

**Бунько В.Я.**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
«Бережанський агротехнічний інститут»

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ПЕРЕВАЖНО ІНДУКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

*У статті проведено обґрунтування та аналіз визначення й дослідження показників якості електричної енергії системи електроспоживання. Дослідження базуються на використанні аналізатора якості електричної енергії AFLEX-6300. Дослідження проведено в реальному часі з використанням синхронізації з ПК. Показано та обґрунтовано залежності електричних параметрів мережі від реального часу, при якому переважає індуктивне навантаження. Наведено графічні залежності, які характеризують роботу електричної мережі й, відповідно, якість електричної енергії, що визначається основними показниками – відхиленням напруги та частоти.*

**Ключові слова:** показники, якість, електрична енергія, відхилення, напруга, частота, навантаження, мережа.

**Постановка проблеми.** Забезпечення необхідної якості електроенергії для приймачів – це комплекс складних завдань, які розв'язуються під час проектування й експлуатації електропостачальних систем. Якість електроенергії значною мірою впливає на технологічний процес виробництва і якість продукції, на втрати електроенергії, на параметри самої електропередавальної системи (ЕПС) та її режиму роботи й залежить не тільки від енергосистеми як джерела живлення, а й від споживачів, тому що на сучасних підприємствах є значна кількість особливих електроприймачів, які негативно впливають на якість електроенергії [7, с. 99; 8, с. 264–265]. Наявність у системах електропостачання потужних дугових електропечей, регульованих вентильних перетворювачів та інших електроприймачів і споживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками та приймачів із різкозмінним навантаженням створює проблеми, пов'язані з їх електромагнітною сумісністю з ЕПС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Показники якості визначаються за стандартами та нормами. Розробка норм і стандартів є складною проблемою, ця робота проводиться постійно в багатьох країнах світу і в міжнародних галузевих організаціях. Останнім часом міжнародними організаціями прийнято низку нормативних документів, в основу яких покладено стандарти провідних країн світу. Так, Європейським комітетом

нормалізації в галузі електротехніки в 1994 р. прийнято й розроблено багато стандартів, якими нормують показники якості електроенергії в різних мережах, зокрема й промислових, і визначають умови приєднання споживачів до мереж.

Допустиме відхилення напруги в Україні становить  $\pm 5\%$ , а гранично допустиме її відхилення –  $\pm 10\%$ . Допустиме відхилення частоти струму –  $\pm 0,2\%$ , а гранично допустиме відхилення –  $\pm 0,4\%$  [1, с. 21]. Із цього питання дослідження проводили В.М. Ванько, П.Г. Столярчук, В.Г. Кузнєцов, О.Г. Шполянський, Н.А. Яремчук, де основна увага зосереджена на дослідженні узагальнюючого показника якості енергії в електричних мережах і системах, контролю показників і наведена методика оцінювання якості електроенергії [2, с. 47; 3, с. 50].

**Постановка завдання.** Метою роботи є обґрунтування та аналіз визначення й дослідження параметрів електричної енергії та їх вплив на роботу інших споживачів системи електрозабезпечення при переважаючому реактивному навантаженні.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Передавання, розподіл, перетворення та споживання електричної енергії супроводжуються відхиленнями параметрів, які характеризують її за певними властивостями від первинних значень.

Сукупність властивостей електричної енергії, які обумовлюють її придатність для нормальної роботи

електроприймачів відповідно до їх призначення з розрахунковою працездатністю, є якістю електроенергії.

Тому успішне вирішення проблем, які пов'язані з електромагнітною сумісністю з ЕПС, забезпечує раціональну роботу як таких приймачів, так і всіх інших, приєднаних до тієї самої системи (освітлення, електродвигуни тощо).

Норми, що встановлені цим стандартом, є рівнями електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних збурень (перешкод) в ЕПС загального призначення [7, с. 100]. У разі дотримання цих норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення та електричних мереж споживачів (приймачів) електричної енергії. Норми є обов'язковими в усіх режимах роботи електропостачальних систем загального призначення, крім режимів, зумовлених:

- винятковими погодними умовами;
- непередбачуваними ситуаціями (пожежі, вибухи тощо);
- умовами, регламентованими державними органами управління, а також пов'язаними з лік-

відацією наслідків, спричинених винятковими погодними умовами та непередбачуваними обставинами.

У разі невідповідності нормативних показників якості електроенергії (ПЯЕ) споживач має право вимагати від електропостачальних компаній відшкодування збитків, оскільки електроенергія відображає вимоги міжнародного стандарту ГОСТ 32144-2013, термінологічних стандартів ГОСТ 30372-95 і ДСТУ 3466-96 [1, с. 20; 5, с. 12; 6, с. 10].

