

УДК 621.319.3

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.23>**В. В. ШЕВЧУК**

PhD, науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-0535-2630

В. В. КУЧАНСЬКИЙ

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-6473-9478

Ю. І. ТУГАЙ

доктор технічних наук,
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-0704-1863

І. Ю. ТУГАЙ

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-7261-4277

Л. Р. САБАРНО

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-2153-2183

ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА НЕСПРИЙНЯТЛИВІСТЬ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРИВАНЬ ТА ЗМІН НАПРУГИ

Розвиток суспільства супроводжується збільшенням використання електричної енергії. Інтенсифікація виробництва та поширення електротехнологій призводять до значного зростання енерговитрат і навантажень у системі. Проблема забезпечення якості електроенергії з кожним роком набуває особливого значення завдяки впровадженню різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та перетворенню централізованих систем електропостачання в децентралізовані. Всі ці зміни призводять до неможливості забезпечити стійкий режим постачання електроенергії, що спричиняє значні втрати від зниження якості електроенергії. З огляду на зміни у сфері енергетики, питання про зменшення втрат електроенергії в електричних мережах стає ще більш актуальним. Це стає одним із пріоритетних завдань для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних підприємств. Рівень втрат електроенергії у мережах є ключовим показником ефективності їхньої роботи. Це також свідчить про якість системи обліку електроенергії та результативність діяльності енергопостачальних компаній у забезпеченні передачі та розподілу електричної енергії. Якість електроенергії визначається як комплексний набір технічних параметрів, що характеризують якість живлення та функціонування електричних мереж та споживачів. Основні параметри включають стабільність напруги та частоти, гармонічні спотворення, перерви в подачі, фазові зсуви, спотворення хвиль, неоднорідності напруги та інші. Якість електроенергії має велике значення для безпеки людей і майна, ефективності виробництва, комфорту в побуті та стійкості інфраструктури. Стабільне та надійне електропостачання забезпечує нормальну роботу електричних приладів, захищає від втрат даних та пошкоджень обладнання. Якість електричної енергії – це комплекс характеристик, які визначають її відповідність встановленим стандартам і можливість використання для потреб, на які вона призначена.

Ключові слова: якість електроенергії, короткі замикання, провали та перевищення напруги, спотворення ЯЕЕ, ідентифікація, класифікація, режими електроспоживання.

V. V. SHEVCHUK

PhD, Researcher

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0003-0535-2630

V. V. KUCHANSKY

Ph.D., Senior Researcher

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0001-6473-9478

YU. I. TUGAY

Doctor of Technical Sciences,

Head of the Department of Power Supply Systems Optimization

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-0704-1863

I. YU. TUGAY

Ph.D., Senior Researcher

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-7261-4277

L. R. SABARNO

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-2153-2183

TESTING ELECTRICAL EQUIPMENT FOR IMMUNITY TO VOLTAGE FALLS, SHORT-TERM INTERRUPTIONS AND VOLTAGE CHANGES

The development of society is accompanied by an increase in the use of electrical energy. Intensification of production and the spread of electrical technologies lead to a significant increase in energy consumption and loads in the system. The problem of ensuring the quality of electricity is gaining particular importance every year due to the introduction of various renewable energy sources, powerful nonlinear consumers and the transformation of centralized power supply systems into decentralized ones. All these changes lead to the impossibility of ensuring a stable mode of electricity supply, which causes significant losses from a decrease in the quality of electricity. Given the changes in the energy sector, the issue of reducing electricity losses in electrical networks is becoming even more relevant. This is becoming one of the priority tasks for ensuring the financial stability of energy supply enterprises. The level of electricity losses in networks is a key indicator of the effectiveness of their work. This also indicates the quality of the electricity metering system and the effectiveness of the activities of energy supply companies in ensuring the transmission and distribution of electricity. Electricity quality is defined as a comprehensive set of technical parameters that characterize the quality of power supply and the functioning of electrical networks and consumers. The main parameters include voltage and frequency stability, harmonic distortions, supply interruptions, phase shifts, wave distortions, voltage heterogeneity, and others. Electricity quality is of great importance for the safety of people and property, production efficiency, comfort in everyday life, and infrastructure stability. Stable and reliable electricity supply ensures the normal operation of electrical appliances, protects against data loss and equipment damage. Electricity quality is a set of characteristics that determine its compliance with established standards and the ability to be used for the needs for which it is intended.

