

В.Л. Коваленко, В.В. Радченко, Н.О. Міняйло,

А.А. Єрофєєва, В.В. Артемчук, В.Л. Прихно

## **НОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПРИЧИНИ ЇХ ВІДХИЛЕННЯ ВІД ВСТАНОВЛЕНИХ НОРМАТИВІВ**

*Анотація.* Метою роботи є комплексне дослідження питань нормування та забезпечення якості електроенергії в умовах сучасних викликів, зокрема активної інтеграції розподілених джерел енергії, мікромереж, електромобільності та широкого використання силової електроніки. Стаття спрямована на систематизацію існуючих нормативних вимог до показників якості електропостачання та виявлення основних причин відхилення цих показників від стандартів.

*Методика.* У роботі використано метод критичного аналізу міжнародних та національних стандартів (EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000), а також огляд наукових праць і практичних кейсів щодо виявлення, класифікації та компенсації збурень у параметрах якості електроенергії. Здійснено узагальнення типових PQ-порушень, їхніх причин і засобів запобігання.

*Результати.* Наведено перелік ключових показників якості електроенергії (частота, напруга, флікер, гармоніки, несиметрія, короточасні події), їхні допустимі значення згідно зі стандартами та особливості контролю у сучасних мережах. Описано фізичні причини порушень якості – аварії, вплив нелінійних навантажень, пуски двигунів, зміна навантаження, погодні явища. Проаналізовано вплив новітніх технологій (DG, ВДЕ, EV charging) на PQ.

*Наукова новизна.* Запропоновано цілісний підхід до аналізу нормативно-технічного забезпечення якості електроенергії, який враховує сучасні тенденції в енергетиці. Вперше в одному дослідженні узагальнено як нормативні аспекти, так і практичні фактори впливу на PQ з деталізацією механізмів їх виникнення.

*Практичне значення.* Отримані результати можуть слугувати основою для оновлення локальних нормативів, покращення систем моніторингу, впровадження інтелектуальних засобів компенсації збурень, а також для навчання персоналу енергетичних компаній у сфері управління якістю енергії.

*Ключові слова:* якість електроенергії, PQ-норми, стандарти IEEE, EN 50160, гармонічні спотворення, флікер, розподілена генерація, мікромережі, компенсація, енергетичні стандарти.

**Вступ.** Якість електричної енергії (power quality, PQ) є критично важливим показником ефективності та надійності енергосистеми. Під якістю електроенергії

розуміють відповідність параметрів напруги та струму встановленим нормам за частотою, амплітудою, формою сигналу та симетрією трифазної системи. Забезпечення належної якості живлення набуває особливого значення в сучасних умовах стрімкого розвитку силової електроніки, розподіленої генерації та чутливих споживачів електроенергії [1, 2]. Зниження якості електроенергії може призводити до збоїв у роботі промислового обладнання, втрати даних, передчасного виходу з ладу техніки та значних економічних збитків. За оцінками дослідників, сумарні річні втрати від проблем з якістю електроенергії складають \$119–188 млрд у США та близько €150 млрд у країнах ЄС [2]. Відтак, нормування показників якості електроенергії покликане регламентувати допустимі відхилення параметрів напруги та струму з метою забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Протягом останніх п'яти років опубліковано значну кількість наукових праць, присвячених проблемам якості електроенергії, розвитку стандартів та методів поліпшення PQ. Дослідники всебічно аналізують міжнародні стандарти з якості енергопостачання та пропонують шляхи їх удосконалення у контексті новітніх викликів енергосистем [3].

Зокрема, проведено критичний аналіз чинних нормативів для розподільчих мереж і мікромереж на постійному струмі [3], а також тенденцій гармонізації національних стандартів із міжнародними рекомендаціями [3,1]. В оглядовій роботі [3] наведено узагальнення основних міжнародних стандартів PQ (таких як IEEE 519-2014, EN 50160 та серія IEC 61000), а також рішення для забезпечення дотримання цих норм у промислових мережах. Підкреслено, що кожна із зацікавлених сторін – постачальники електроенергії, виробники обладнання та споживачі – мають виконувати свої нормативні зобов'язання для підтримання належної якості напруги [3]. Однак деякі дослідження відзначають недостатню конкретизацію обов'язків сторін у наявних стандартах та потребу в детальнішому визначенні вимог до якості живлення [3]. Так наприклад в роботі [1] автори наголошують, що нормативне забезпечення якості електроенергії є першим кроком до розв'язання проблем PQ в сучасних електричних системах, де зростає частка дестабілізуючих факторів [1].