Міждержавним ГОСТом 13109-97 встановлено показники якості електричної енергії, які потребують постійного дослідження та визначення в системі електропостачання: усталене відхилення напруги  $\delta U_y$ ; розмах зміни напруги  $\delta U_p$ ; доза флікера  $P_f$ ; коефіцієнт спотворення синусоїдної кривої напруги  $K_u$ ; коефіцієнт n-ї гармонічного складника напруги  $Ku_{(n)}$ ; коефіцієнт несиметрії напруг оберненої послідовності  $K_{2w}$ ; коефіцієнт несиметрії напруг нульової послідовності  $K_{0w}$ ; відхилення частоти  $\Delta f$ ; тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ ; імпульсна напруга  $U_{имп}$ ; коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{перu}$ , а також під час визначення

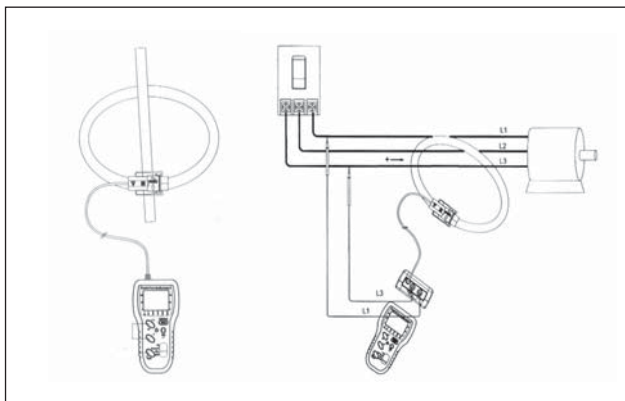


Рис. 1. Схема підключення аналізатора в мережу



Рис. 3. Крива протікання струму залежно від напруги та реального часу

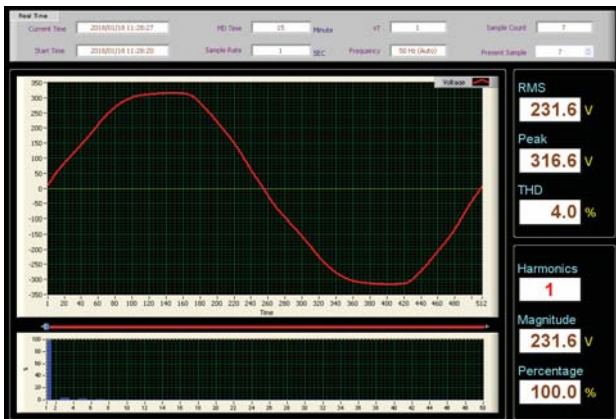


Рис. 2. Крива напруги при переважно індуктивному навантаженні



Рис. 4. Зміна активної потужності залежно від напруги мережі в часі

деяких показників якості електроенергії (ЯЕ) використовуються допоміжні параметри електроенергії: частота повторення змін напруги  $F_{\delta U_t}$ ; інтервал між змінами напруги  $\Delta t_{i,i+1}$ ; глибина про-

валу напруги  $\delta U_n$ ; частота появи провалів напруги  $F_n$ ; тривалість імпульсу з рівнем 0,5 від його амплітуди  $\Delta t_{imp0,5}$ ; тривалість тимчасової перенапруги  $\Delta t_{nepU}$  [1, с. 11].