Key words: *electricity quality, short circuits, voltage dips and overvoltages, distortion of the electrical network, identification, classification, power consumption modes.*

Постановка проблеми

Проблема забезпечення якості електроенергії стає все більш актуальною з впровадженням різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та децентралізацією систем електропостачання. Ці зміни ускладнюють завдання забезпечення стійкого електропостачання, що призводить до значних втрат від погіршення якості електроенергії [1-3].

На тлі змін у господарському механізмі енергетики проблема зниження втрат електроенергії в електричних мережах залишається актуальною, ставши важливим завданням для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних організацій. Рівень втрат електроенергії в електричних мережах є ключовим показником економічності їхньої діяльності та ефективності систем обліку електроенергії [1].

Цей показник вказує на проблеми, які потребують термінового вирішення у сфері розвитку, реконструкції та технічного оновлення електричних мереж, вдосконалення методів їхньої експлуатації та управління, підвищення точності обліку електроенергії та ефективності збору коштів за спожиту електроенергію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Алгоритми визначення характеристик споживання електроенергії ґрунтуються на обробці зашифрованих вибірок миттєвих значень фазних струмів і напруг, зібраних протягом певного періоду сигналу в рівновіддалених моментах часу. Зростаюча потреба в електроенергії, а також збільшення числа потужних нелінійних навантажень мають негативний вплив на якість електроенергії і сприяють появі систематичних похибок у вимірювальних приладах для синусоїдальних систем. Це особливо помітно внаслідок нестабільності частоти в електричній мережі.

Порушення якості електроенергії може мати наступні наслідки [2-8]:

- збільшення втрат енергії в мережах;
- перегрів електродвигунів та електричних машин, що призводить до швидшого старіння ізоляції та підвищує ризик аварій внаслідок однофазних коротких замикань та їх переходу в багатофазні замикання;
- збільшення споживання електроенергії та потужності обладнання;
- відмови та помилкові спрацьовування автоматики і пристроїв релейного захисту;
- відмови електроніки управління та обчислювальної техніки;
- поява перешкод для телевізійного та радіоустаткування, порушення працездатності рентгенівського обладнання;
- некоректна робота електролічильників.

При класифікації спотворень параметрів якості електроенергії важливо виокремити ознаки, що забезпечують стійкість до різних видів спотворень у мережі та дозволяють виявляти та розпізнавати зміни у сигналах напруги і струму. Більшість спотворень аналізуються з урахуванням таких параметрів, як амплітуда, тривалість, частотні характеристики та форма хвиль. Отже, окремі спотворення якості електроенергії вимагають розробки комплексного набору ознак для їх класифікації, що дозволить виявити не лише наявність спотворень, але й точно визначити момент та місце їх виникнення.

Проведений порівняльний аналіз методів формування ознак ідентифікації та класифікації інформаційних сигналів, умовно розбитих на дві основні групи: статистичні методи та методи, основані на розкладанні вхідної реалізації по деяких системах ортогональних функцій, показав, що традиційно в енергетиці використовуються методи першої групи [7-9]. Але методи формування ознак ідентифікації та класифікації другої групи надають можливість синтезу більш узагальнених і незалежних алгоритмів, які дозволяють забезпечити розпізнавання більшого числа вхідних реалізацій на основі єдиного уніфікованого підходу.