Актуальною темою останніх років є вплив новітніх технологій на якість електроенергії. Зокрема, інтеграція розподілених джерел енергії (сонячних і вітрових електростанцій, систем накопичення) та зарядних станцій електромобілів призводить до появи нестабільностей напруги, гармонічних спотворень і флікеру у розподільчих мережах [1, 4]. Згідно інформації роботи [5], основними викликами для якості електроенергії в мережах із децентралізованою генерацією є коливання напруги, дисбаланс фаз та зростання рівня гармонік [5, 4]. Автори [6] у своєму огляді окремо розглядають проблематику PQ у мікромережах: відсутність інерції, супергармоніки від силових перетворювачів, а також адекватність існуючих стандартів для таких систем [6, 7]. Водночас значна частина досліджень присвячена розробці методів моніторингу та ідентифікації порушень PQ. Розвиваються системи автоматичного виявлення та класифікації збурень на основі штучного інтелекту – нейронних мереж,

методів глибокого навчання, вейвлет-аналізу тощо [3, 4]. Наприклад, автори [8] запропонували використання глибокої згорткової нейромережі для класифікації типових короткочасних PQ-подій (провалів, підвищень напруги, переривань, гармонік) із високою точністю. Подібні роботи спрямовані на створення в реальному часі систем діагностики якості енергії для мереж Smart Grid [4]. Окремо досліджуються питання локалізації джерел порушень якості – наприклад, авторами [1] виконано огляд методів визначення місця виникнення PQ-збурень у електромережі, що дозволяє справедливо розподіляти відповідальність за погіршення якості між постачальником і споживачами.

Публікації також охоплюють широкий спектр методів підвищення якості електроенергії та компенсації відхилень. Розглядаються традиційні рішення – статичні вар компенсатори (SVC), динамічні компенсатори напруги (DVR), фільтри вищих гармонік – а також новітні інтегровані пристрої, такі як об'єднані системи управління якістю живлення (Unified Power Quality Conditioners, UPQC) [9, 10, 11]. Значний інтерес привертають активні фільтри (APF) та статичні компенсатори на основі силової електроніки (STATCOM, D-STATCOM) для одночасного придушення гармонік і підтримання напруги [12, 11]. Так, наприклад, автори [10] провели огляд, присвячений впровадженню трифазних APF/STATCOM у системах з високою проникністю відновлюваної енергії, і відзначили ефективність цих пристроїв у зниженні гармонічних спотворень та коливань напруги від сонячних і вітрових станцій. Інші дослідники зосереджені на оптимальному розміщенні і керуванні таких компенсаторів. Зокрема, в науковій праці [13] розглянуто задачу оптимального розподілу систем зберігання енергії по мережі для покращення профілю напруги і зменшення коливань потужності, досягаючи при цьому покращення показників PQ. Запропоновано також розподілені системи покращення PQ: в [14] представлена концепція розосередженого пристрою кондиціонування якості енергії для трифазних чотирипровідних мереж низької напруги. У ряді праць акцентовано використання штучного інтелекту для вдосконалення керування компенсаторами PQ – наприклад, в [15] описано застосування алгоритмів підсилюючого навчання (reinforcement learning) для адаптивного керування D-STATCOM у мікромережі, що дозволило демпфувати коливання напруги і частоти в режимі реального часу [16]. Також авторами [11] запропоновано «інтелектуальний» керований DSTATCOM, у якому регулятор на основі нейромереж дозволяє одночасно компенсувати реактивну потужність, дисбаланс і гармоніки в системі живлення.

З огляду на вищезазначені роботи можна зробити висновок, що проблема забезпечення якості електроенергії досліджується комплексно: від аналізу стандартів та нормативів – до технічних методів моніторингу і поліпшення параметрів енергії. У даній статті узагальнено сучасний стан питання нормування показників якості електроенергії та причин відхилення цих показників від нормативних. На основі аналізу літературних джерел і стандартів сформовано систематизований опис основних показників якості, їх допустимих значень та типових причин порушень. Крім того, розглянуто наявні підходи до контролю PQ і засоби компенсації, з акцентом на перспективні рішення для сучасних розподільчих мереж.

