

В. Стьопкін, В. Радченко, О. Ровенський,
А. Єрофєєва, В. Піліпенко, В. Прихно

КОНТРОЛЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Метою роботи Метою дослідження є комплексний аналіз проблем якості електроенергії (PQ) в мережах промислових підприємств, а також розробка та систематизація методів контролю, діагностики і покращення основних PQ-параметрів, таких як гармонічні спотворення, флікер, провали напруги, несиметрія фаз і реактивна потужність.

Методика. У роботі використано поєднання теоретичного аналізу, огляду стандартів (IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) та практичного досвіду впровадження сучасних цифрових аналізаторів PQ. Проаналізовано застосування фільтрів, компенсаторів та інтелектуальних систем, зокрема DVR, STATCOM, гібридних активних фільтрів, а також машинного навчання для класифікації PQ-подій.

Результати. У ході дослідження охарактеризовано основні показники PQ, наведено методи їх вимірювання, діагностики та компенсації. Представлено приклади впровадження технічних рішень для покращення якості енергії, зокрема: пасивні та активні фільтри гармонік, SVC і STATCOM для боротьби з флікером, методи зниження несиметрії та захисту від короткочасних порушень живлення.

Наукова новизна. Запропоновано концепцію розподіленої компенсації якості електроенергії із використанням можливостей смарт-інверторів та зарядних станцій. Розглянуто застосування нейромереж та S-перетворень для ідентифікації джерел збурень у режимі реального часу. Обґрунтовано переваги інтегрованих підходів до локальної та централізованої корекції PQ.

Практичне значення. Результати можуть бути використані інженерами з енергоменеджменту та персоналом підприємств для побудови систем моніторингу, захисту критичного обладнання та підвищення енергоефективності. Запропоновані рішення зменшують аварійність, втрати енергії та витрати на обслуговування, забезпечуючи відповідність сучасним стандартам сталого розвитку.

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

Вступ. Стабільне та якісне електропостачання є одним із ключових чинників ефективної роботи промислових підприємств у сучасних умовах технічного прогресу та цифрової трансформації. Залежність критичного технологічного обладнання від

стабільних параметрів електроенергії стрімко зростає, що робить забезпечення відповідного рівня якості електроенергії (Power Quality, PQ) стратегічно важливим завданням для інженерів, енергетиків та операторів мереж. В умовах зростання чутливості електроспоживачів до збурень, поширення високочастотної електроніки, широкого використання електроприводів та перетворювальної техніки, відхилення параметрів живлення навіть у межах кількох відсотків можуть спричинити суттєві наслідки - від збоїв у роботі автоматизованих ліній до пошкодження електроніки та аварійного простою виробництва.

Якість електроенергії визначається сукупністю параметрів, зокрема: стабільністю частоти та напруги, симетрією фаз, відсутністю провалів і перенапруг, низьким рівнем флікеру, гармонічних та міжгармонічних спотворень. Кожен із цих показників має нормативно визначені межі, недотримання яких може призвести до погіршення роботи обладнання, втрати енергоефективності та підвищення витрат на обслуговування. Особливо гостро питання PQ стоїть у таких галузях, як металургія, хімічна промисловість, мікроелектроніка, фармацевтика та інші сфери, де процеси є неперервними та вимагають високого рівня електротехнічної надійності.

Відповіддю на виклики сучасного енергоспоживання стало впровадження технологій постійного моніторингу PQ. Завдяки цифровим аналізаторам, що відповідають стандартам IEC 61000-4-30 [1], з'явилася можливість із високою точністю та частотою вимірювати параметри живлення у вузлових точках мережі та безпосередньо на відповідальних споживачах. Аналіз зібраних даних дозволяє не лише фіксувати відхилення, але й досліджувати їх динаміку, виявляти періодичність, джерела збурень та потенційні ризики. На основі статистичних показників, таких як SAIFI, SAIDI, рівні THD, флікер-індекси та ін., формуються рішення для корекції параметрів та підвищення загальної надійності мережі.