Формулювання мети дослідження

Забезпечення якості електричної енергії в системах електропостачання шляхом розробки та вдосконалення методів визначення спотворень якості електричної енергії і створення системи їх моніторингу в реальному часі.

Викладення основного матеріалу дослідження

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки такого методу формування ознак ідентифікації та класифікації графіків електричних навантажень, який був би оснований на розкладі вхідної реалізації по системі ортогональних функцій і забезпечував можливість виявлення особливостей інформаційних сигналів – розривів I роду з підвищеною швидкістю, достовірністю і уніфікацією алгоритму обробки у порівнянні з існуючими методами.

Як відомо з попередніх досліджень, характерні особливості сигналу відображаються на різних рівнях при вейвлет-декомпозиції. В основу розробленого у даній роботі методу ідентифікації та класифікації спотворень якості електричної енергії покладене положення теореми Парсеваля – «Енергія сигналу в часовому просторі дорівнює сумі енергій, сконцентрованих на різних рівнях декомпозиції відповідного вейвлет-перетворення даного сигналу». Математично це формулюється наступним чином: [5]

$$\varepsilon_2^2 = \sum_i |\langle \varepsilon, \psi_i \rangle|^2, \quad (1)$$

де $\varepsilon \in L^2$ та ψ_i являються ортонормованим базисом L^2 (функції скінченної енергії). При цьому приймається, що енергія, яка визначається як квадрат її L^2 норми, зберігається і при ортонормованому вейвлет-перетворенні. [4-6]

Зважаючи на властивості вейвлет-перетворення сигналу, теорема Парсеваля запишеться наступним чином: [7-8]

$$\sum_{k=1}^N |f(k)|^2 = \sum_{k=1}^N |cA_j(k)|^2 + \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2, \quad (2)$$

Зважаючи на властивості вейвлет-перетворення сигналу, теорема Парсеваля запишеться наступним чином: [4-5]

$$\sum_{k=1}^N |f(k)|^2 = \sum_{k=1}^N |cA_j(k)|^2 + \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2, \quad (3)$$

де $\sum_{k=1}^N |f(k)|^2$ – сумарна енергія дискретизованого сигналу, N – число дискрет на періоді; $\sum_{k=1}^N |cA_j(k)|^2$ – енергія, яка міститься в апроксимуючих коефіцієнтах останнього (J -го) рівня вейвлет-декомпозиції (у випадку вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла); $\sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^N |cD_j(k)|^2$ – енергія, яка міститься в деталізуючих коефіцієнтах всіх рівнів вейвлет-декомпозиції – від рівня 0 до рівня J . [4-8].

Оскільки в результаті вейвлет-декомпозиції сигналу за допомогою аналізу вейвлет-коефіцієнтів, отримується локалізована в часі інформація щодо його спотворення (відхилення від номінальних значень його параметрів) із високо- та низькочастотних діапазонів, значення даних коефіцієнтів (їх частотно-енергетичні властивості) і покладені в основу класифікації спотворень якості електричної енергії. Індивідуальну інформацію щодо спотворень якості електричної енергії (час спотворення, його тривалість і розподіл енергії) містять деталізуючі коефіцієнти, тому аналіз саме цих параметрів передбачається у розробленому методі.

Як показали попередні дослідження, ідентифікація і послідовна класифікація типів спотворень параметрів якості електричної енергії шляхом визначення величин вейвлет-коефіцієнтів не завжди дає однозначні результати. Це обумовлено присутністю у досліджуваному сигналі гармоніки основної частоти і даний метод застосовується тільки для проведення швидкого експрес-аналізу. Щоб цього уникнути в роботі пропонується модифікований вектор ознак класифікації спотворень параметрів якості електричної енергії.