**1. Нормування показників якості електроенергії.** Показники якості та їх нормативні значення. До основних показників якості електроенергії, що нормуються стандартами, належать: відхилення частоти мережі, відхилення напруги від номіналу (довготривалі перенапруги/недонапруги), коливання напруги (флікер), короткочасні провали та підвищення напруги, несинусоїдальність напруги (гармонічні викривлення), несиметрія трифазної напруги, а також показники короткочасних перенапруг та імпульсних перешкод [17-20]. У міжнародній практиці ключові критерії якості визначені стандартами МЕК і ІЕЕЕ. Європейський стандарт EN 50160 встановлює допустимі межі параметрів напруги, що постачається споживачам у мережах загального призначення. Згідно EN 50160, у нормальному режимі протягом кожного тижня 95% середніх значень параметрів повинні залишатися в заданих межах. Основні вимоги EN 50160 для мереж низької напруги такі [21, 22]: частота повинна підтримуватися з відхиленням не більше  $\pm 1\%$  від номінальної (для об'єднаних енергосистем) більшу частину часу, а максимальні відхилення частоти не мають перевищувати  $+4\%/-6\%$  (наприклад, для 50 Гц це приблизно 47–52 Гц) [3]; середні значення напруги 10-хвилинної витримки повинні знаходитися в межах  $\pm 10\%$  від номінальної напруги  $U_{ном}$ ; коефіцієнт несиметрії (негативна послідовність напруги) не повинен перевищувати 2% від значення позитивної послідовності; сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги (THD) на шині споживача має бути не більше 8%.

Також EN 50160 наводить гранично допустимі величини для окремих гармонік напруги (наприклад, гармоніка 5 порядку – до  $\sim 6\%$  тощо). Зазначені норми застосовуються для умов нормальної роботи мережі і можуть тимчасово перевищуватися при аварійних чи нестандартних ситуаціях (наприклад, екстремальні погодні умови). Важливо, що EN 50160 фактично слугує орієнтиром для енергопостачальних компаній і не завжди юридично зобов'язує їх гарантувати виконання всіх показників у будь-який момент [22]. Проте більшість європейських країн інтегрували ці вимоги у національні стандарти або правила постачання електроенергії.

Американська практика спирається на стандарти ІЕЕЕ [18, 19]. Документ ІЕЕЕ 1159-2019 описує категорії явищ, що впливають на якість електроенергії, та рекомендовані межі їх параметрів. Зокрема, у ІЕЕЕ 1159 визначено класифікацію короткочасних змін напруги: провал напруги (Voltage Sag/Dip) – зниження ефективного значення до 0,1–0,9 у номінальних одиницях від номіналу тривалістю від 0,5 циклу до 1 хвилини; перенапруга (Swell) – підвищення напруги до 1,1–1,8 у номінальних одиницях в тому ж інтервалі часу; короткочасне зникнення живлення (Instantaneous interruption) – падіння напруги нижче 0,1 у номінальних одиницях на час до 0,5 секунди тощо. ІЕЕЕ 519-2014 встановлює кількісні вимоги до рівнів гармонічних спотворень: наприклад, для розподільчих мереж низької напруги сумарний THD напруги на шинах не має перевищувати 5%, а окремі гармоніки – визначені процентні значення відносно основної гармоніки (для 3-ї та 5-ї гармонік – до  $\sim 4\%$ , для вищих порядків – менше). Крім того, ІЕЕЕ 519 регламентує допустимі гармонічні струми, що можуть

генеруватися навантаженнями, залежно від величини короткочасної потужності (соотношення короткого замикання). Таким чином, цей стандарт охоплює вимоги як до мережі (рівень напруги), так і до споживачів (обмеження емісії гармонік з їхнього боку).

Виробники електрообладнання керуються стандартами серії ІЕС 61000 з електромагнітної сумісності (ЕМС) [3]. Зокрема, ІЕС 61000-3-2 та 61000-3-12 встановлюють граничні рівні гармонічних струмів, що генеруються обладнанням малої і середньої потужності, підключеним до мережі. Вимоги до стійкості обладнання проти PQ-порушень (наприклад, імпульсних перенапруг, провалів напруги) визначені у стандартах ІЕС 61000-4-11, 4-13 тощо. Таким чином, з боку навантажень діють дві групи норм: обмеження емісії завад у мережу і вимоги до мінімальної імунітету пристроїв щодо нестабільності параметрів живлення [3]. Це забезпечує комплексний підхід: енергопостачальники відповідають за підтримання параметрів напруги у вузлах мережі в межах норм, а споживачі – за недопущення надмірного “забруднення” мережі нелінійними струмами та за стійку роботу свого обладнання при допустимих відхиленнях напруги [1,3]