Рис. 5. Зміна повної потужності залежно від напруги мережі в часі



Рис. 6. Графік кута зсуву вектора напруги при переважно реактивному навантаженні

Таблиця 1

Матриця частини даних параметрів системи

|    | A  | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|----|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4  | Sample Rate (Sec) : 1  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5  | Sample Count : 40  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6  | MD Time (Minute) : 15  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7  | VT : 1   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 8  | Func / Func_1 : 2 / 2 / NO / 1P  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 9  | Date/Time, V, A, W, VA, Phase, V Waveform, A Waveform  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 10 | 2018/01/18 11:38:50,229.7,8.2,715.8,1883.5,112.3,77 93 413 701 1021 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2781 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 11 | 2018/01/18 11:38:51,229.7,8.2,715.8,1883.5,112.3,77 93 413 701 1021 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2781 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 12 | 2018/01/18 11:38:52,229.7,8.1,687.3,1860.6,111.3,93 173 413 765 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2845  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 13 | 2018/01/18 11:38:53,229.7,8.1,687.3,1860.6,111.3,93 173 413 765 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2589 2845  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 14 | 2018/01/18 11:38:54,228.6,8.1,712.7,1851.7,112.7,79 175 415 735 1055 1311 1567 1823 2143 2335 2591 2847  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 15 | 2018/01/18 11:38:55,228.6,8.1,712.7,1851.7,112.7,79 175 415 735 1055 1311 1567 1823 2143 2335 2591 2847  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 16 | 2018/01/18 11:38:56,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 17 | 2018/01/18 11:38:57,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 18 | 2018/01/18 11:38:58,228.7,8.1,715.1,1852.5,112.4,74 170 410 730 1050 1306 1626 1818 2170 2330 2586 2810  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 19 | 2018/01/18 11:38:59,228.2,8.0,715.0,1825.6,112.5,80 96 416 736 992 1312 1568 1856 2080 2336 2528 2784 29 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 20 | 2018/01/18 11:39:00,228.2,8.0,715.0,1825.6,112.5,80 96 416 736 992 1312 1568 1856 2080 2336 2528 2784 29 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 21 | 2018/01/18 11:39:01,229.9,8.2,731.0,1885.2,112.8,75 187 411 731 1051 1307 1659 1883 2139 2363 2587 2843  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 22 | 2018/01/18 11:39:02,229.9,8.2,731.0,1885.2,112.8,75 187 411 731 1051 1307 1659 1883 2139 2363 2587 2843  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 23 | 2018/01/18 11:39:03,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 24 | 2018/01/18 11:39:04,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 25 | 2018/01/18 11:39:05,230.3,8.2,727.6,1888.5,112.5,77 173 413 733 1053 1309 1565 1821 2077 2333 2525 2813  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 26 | 2018/01/18 11:39:06,229.0,8.1,711.2,1854.9,112.4,80 176 416 736 1024 1312 1568 1824 2080 2336 2528 2816  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 27 | 2018/01/18 11:39:07,229.0,8.1,711.2,1854.9,112.4,80 176 416 736 1024 1312 1568 1824 2080 2336 2528 2816  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 28 | 2018/01/18 11:39:08,228.0,8.0,691.7,1824.0,112.1,78 94 414 734 1054 1310 1534 1790 2014 2302 2526 2782 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Відхилення напруги характеризується показником усталеного відхилення напруги з такими нормами:

– нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги  $\delta U_y$  на затискачах приймачів електроенергії рівні, відповідно,  $\pm 5$  і  $\pm 10\%$  від номінальної напруги електричної мережі [7, с. 100–101];

– нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електроенергії до електричних мереж напругою 0,38кВ і більше повинні бути встановлені в договорах на користування електроенергією між електропостачальною організацією та споживачем електроенергії з урахуванням необхідності виконання норм цього стандарту на затискачах приймачів електроенергії [4, с. 95];

– відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти з такими нормами: нормально допустимі та гранично допустимі значення відхилення частоти  $\Delta f_y$  рівні, відповідно,  $\pm 0,2$  Гц і  $\pm 0,4$  Гц.

Оцінювання відповідності показників якості електроенергії нормам здійснюється за час розрахункового періоду, який дорівнює 24 год., за винятком тривалості провалу напруги, імпульсу напруги та коефіцієнта тимчасової перенапруги.

Для визначення відхилення частоти необхідно здійснити її вимірювання. Для кожного  $i$ -го спостереження за встановлений період часу проводиться вимірювання дійсного значення частоти (Гц), а потім розраховується усереднене значення  $f_y$  (Гц) як результат усереднення  $N$  спостережень  $f_i$  за інтервал часу, що дорівнює 20с, за формулою:

$$\Delta f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}.$$

Спостережень має бути не менше ніж 15.

Значення відхилення частоти  $\Delta f$  (Гц) розраховуємо за формулою:

$$\Delta f_y = f_y - f_{ном},$$

де  $f_y$  – усереднене значення частоти за інтервал часу 20 с, Гц;

$f_{ном}$  – номінальне значення частоти, Гц.

Значення усередненої напруги  $U_y$  (В, кВ) як результат усереднення  $N$  спостережень напруг  $U_{(1)i}$  та  $U_{1(i)i}$  за інтервал часу 1 хв. визначаємо за формулою:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}},$$

де  $U_i$  – значення напруги  $U_{(1)i}$  та  $U_{1(i)i}$  в  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

Спостережень за 1 хв. проводимо не менше ніж 18.

Значення усталеного відхилення напруги у відсотках знаходимо за формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де  $U_{ном}$  – номінальна фазна (міжфазна) напруга, В, кВ. Якість електричної енергії за усталеним відхиленням напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважається такою, що відповідає вимогам стандарту, якщо всі значення усталеного відхилення напруги, що виміряні протягом 24 год., знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, а не менше ніж 95% вимірювань за цей період, які знаходяться в інтервалі, обмеженому нормально допустимими значеннями.