Окрім збору інформації, важливим завданням є її інтерпретація. Сучасні методи обробки сигналів — вейвлет-перетворення, коротке перетворення Фур'є, S-перетворення — у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяють в реальному часі класифікувати PQ-події та локалізувати їх джерела. Застосування штучного інтелекту та нейронних мереж відкриває нові можливості для автоматичного виявлення характеру порушень, таких як провали напруги, імпульси, гармонічні спотворення, та для формування рекомендацій щодо відповідних заходів реагування.

Втім, одного лише контролю недостатньо для забезпечення належного рівня якості. Комплексна система управління PQ передбачає також реалізацію технічних рішень на різних рівнях: від компенсації реактивної потужності та гармонік до встановлення динамічних відновлювачів напруги, систем безперебійного живлення, стабілізаторів фази та мережевих регуляторів. Із розвитком концепції Smart Grid та мікромереж, дедалі більше функцій щодо підтримки якості передається на рівень локальних енергоактивних пристроїв — сонячних інверторів, електромобільних зарядних станцій, гібридних фільтрів тощо. Така децентралізована модель управління

якістю дозволяє оперативно й ефективно реагувати на змінні навантаження та відхилення параметрів.

Отже, актуальність теми забезпечення якості електроенергії зумовлена як технічними, так і економічними факторами. Підвищення якості електропостачання сприяє не лише зменшенню ризиків і витрат, але й підвищенню загальної енергоефективності підприємства, а також відповідності сучасним стандартам сталого розвитку. У цьому контексті дана стаття має на меті здійснити комплексний огляд підходів, методів і засобів контролю, аналізу та покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств, з урахуванням як класичних технічних рішень, так і новітніх інтелектуальних технологій.

1. Показники якості електроенергії. До основних показників якості електроенергії, що нормуються міжнародними та національними стандартами (зокрема ІЕС 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) [1-6], належать: відхилення частоти мережі; відхилення напруги від номінального значення (довготривалі перенапруги або недонапруги); флікери (повільні коливання напруги, що сприймаються зором як мерехтіння освітлення); короткочасні провали та підвищення напруги; несинусоїдальність напруги (гармонічні викривлення); несиметрія напруги у трифазній системі; короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди.

Відхилення частоти мережі (Δf_{net}):

$$\Delta f_{net} = f_{meas} - f_{nom}, \quad (1)$$

де f_{meas} – виміряна фактична частота (Hz), f_{nom} – номінальна частота (зазвичай 50 або 60 Гц). Частотні відхилення можуть свідчити про дисбаланс між генерацією і споживанням у системі.

Відхилення напруги (довготривалі перенапруги або недонапруги) ΔU_{rel} :

$$\Delta U_{rel} = \left(\frac{U_{meas} - U_{nom}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

де U_{meas} – виміряне середнє значення напруги, U_{nom} – номінальне значення (230 В для фази або 400 В для лінії). Перевищення $\pm 10\%$ може вважатися відхиленням за межами норми.

Флікери P_{lt} (освітлювальне мерехтіння):

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{st}^{(i)})^2}, \quad (3)$$

де $P_{st}^{(i)}$ – короткочасний флікер, виміряний протягом i -го 10-хвилинного інтервалу, N – кількість таких інтервалів (зазвичай 12 за годину).

Значення $P_{lt} > 1.0$ вважається надмірним і викликає дискомфорт зорового сприйняття.

Короткочасні провали та підвищення напруги $D_{voltage}$:

$$D_{voltage} = \left(\frac{U_{nom} - U_{min}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (4)$$

де U_{min} — мінімальне значення напруги під час події. Короткочасний провал триває від 10 мс до 1 хв і може викликати збій електронного обладнання.

Гармонічні викривлення (Total Harmonic Distortion) THD_U :

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \times 100\%, \quad (5)$$

де U_1 — амплітуда основної (1-ї) гармоніки, U_n — амплітуди n-ї гармоніки, N — загальна кількість врахованих гармонік (зазвичай до 50). Високий THD спричиняє перегрів двигунів, хибну роботу перетворювачів та релейного захисту.