*Новітні стандарти та тенденції.* Останніми роками міжнародні організації працюють над оновленням нормативної бази з PQ з урахуванням розвитку Smart Grid. Так, МЕК видала технічну специфікацію ІЕС TS 62749:2020 «Оцінювання показників якості електроенергії – характеристики електрики, що постачається публічними мережами». Цей документ узагальнює досвід застосування EN 50160 та інших норм і надає рекомендації щодо уніфікації стандартів параметрів електропостачання для мереж різних рівнів напруги [20]. Він фактично є кроком до перегляду та гармонізації міжнародних вимог PQ, особливо з огляду на інтеграцію відновлюваних джерел енергії та нових навантажень (наприклад, зарядних станцій). Також триває робота в ІЕЕЕ над удосконаленнями стандартів моніторингу PQ – зокрема, ІЕЕЕ 1159 було оновлено в 2019 р. Наукова спільнота відзначає необхідність розробки окремих нормативів для мікромереж і систем постійного струму, оскільки традиційні визначення PQ (гармоніки, флікер тощо) розроблені для синхронних мереж змінного струму і не повністю враховують специфіку DC-систем [7]. На сьогодні це питання активно досліджується, але є предметом подальших стандартизаційних зусиль.

Підсумовуючи, можна зазначити, що на міжнародному рівні існує досить повна система нормативів показників якості електроенергії. Вона охоплює вимоги до постачальників (стабільність частоти та напруги, обмеження флікеру, несиметрії та гармонік на шині споживача) і до споживацького обладнання (обмеження викидів гармонік, імпульсних завад, вимоги до стійкості до провалів і імпульсів). Виконання цих норм контролюється шляхом моніторингу PQ- параметрів у мережі спеціалізованими вимірювачами класу А згідно ІЕС 61000-4-30. Дотримання стандартів забезпечує сумісність обладнання і мережі та мінімізує ризики збоїв. Нижче розглянуті причини, через які на практиці параметри якості можуть виходити за межі норм, попри наявність зазначених стандартів.

## 2. Причини відхилення показників якості електроенергії від нормованих.

Навіть за наявності строгих нормативів, у реальних електричних мережах часто спостерігаються відхилення параметрів електроенергії від встановлених меж. Причини цих відхилень різноманітні і пов'язані як з особливостями режимів роботи самої енергосистеми, так і з впливом навантажень. Основні види порушень якості та їх типові причини можна згрупувати наступним чином:

*Довготривалі відхилення напруги.* Підвищення або пониження напруги живлення понад  $\pm 10\%$  від номіналу протягом тривалого часу зазвичай зумовлені змінами навантаження в мережі або неправильною роботою регулюючих пристроїв. Якщо навантаження на лінії перевищує розрахункове, виникає значний спад напруги через кінцевий опір мережі – це призводить до заниженого рівня напруги у споживачів (так звана “просадка” або недонапруга). Навпаки, при низькому завантаженні мережі напруга може підвищуватися (особливо в радіальних мережах із компенсацією реактивної потужності, де в режимі малого навантаження конденсатори спричиняють перенапругу). Такі відхилення носять квазістаціонарний характер. Додатковою причиною довготривалих перенапруг може бути неправильне налаштування регуляторів напруги трансформаторів (OLTC), коли напруга підтримується завищеною. Довготривала недонапруга часто спостерігається в кінцевих точках розгалужених сільських мереж через обмежений переріз проводів і великі падіння напруги на них.

*Короткочасні провали напруги (dips/sags).* Провал напруги – це різке зниження її рівня до  $0,1-0,9$  Уном тривалістю від кількох напівперіодів до десятків циклів. Основною причиною більшості провалів є короткі замикання (аварійні пошкодження) в електричних мережах [23]. Під час КЗ струми різко зростають, що викликає падіння напруги на реактансах системи – у результаті напруга в значній частині мережі “просідає” до усунення аварії або відключення пошкодженої ділянки. Іншим поширеним чинником є пуск великих електродвигунів. Наприклад, при прямому пуску асинхронного двигуна з великою потужністю, початковий кидок струму (може перевищувати номінальний в 6–8 разів) спричиняє суттєве просідання напруги на шинах живлення протягом кількох секунд [23]. Таким чином, запуск потужних насосів, компресорів, прокатних станів тощо нерідко супроводжується короткочасними “провалами” напруги в мережі підприємства і навіть у суміжних споживачів. До провалів напруги також можуть призводити різкі кидки навантаження – наприклад, одночасне вмикання великої кількості споживачів або комутація трансформаторів. Причиною глибоких провалів в окремі фази іноді стають перехідні небаланси – скажімо, однофазне замикання на землю в мережі із ізольованою нейтраллю може викликати просідання напруги на здорових фазах до  $\sim 58\%$  від номіналу на час до спрацьовування захисту.

