyk // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 286–295.
- Ribeiro, R. Wavelet Transform: An Advanced Tool for Analysing non Stationary Harmonic Distortion in Power Systems [Text] : Proc. Of IEEE intern. conf. / R. Ribeiro // Harmonic in Power Systems, 1994. – P. 452–457.
- Karthikeyan, M. Wavelet Support Vector Machine Approach for classification [Text] / M. Karthikeyan, V. Malathi // Int. Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 1, № 3. – P. 211–220.
- Hyvarinen, A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [Text] / A. Hyvarinen // IEEE Trans. Neural Networks. – 1999. – Vol. 10. – P. 626–634.
- Ferreira, D. D. ICA-based for Power Quality Disturbance Analysis [Text] / D. D. Ferreira, S. M. Seixas, A. S. Cerqueira // Intelligent System Application to Power Systems. ISAP'09. 15-th Int. Conference, 2009. – P. 1–6.
- Yang, H. T. A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system [Text] / H. T. Yang, L. Chung, C. C. Liao // IEEE on Power Delivery. – 2001. – Vol. 16, Issue 3. – P. 353–360.
- Dwivedi, V. D. De-noising Techniques with Change-Point Approach for Wavelet-based Power Quality Monitoring [Text] / V. D. Dwivedi, S. N. Singh // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 3. – P. 1719–1727.
- Большев, П. Н. Таблицы математической статистики [Текст] / П. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
- Zwe-Lee, Gaing Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification [Text] / Gaing Zwe-Lee // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 1560–1567.
- Emmanouil, S. Expert system for classification and analysis of Power system event's [Text] / S. Emmanouil, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 423–428.
- Bizjak, B. Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic [Text] / B. Bizjak, P. Planinsic // Power Electronics and Motion Control Conference. – 2006. EPE-PENC 12 th Int., 2006. – P. 1356–1360.
- Axelberg, P. Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances [Text] / P. Axelberg, I. Y.-H. Gu, M. H. Bollen // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, № 3. – P. 1297–1303.
- Janic, P. Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network [Text] / P. Janic // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 3. – P. 1663–1669.
- Grouse, M. S. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models [Text] / M. S. Grouse, R. D. Nowak, R. G. Baraniuk // IEEE Trans. Signal Processing. – 1998. – Vol. 46, № 4. – P. 886–902.
- Dash, P. K. Classification of Power Disturbances using a Fuzzy expert system and a Fourier linear combiner [Text] / P. K. Dash, K. S. Mishra, M. M. A. Salama // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, № 2. – P. 472–477.
- Mallat, S. A. A Theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [Text] / S. A. Mallat // IEEE Trans. Pattern Ana. Machine Intell. – 1989. – Vol. 11. – P. 674–693.