Несиметрія напруги (Voltage Unbalance Factor) VUF :

$$VUF = \frac{U_{negative}}{U_{positive}} \times 100\%, \quad (6)$$

де $U_{negative}$ та $U_{positive}$ — амплітуди відповідно негативної і позитивної послідовностей напруги в симетричному перетворенні. Несиметрія понад 2% вважається загрозовою для трифазних двигунів.

Короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди S_{imp} :

$$S_{imp} = \left(\frac{U_{peak} - U_{nom}}{U_{nom}} \right) \times 100\%, \quad (7)$$

де U_{peak} — амплітуда перенапруги. Ці події тривають мікросекунди-милісекунди, але можуть викликати вихід з ладу чутливого обладнання.

2. Моніторинг та діагностика PQ. Першочерговим кроком для покращення якості електроенергії є впровадження систем постійного моніторингу параметрів. Сучасні цифрові аналізатори якості електроенергії класу А (відповідно до ІЕС 61000-4-30) дозволяють з високою точністю вимірювати всі основні показники PQ – від частоти та напруги до показників флікеру та спектру гармонік [7]. Такі пристрої встановлюються як у вузлових точках мережі (на підстанціях), так і на найбільш відповідальних споживачах. Звіти моніторингу дозволяють виявити, які саме показники виходять за межі норми, у який час і з якою періодичністю. Для аналізу подій (провалів, імпульсів) застосовуються реєстратори швидких перехідних процесів. На

основі великого масиву даних вимірювань можливе статистичне оцінювання якості – наприклад, розрахунок показників SAIFI, SAIDI (середня частота та тривалість перерв) для надійності живлення або визначення 95-перцентилію відносного коливання напруги тощо. Енергокомпанії впроваджують автоматизовані системи обліку та моніторингу (AMI), які інтегрують функції вимірювання PQ у інтелектуальні лічильники та датчики. Таким чином, створюється основа для проактивного управління якістю: оператор мережі отримує сигнал про наближення параметра до граничного рівня і може вжити заходів (наприклад, переключити навантаження, ввімкнути компенсацію тощо) до того, як виникне аварійна ситуація або скарги споживачів.

Окрім постійного моніторингу, велика увага приділяється методам ідентифікації та класифікації PQ-подій в режимі реального часу. Це потрібно, щоб автоматично розпізнавати, який тип порушення стався (наприклад, провал чи імпульс, одиночний чи комбінований) і що його ймовірно спричинило. Сучасні алгоритми використовують трансформації сигналів (вейвлет-перетворення, S-перетворення, коротке Фур'є) для виокремлення ознак збурень, а далі застосовують класифікатори – нейронні мережі, машини опорних векторів (SVM), дерева прийняття рішень тощо [8, 9]. Наприклад, у роботі [9] представлено підхід, де спочатку виконується S-трансформування осцилограми напруги, а отримана матриця час-частота обробляється згортковою нейромережею для автоматичного розпізнавання типу порушення (саг, свел, гармоніка, комбінації) з точністю понад 98% [9]. Такі технології особливо корисні в складних умовах Smart Grid, коли одночасно можуть мати місце кілька видів PQ-відхилень. Більше того, системи визначення джерела збурень (source detection) аналізують взаємодію напруги та струму у вузлі мережі: якщо під час збурення величина струму навантаження зросла одночасно з падінням напруги, то, ймовірно, саме даний споживач спричинив просідання (наприклад, ввімкнувся двигун); якщо ж струм впав разом з напругою – причина поза даним вузлом (наприклад, зовнішнє КЗ) [10]. Такі програмні засоби наразі впроваджуються в рамках концепції “цифрового підстанційного контролера PQ”.