*Короткочасні перенапруги (swells) та імпульсні стрибки.* Раптове підвищення напруги до рівня  $\sim 1,1-1,8$  Уном на короткий інтервал трапляється рідше, але можливі причини включають: різке зменшення навантаження або відключення великого споживача (що веде до “перепідняття” напруги генераторами та регуляторами,

інерційно налаштованими на попереднє навантаження); обрив одного із проводів нейтралі чи компенсуючого пристрою, що викликає дисбаланс фаз і перенапругу на одній із фаз. Також перенапруга може виникати після очищення (гасіння) короткого замикання, коли електромагнітні процеси призводять до перерегулювання з боку автоматичних регуляторів збудження генераторів. Імпульсні короточасні перенапруги (сплески) часто викликані грозовими перенапруженнями або комутацією індуктивних навантажень (наприклад, вимкнення довгої ЛЕП, розмагнічування трансформатора). Ці імпульси мають дуже коротку тривалість (мілісекунди і менше) і спектр високочастотних складових, тому розглядаються окремо від “повільних” перенапруг типу swell.

*Флікер (коливання напруги).* Флікером називають швидкі випадкові коливання рівня напруги, що спричиняють мерехтіння освітлення. Причиною флікера є коливання споживаної реактивної потужності навантаження, які призводять до відповідних коливань напруги. Класичним джерелом флікера є електрична дугова піч: під час роботи сталеплавильної печі електрична дуга поводить себе як нелінійне і нестабільне навантаження, струм дуги постійно хаотично змінюється, що зумовлює глибокі модуляції напруги на шинах живлення в діапазоні частот 5–15 Гц. Це призводить до помітного мерехтіння ламп розжарювання. Такі коливання можуть поширюватися по мережі на великі відстані. Інші приклади навантажень, що викликають флікер: зварювальні агрегати, електроприводи з різкими періодичними змінами навантаження (пресове обладнання, прокатні стани), великі шахтні підйомники тощо [24]. Навіть вітрові електростанції за певних умов можуть генерувати невеликі періодичні коливання напруги (через ефект тіней від лопатей – “флікер вітротурбіни”, однак сучасні системи управління мінімізують це). Флікер вимірюється показниками короткострокової та довгострокової помітності миготіння  $P_{sub}$ , які розраховуються за методикою ІЕС. Нормативно значення  $P_{sub}$  не повинно перевищувати 1,0 (тобто межі чутливості середнього спостерігача) для 95% інтервалів за тиждень.

*Несинусоїдальність (гармонічні спотворення).* Гармонічні складові напруги і струму виникають через нелінійні властивості навантажень та джерел. Сучасні електроприймачі дедалі більше містять силову електроніку (випрямлячі, інвертори, імпульсні джерела живлення), яка споживає струм несинусоїдальної форми навіть при ідеально синусоїдальній напрузі мережі. До основних генераторів гармонік у розподільчих мережах належать: випрямлячі в системах живлення електроніки (комп’ютери, телевізори, світлодіодне освітлення з імпульсними драйверами), регульовані електроприводи з перетворювачами частоти, зарядні пристрої електромобілів, джерела безперебійного живлення (UPS), а також насичені трансформатори та дугові печі [24]. Зростання частки таких нелінійних навантажень призвело до того, що рівні гармонічних спотворень у мережах помітно зросли за останні десятиліття [1]. Гармонічні струми, протікаючи через імпеданси мережі, спричиняють появу відповідних гармонік напруги на шинах. Найпоширеніші гармоніки – це 3, 5, 7 порядок у системах 50 Гц, оскільки випрямлячі на 6 імпульсів генерують в основному непарні несиметричні гармоніки. Наслідком є викривлення форми

синусоїди напруги, що може негативно впливати на роботу обладнання (перегрів двигунів і трансформаторів через вихрові струми, резонанси в мережі, помилкове спрацювання реле). Основна причина гармонік – нелінійні навантаження. У сучасних офісних та побутових мережах частка таких навантажень дуже висока (персональні комп'ютери, LED-освітлення з блоками живлення, побутова техніка з електронними компонентами). У промисловості великі внески гармонік дають перетворювачі для електроприводів (наприклад, тягові перетворювачі на електротранспорті, насосні станції з регульованим приводом, вентиляційні системи). Таким чином, “забруднення” мережі гармоніками прямо пов'язано з прогресом електроніки. Додатково, резонансні явища можуть призводити до підсилення певних гармонік: наприклад, наявність в мережі компенсуючих конденсаторів разом з індуктивністю системи може створити резонанс на частоті деякої гармоніки, викликаючи її значне зростання. Це слід враховувати при проектуванні фільтрокомпенсуючих установок.