На рис. 1 наведено алгоритм формування вектору ознак ідентифікації та класифікація спотворень якості електричної енергії за різницею енергій вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції. Аналіз результатів дослідження розподілу енергії спотвореного сигналу за рівнями декомпозиції за одночасної наявності частотних і амплітудних спотворень, показав наступне. Як відомо, сигнал обмеженої тривалості з додаванням спотворення представляється як $f(t) = p(t) + s(t)$, де $p(t)$ – синусоїдальний сигнал, $s(t)$ – спотворений сигнал. У вейвлетній області даний сигнал буде представлений наступним чином:

$$V_{f(t)} = [cA_j, cD_1, cD_2, \dots, cD_J].$$

а енергія сигналу – $E_{f(t)} = [cA_j, cD_1, cD_2, \dots, cD_J]$.

Відповідно буде представлений і синусоїдальний сигнал:

$$V_{p(t)} = [cA_{j(p(t))}, cD_{1(p(t))}, cD_{2(p(t))}, \dots, cD_{J(p(t))}],$$

а енергія синусоїдального сигналу:

$$E_{p(t)} = [cA_{j(p(t))}, cD_{1(p(t))}, cD_{2(p(t))}, \dots, cD_{J(p(t))}].$$

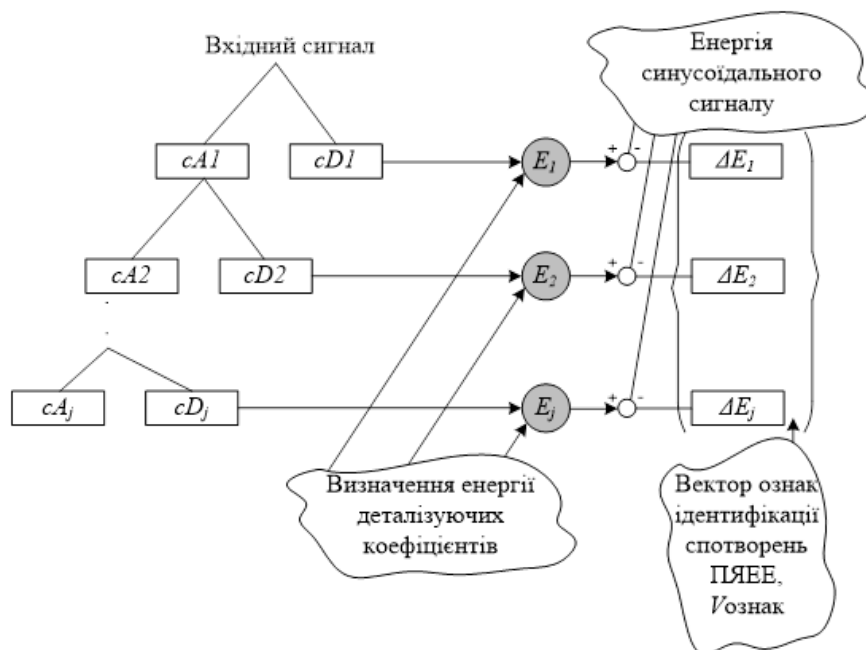


Рис. 1. Алгоритм формування вектору ознак ідентифікації та класифікація спотворень якості електричної енергії за різницею енергій вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції [8]

Вектор ознак класифікації спотворення якості електричної енергії $V_{\text{ознак}}$ представляється різницею енергій за рівнями вейвлет-декомпозиції $\Delta E_{j=1}^J = E_{j=1}^J(f(t)) - E_{j=1}^J(p(t))$ і математично визначається наступним чином: [7]

$$V_{\text{ознак}} = [\Delta E_{cA_j}, \Delta E_{cD_1}, \Delta E_{cD_2}, \dots, \Delta E_{cD_J}]$$

Проаналізуємо необхідну частоту дискретизації інформаційного сигналу та, відповідно, необхідний рівень вейвлет-декомпозиції зважаючи на необхідність зменшення часу обробки сигналів при зберіганні достатніх характеристик точності та якості класифікації типу спотворень якості електричної енергії. Як відомо, фільтри високої та низької частоти, які застосовуються для вейвлет-перетворення, мають половинну смугу частот по відношенню до сигналу, що аналізується. Позначимо частоту дискретизації інформаційного сигналу як F_s . На рис. 2 та в табл. 1 представлені частотні діапазони вейвлет-перетворення в залежності від рівня декомпозиції.