Додатково допускається визначати відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю виходу виміряних значень цього показника за межі нормально та гранично допустимих відхилень. Якість електричної енергії за відхиленням напруги вважається такою, що відповідає вимогам, якщо сумарна тривалість часу виходу за межі нормально допустимих значень становить не більше ніж 5% від усталеного періоду часу, тобто 1 год. 12 хв., а за межі гранично допустимих значень – 0%.

Для визначення напруги за допомогою аналізатора необхідно зробити порівняння реальної кривої напруги з ідеальною. Оскільки ідеальна крива напруги у вигляді синусоїди нам відома, то реальна або дійсна крива синусоїди напруги при цьому дослідженні, де використовується переважно індуктивне навантаження, буде мати такий вигляд, який зображено на рис. 2.

Як видно з графіка, ця синусоїдальна крива напруги дещо спотворена, оскільки напруга в мережі становить 231,6 В, яка перевищує допустимі значення номінальної напруги відповідно до показників якості електричної енергії ( $\pm 5\%$ ).

Відповідно зі зміною напруги в системі, буде змінюватись і струм навантаження.

Графіки потужностей матимуть такий вигляд, як зображено на рис. 4 та рис. 5.

Варто зауважити, що, відповідно до даних, отриманих під час дослідження, частота не змінювалася протягом усього періоду й дорівнювала  $f=50\text{Гц}=\text{const}$ .

Оскільки навантаження переважно реактивного характеру, то, відповідно, кут зсуву вектора напруги становить 112,5о електричних градусів.

Під час дослідження за допомогою програми Excel складено матрицю даних параметрів мережі та параметрів споживача електричної енергії.

**Висновки.** Отже, як видно з проведеного дослідження, напруга електричної мережі змінюється в часі, відповідно, змінюються всі параметри електричної системи мережа-споживач. Варто зазначити, що в разі відхилення напруги

на  $\pm 5\%$  нормативні показники знаходяться в діапазоні 209÷231В. Проте в деяких випадках під час декількох спостережень такий показник відрізняється від цих параметрів, а тому необхідно зауважити, що параметри електричної енергії постійно змінюються залежно від навантаження, а це, у свою чергу, впливає на показники якості електричної системи загалом.

#### Список літератури:

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Держстандарт України. Київ, 1999. 32 с.
2. Кузнєцов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. Технічна електродинаміка. 2011. № 3. С. 46–52.
3. Ванько В.М., Столярчук П.Г. Проблеми контролю якості електроенергії в електричних мережах. Вимірювальна техніка та метрологія. 2001. № 58. С. 47–56.
4. Бунько В.Я. Підвищення параметрів електричної енергії в мережах 0,4 кВ на основі оптимальної компенсації реактивної потужності. Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XV Міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 11–12 квітня 2017 р.). Кременчук, 2017. С. 95–96.
5. ГОСТ 21128–83 Системы энергоснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В.
6. ГОСТ 30372–95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
7. Бунько В.Я. Питання якості електричної енергії в розподільних пристроях систем електропостачання. Молодий вчений. 2016. № 1 (28). Ч. 3. С. 99–103.
8. Бунько В.Я. Розробка моделі активного фільтра вищих гармонік для забезпечення показників якості електричної енергії / за ред. С.М. Ніколаєнко. Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2016. Вип. 240. Ч. 1. С. 264–271.

#### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

*В статье проведено обоснование и анализ определения и исследования показателей качества электрической энергии системы электроснабжения. Исследования базируются на использовании анализатора качества электроэнергии AFLEX-6300. Исследования проведены в реальном времени с использованием синхронизации с ПК. Показано и обосновано зависимости электрических параметров сети от реального времени, при котором преобладает индуктивная нагрузка. Приведены графические зависимости, характеризующие работу электрической сети и, соответственно, качество электрической энергии, что определяется основным показателем – отклонением напряжения и частоты.*

**Ключевые слова:** показатели, качество, электрическая энергия, отклонения, напряжение, частота, нагрузка, сеть.

#### ANALYSIS OF RESEARCH AND DETERMINATION OF INDICATORS OF ELECTRIC ENERGY QUALITY WITH PRIORLY INDUCTIVE LOAD

*The article substantiates and analyzes the determination and study of the electrical energy quality indicators of the power supply system. The conducted studies are based on the use of the AFLEX-6300 power quality analyzer. These studies were carried out in real time using synchronization with a PC. The paper shows and justifies the dependence of the electrical network parameters on the real time, in which the inductive load predominates. Graphic dependencies describing the operation of the electrical network and, accordingly, the quality of electrical energy, are given, is determined by the main indicators – voltage and frequency deviation.*

**Key words:** indicators, quality, electrical energy, deviations, voltage, frequency, load, network.