*Несиметрія напруги.* Несиметричний режим (неспівпадіння амплітуд і фаз напруг трьох фаз) виникає переважно через несиметричні навантаження. В мережах низької напруги поширеною є ситуація, коли одна фаза перевантажена (багато однофазних споживачів на ній), тоді як інші – недовантажені. Це призводить до появи вектора негативної послідовності напруги (–2% чи більше від прямої послідовності) і дисбалансу струмів. Іншою причиною можуть бути неповнофазні режими та аварії – наприклад, обрив однієї фази лінії 10 кВ, при якому споживачі 0,4 кВ можуть отримувати суттєво несиметричну напругу через зв'язок фаз на трансформаторі. Несиметрія викликає нагрівання трифазних двигунів (поява струмів подвійної частоти в роторі) та зниження їхнього обертового моменту [2]. Тому стандарти (EN 50160, ГОСТ 13109 тощо) обмежують коефіцієнт несиметрії напруги. Як згадано, основна причина дисбалансу – несиметричні навантаження, зокрема, потужні однофазні споживачі, підключені до трифазної мережі (електричні залізничні лінії з живленням на одну фазу, електропечі опору та дугові печі, зварювальні апарати) [2]. Наприклад, при живленні електрифікованої залізниці (~25 кВ, 50 Гц) від загальної мережі виникає значний перекид фаз, тому застосовують спеціальні симетрувальні пристрої або двофазні трансформаторні схеми.

Підсумовуючи, внутрішні причини зниження якості електроенергії включають: динамічні процеси в енергосистемі (перехідні процеси при перемиканні і аваріях), характеристики навантажень (нестационарне або нелінійне споживання), дисбаланс споживання по фазах, а також особливості конфігурації мережі (резонансні явища, обмежена пропускна здатність). Зовнішні впливи (грози, погодні умови) теж можуть викликати імпульсні перенапруги або обриви ліній, що опосередковано веде до PQ-проблем. Різні типи порушень якості часто проявляються одночасно: наприклад, коротке замикання викличе і провал напруги (в точці, віддаленій від місця КЗ), і перехідні гармонійні спотворення, і можливий дисбаланс фаз. Тому аналіз причин має проводитися комплексно, із застосуванням засобів моніторингу.



Важливо зазначити, що енергопостачальні компанії зазвичай несуть відповідальність за системні причини порушень (наприклад, недостатню регуляцію напруги, незадовільний стан мережі, що призводить до частих аварій), тоді як споживачі відповідають за привнесені ними викривлення (гармоніки, несиметрія від їх обладнання) [1]. Проте на практиці розмежування часто утруднене. Саме тому розробляються методи локалізації джерел PQ-подій – наприклад, аналіз взаємних змін напруги і струму у точці приєднання дозволяє визначити, чи йде гармоніка від навантаження до мережі або навпаки [1].

**Висновки.** Забезпечення належної якості електроенергії є важливою умовою стабільного функціонування як промислових підприємств, так і побутових споживачів. У світлі сучасних трансформацій в енергетиці, пов'язаних із децентралізацією генерації, зростанням частки відновлюваних джерел, впровадженням мікромереж, зарядної інфраструктури електромобілів та широким застосуванням електронних пристроїв, проблема підтримання нормативних параметрів якості електропостачання набула особливої актуальності. Проведене дослідження дозволило не лише систематизувати чинну нормативну базу в цій сфері, а й виявити типові порушення показників якості та встановити їх найпоширеніші причини.

У статті зроблено акцент на ключових стандартах – EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, серії IEC 61000, які регламентують допустимі межі таких параметрів, як частота, амплітуда та симетрія напруги, коефіцієнти гармонічних спотворень, флікер, провали й перенапруги, тощо. Особливу увагу приділено їх практичному застосуванню в умовах реальних розподільчих мереж. У результаті виявлено, що в багатьох випадках параметри якості виходять за межі нормативних значень через фактори, які часто мають комплексну природу: це одночасна дія аварійних, експлуатаційних, погодних і споживацьких чинників.