Як відомо, вейвлет-декомпозиція розбиває сигнал на частотні піддіапазони (за рівнями вейвлет-декомпозиції) в залежності від частоти дискретизації. В табл. 1 представлено таке частотне розбиття у загальному вигляді.

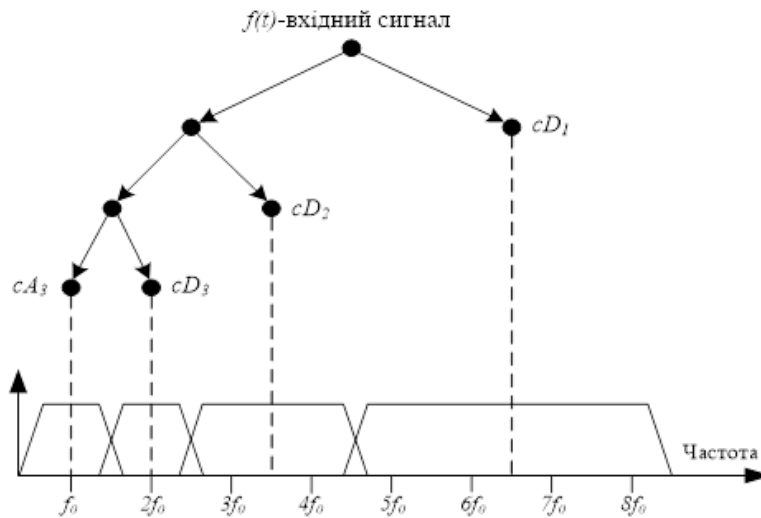


Рис. 2. Частотні діапазони вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла [6-8]

Таблиця 1

Частотні діапазони вейвлет-декомпозиції за алгоритмом Малла [6-8]

Рівень декомпозиції (j)	Частотний діапазон	
	Коефіцієнт апроксимації (cA _j)	Коефіцієнт деталізації (cD _j)
1	Від 0 до $F_s/2^2$ Гц	Від $F_s/2^2$ до $F_s/2^1$ Гц
2	Від 0 до $F_s/2^3$ Гц	Від $F_s/2^3$ до $F_s/2^2$
...
J	Від 0 до $F_s/2^{J+1}$	Від $F_s/2^{J+1}$ до $F_s/2^J$

Основна частота досліджуваного сигналу становить $f_{\text{досл}} = 50$ Гц, найвищий рівень вейвлет-декомпозиції становить J . Тоді необхідний частотний діапазон для дослідження сигналу буде відповідати частотному діапазону деталізуючого коефіцієнту останнього рівня вейвлет-декомпозиції, а саме $\frac{F_s}{2^{J+1}} \leq F_{f(t)} \leq \frac{F_s}{2^J}$. Логарифмуванням даного виразу, одержується діапазон необхідного значення рівня декомпозиції J . Тобто,

$$\log_2 \left(\frac{F_s}{F_{f(t)}} \right) - 1 \leq J \leq \log_2 \left(\frac{F_s}{F_{f(t)}} \right) \tag{4}$$

Для розглядуваного випадку (частота дискретизації становить 3 200,00 Гц) маємо. Тоді у відповідності до виразу (6), маємо $3 \leq J \leq 4$. В даній роботі прийнято $J = 4$. Оскільки для наочності класифікації спотворення якості електричної енергії основна частота $F_f(t)$ являється предметом дослідження, то мінімальний проаналізований рівень декомпозиції становить $N_{\text{min}} = 2 * J = 8$.