Було продемонстровано, що найбільш поширеними джерелами порушень є короткі замикання, пуски потужних електродвигунів, нелінійні споживачі, фази з перевантаженням, а також вплив погодних умов. Зростання частки нелінійних навантажень у побутовому та промисловому секторі, а також активне підключення систем на основі силової електроніки сприяють підвищенню рівнів гармонік, несиметрії та флікера, що ускладнює стабільну роботу мережі.

Також у роботі проаналізовано сучасні технічні підходи до покращення показників якості електроенергії. Наведено огляд традиційних та інноваційних засобів компенсації збурень – таких як активні фільтри, статичні компенсатори, об'єднані системи керування якістю живлення, а також інтелектуальні рішення на базі штучного інтелекту. Встановлено, що застосування таких рішень дозволяє в режимі реального часу забезпечити адаптивне керування параметрами напруги, знижуючи негативний вплив динамічних навантажень і нестабільних джерел енергії.

Окрему увагу приділено питанням відповідальності різних сторін за дотримання стандартів якості – зокрема, важливості чіткого розмежування між системними порушеннями, що виникають внаслідок недосконалості мережевої інфраструктури, та споживацькими порушеннями, пов'язаними з характеристиками підключеного

обладнання. У зв'язку з цим доцільним є впровадження технологій локалізації джерел збурень, що дозволить справедливо розподіляти відповідальність і підвищить рівень прозорості в енергопостачанні.

#### ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Martinez, R., Castro, P., Arroyo, A., Manana, M., Galan, N., Moreno, F. S., Bustamante, S., & Laso, A. (2022). *Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review*. Sustainability, 14(12), 7428. <https://doi.org/10.3390/su14127428>
2. Afonso, J. L., Tanta, M., Pinto, J. G. O., Monteiro, L. F. C., Machado, L., Sousa, T. J. C., & Monteiro, V. (2021). *A Review on Power Electronics Technologies for Power Quality Improvement*. Energies, 14(24), 8585. <https://doi.org/10.3390/en14248585>
3. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). *Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review*. Energies, 13(21), 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>
4. Li J, Liu H, Wang D and Bi T (2021) *Classification of Power Quality Disturbance Based on S-Transform and Convolution Neural Network*. Front. Energy Res. 9:708131. doi: 10.3389/fenrg.2021.708131
5. D. Razmi, T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi and M. Ghadamyari, "An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With the Presence of Distributed Generation Resources," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 10308-10325, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238685.
6. Sepasi, S., Talichet, C., & Pramanik, A. S. (2023). *Power quality in microgrids: A critical review of fundamentals, standards, and case studies*. *IEEE Access*, 11, 8493–8510. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321301>
7. Van den Broeck, G., Stuyts, J., & Driesen, J. (2018). *A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids*. *Applied Energy*, 229, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.077>
8. Wang, S., & Chen, H. (2019). *A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using a deep convolutional neural network*. *Applied Energy*, 235, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.087>
9. Diab, M.; Abdelhamid, T.H.; Deghedie, S. *Survey of Active Power Filters Configurations*. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA), Pondicherry, India, 6–7 July 2018; IEEE: Pondicherry, India, 2018; pp. 1–14.
10. Tareen, W.U.; Mekhilef, S.; Seyedmahmoudian, M.; Horan, B. *Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 70, 635–655.
11. Chen, J.-H., Tan, K.-H., & Lee, Y.-D. (2022). *Intelligent Controlled DSTATCOM for Power Quality Enhancement*. Energies, 15(11), 4017. <https://doi.org/10.3390/en15114017>
12. Hafezi, H.; D'Antona, G.; Dedè, A.; Della Giustina, D.; Faranda, R.; Massa, G. *Power Quality Conditioning in LV Distribution Networks: Results by Field Demonstration*. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 8, 418–427.

13. Das, C. K., Bass, O., Mahmoud, T. S., Kothapalli, G., Mousavi, N., Habibi, D., & Masoum, M. A. (2019). *Optimal allocation of distributed energy storage systems to improve performance and power quality of distribution networks*. Applied Energy, 252, 113468. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113468>
14. Dovgun, V., Temerbaev, S., Chernyshov, M., Novikov, V., Boyarskaya, N., & Gracheva, E. (2020). *Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks*. Energies, 13(18), 4915. <https://doi.org/10.3390/en13184915>
15. Bagheri, M., Nurmanova, V., Abedinia, O., & Naderi, M. S. (2018). *Enhancing power quality in microgrids with a new online control strategy for DSTATCOM using a reinforcement learning algorithm*. IEEE Access, 6, 38986–38996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2855221>
16. P. I. N. Barbalho, A. L. Moraes, V. A. Lacerda, P. H. A. Barra, R. A. S. Fernandes and D. V. Coury, "Reinforcement Learning Solutions for Microgrid Control and Management: A Survey," in IEEE Access, vol. 13, pp. 39782-39799, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3546578
17. EN 50160:2010. Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; Normalization Spanish Association: Madrid, Spain, 2010.
18. IEEE Std 519-2014. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Standards Association.
19. IEEE Std 1159-2019. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Standards Association. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
20. IEC TS 62749:2020. (2020). *Assessment of power quality – Characteristics of electricity supplied by public networks*. International Electrotechnical Commission.
21. CENELEC. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*; EN 50160:2010; CENELEC: Brussels, Belgium, 2010.
22. Markiewicz, H.C.D.A.; Klajn, A.W.U.o.T. Power Quality Application Guide. Voltage Disturbances. Standard EN 50160. Power Qual. Appl. Guide 2004, 5.4.2, 4–11.
23. Roger Alves de Oliveira, Bibiana Petry Ferraz, Ruth Agustini, Renato Ferraz, Roberto Chouhy Leborgne, Chapter 8 - Voltage dips caused by faults in a transmission system: a monitoring case study of a sensitive industrial consumer, Editor(s): P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, Jens Bo Holm-Nielsen, P. Sivaraman, Power Quality in Modern Power Systems, Academic Press, 2021, Pages 219-244, ISBN 9780128233467, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823346-7.00006-2>.
24. <https://powerquality.blog/2022/04/08/industrial-power-quality-problems>

Received 18.02.2025.  
Accepted 21.02.2025.

***Standardization of power quality indicators and the causes  
of their deviations from established norms***

*The aim of this study is a comprehensive investigation into the standardization and assurance of electric power quality under modern challenges, particularly the active*

*integration of distributed energy resources, microgrids, electromobility, and the widespread use of power electronics. The article focuses on systematizing current regulatory requirements for power quality indicators and identifying the main causes of their deviation from established standards.*

*The methods. The study employs a critical analysis of international and national standards (EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000), as well as a review of scientific literature and practical case studies related to the detection, classification, and mitigation of power quality disturbances. Typical PQ issues, their root causes, and preventive measures are generalized.*

*Findings. The paper presents a list of key power quality parameters (frequency, voltage, flicker, harmonics, unbalance, short-term events), their permissible values according to standards, and specific monitoring features in modern power networks. It also discusses the physical causes of quality deterioration, such as faults, nonlinear loads, motor startups, load fluctuations, and weather phenomena. The impact of emerging technologies (DG, RES, EV charging) on PQ is analyzed.*

*The originality. A holistic approach is proposed to analyze the regulatory and technical framework of power quality, considering modern energy trends. For the first time, both normative aspects and practical influencing factors are consolidated in a single study with detailed mechanisms of their manifestation.*

*Practical implementation. The findings can serve as a foundation for updating local standards, improving monitoring systems, implementing intelligent compensation devices, and educating power system personnel in power quality management.*

*Keywords: power quality, PQ standards, IEEE standards, EN 50160, harmonic distortion, flicker, distributed generation, microgrids, compensation, energy regulations.*

**Коваленко Віктор Леонідович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>.

**Радченко Віталій Васильович** – доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.. E-mail: radchvv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>.

**Міняйло Наталія Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: kafedra\_autp@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>.

**Єрофєєва Аліна Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: alinazgia@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>.

**Артемчук Віктор Васильович** – доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: art\_vv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-6056-5834>.

**Прихно Валерія Леонідівна** – старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: [valeria.prihno@gmail.com](mailto:valeria.prihno@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>.

**Kovalenko Viktor** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: [victor.l.kovalenko@gmail.com](mailto:victor.l.kovalenko@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>.

**Radchenko Vitalij** - Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.. E-mail: [radchvv@ukr.net](mailto:radchvv@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>.

**Miniailo Nataliia** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: [kafedra\\_autp@ukr.net](mailto:kafedra_autp@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>.

**Yerofieieva Alina** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: [alinazgia@gmail.com](mailto:alinazgia@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>.

**Artemchuk Viktor** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: [art\\_vv@ukr.net](mailto:art_vv@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-6056-5834>.

**Prykhno Valeriia** - senior lecturer at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: [valeria.prihno@gmail.com](mailto:valeria.prihno@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>.