Вибір оптимального прийнятного материнського вейвлету без врахування типу спотворення є трудомісткою процедурою. При цьому, по-перше, короткотривалі та швидкоплинні спотворення найкраще визначаються за

допомогою вейвлетів Добеші db4 та db6, а повільні спотворення – db8 та db10. По-друге, застосування вейвлетів Нааг приводить до зміщення енергії спотворень перевищення та зниження напруги в область рівнів декомпозиції 3 – 4, а також до більш виражених значень низькочастотних спотворень.

Висновки

Для проведення моніторингу наявності спотворень якості електроенергії в електричних мережах, необхідно визначення наявності провалів напруги, ідентифікація їх типу та класифікація для визначення необхідних керуючих сигналів та засобів захисту електрообладнання.

Розроблений метод ідентифікації типу провалів напруги повинен однозначно ідентифікувати як провали, які викликані короткими замиканнями в електричній мережі, та наявністю потужного електричного обладнання.

Список використаної літератури

1. Про затвердження Кодексу систем розподілу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
2. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. Технічна електродинаміка. 2011. No 3. С. 46-52.
3. Яремчук Н.А., Годя О.Ю., Проскін В.В. Оцінювання комплексного показника якості складного об'єкта з характеристикою невизначеності. Український метрологічний журнал. 2018. No 2. С. 9-17.
4. Т. К. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812-1818, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Волошко А.В., Джеря Т.Е., Шевчук В.В. Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 106) з матеріалами 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Recent scientific investigation" (26-28 квітня 2022 року), Oslo, Norway, 2022. с. 369-376.
6. Волошко А.В., Джеря Т.Е., Шевчук В.В. The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Зб. наукових праць "InterConf," (№ 107) з матеріалами 12-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (6-8 травня 2022 року), Manchester, Great Britain, 2022. с. 510-516.
7. Шевчук В.В., Джеря Т.Е. Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського «Енергетика. Екологія. Людина». Київ, 2022. с. 11-17.
8. Шевчук В.В. Механізм зменшення збитків від наявності провалів напруги за допомогою моделі просторового вектора. Міжнародний електронний науково-практичний журнал «WayScience» ISSN 2664-4819. Конференція 14-15 вересня 2023, вихід збірника тез доповідей 22.09.2023 р

References

1. On Approval of the Distribution Systems Code <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
2. Kuznetsov V.G., Shpolianskyi O.G., Yaremchuk N.A. Generalized indicator of energy quality in electrical networks and systems. Tekhnichna elektrodynamika. 2011. No. 3. Pp. 46-52. (Ukr)
3. Yaremchuk N.A., Goda O.Yu., Proskin V.V. Evaluation of a complex indicator of the quality of a complex object with a characteristic of uncertainty. Ukrainian Metrological Journal. 2018. No 2. Pp. 9-17. (Ukr)
4. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812-1818, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Voloshko A.V., Dzherya T.E., Shevchuk V.V. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Collection of scientific papers "InterConf," (№ 106) with materials of the 5th International Scientific and Practical Conference "Recent scientific investigation" (April 26-28, 2022), Oslo, Norway, pp. 369-376.
6. Voloshko A.V., Dzherya T.E., Shevchuk V.V. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Collection of scientific papers "InterConf," (№ 107) with materials of the 12th International Scientific and Practical Conference "Science and Practice: Implementation to Modern Society" (May 6-8, 2022), Manchester, Great Britain, pp. 510-516.
7. Shevchuk V.V., Dzherya T.E. (2022). Reducing the impact of nonlinear loads on the quality of electricity: basic methods of managing the parameters of energy systems. Collection of scientific works of the Institute of Electrical Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute "Energy. Ecology. Man". Kyiv, pp. 11-17.
8. Shevchuk V.V. (2023). Mechanism for reducing losses from the presence of voltage dips using a spatial vector model. International electronic scientific and practical journal "WayScience" ISSN 2664-4819. Conference September 14-15, 2023, publication of the collection of abstracts 09/22/2023