3. Компенсація провалів і перерв живлення. Короткочасні провали напруги є одним з найскладніших для повної компенсації типів PQ-подій, адже часто обумовлені зовнішніми аваріями. Проте існують технічні рішення, що дозволяють зменшити їхній вплив на критичних споживачів. Одним з найефективніших пристроїв є динамічний відновлювач напруги (DVR) – силовий перетворювач, який вмикається послідовно з навантаженням і в момент просадки напруги генерує додатковий різницевий сигнал, “підтягуючи” напругу на критичному обладнанні до номінального рівня [11]. DVR зазвичай містить накопичувач енергії (батарею або суперконденсатор), з якого черпається потужність під час провалу. Іншим підходом є джерела безперебійного живлення (UPS) динамічного типу: маховикові або суперконденсаторні системи, що здатні за кілька мілісекунд підключитися замість мережі і забезпечити живлення споживача протягом десятків секунд. Такі системи встановлюються на особливо чутливих споживачах (центри обробки даних, медичне обладнання, виробничі лінії з неперервним циклом). Для менш відповідальних навантажень застосовують реле

автоматичного перемикавання джерел (АТС): якщо основне джерело зникло або напруга впала нижче допустимого рівня, спрацьовує перемикач на резервну лінію чи резервний генератор. Хоч це не запобігає самому провалу, але скорочує тривалість перерви живлення. Для зниження частоти провалів, спричинених перевантаженнями при пусках двигунів, доцільно використовувати пускачі з плавним пуском або перетворювачі частоти для великих моторів – це знижує величину кидка струму i , відповідно, глибину просадки напруги. В електричних мережах промислових підприємств часто встановлюються статичні компенсатори VAR (STATCOM/SVC) із функцією підтримання напруги: вони віддають реактивну потужність у мережу під час провалу, допомагаючи підняти рівень напруги швидше [12]. Проте можливості таких пристроїв обмежені – при глибокому провалі через зовнішнє КЗ повністю відновити напругу локальними засобами важко. Тут в дію вступають швидкодіючі захисти: чим швидше відключиться аварійна ділянка, тим коротшим буде провал для решти мережі. Отже, селективна та швидка дія релейного захисту також важлива для мінімізації наслідків PQ-подій.

4. Зниження гармонічних спотворень. Для боротьби з несинусоїдальністю напруги використовують як пасивні, так і активні фільтрувальні засоби. Пасивні фільтри гармонік – це настроєні L-C контури, підключені паралельно до мережі, які створюють низький імпеданс на частоті певної гармоніки і відводять гармонійний струм у землю, не даючи йому поширюватися в мережу [13,14]. Такі фільтри часто встановлюються на промислових підприємствах з великими випрямлячами (наприклад, металургійні заводи) для 5, 7, 11 гармонік. Перевагою є відносна простота і дешевизна, але пасивні фільтри мають фіксовану компенсаційну характеристику і можуть потрапити в резонанс з мережею, якщо неправильно спроектовані. Більш досконалими є активні фільтри (APF) – силові перетворювачі (зазвичай на базі транзисторів), які підключаються паралельно до мережі і генерують в протифазі гармонічні струми, компенсуючи таким чином спотворення від нелінійних навантажень [14, 15]. Активний фільтр вимірює струм навантаження, виділяє його гармонічну складову і формує зворотний сигнал, який вводиться в мережу – в результаті сумарний струм у мережі стає близьким до синусоїди. APF може динамічно налаштовуватися під змінний спектр гармонік і одночасно компенсувати реактивну потужність. В огляді Ali et al. (2018) показано, що для ефективної роботи декількох пасивних фільтрів у мережі потрібні узгоджені алгоритми розподілу реактивної потужності між ними, аби уникнути перевантаження окремих фільтрів та забезпечити оптимальне зниження THD [15]. Активні фільтри позбавлені цих недоліків, однак є дорогими. На практиці застосовують гібридні фільтри – комбінацію пасивних і малопотужного активного фільтра, що дозволяє економити потужність електроніки. Окрім паралельних фільтрів, використовуються серійні активні фільтри [13], які включаються послідовно в лінію і згладжують гармоніки напруги, проте вони рідше застосовуються через потребу нести повний струм навантаження. В контексті гармонік перспективним є підхід “розподіленої компенсації”: наприклад, d [16] запропонували залучати інвертори

розподілених генераторів (сонячних батарей, батарей накопичення) для одночасної фільтрації гармонік у мікромережі. Цей підхід означає, що кожен джерело з інвертором може окрім основної функції виконувати роль локального активного фільтра для сусідніх нелінійних навантажень. Координація такої роботи здійснюється через спеціальні алгоритми, зокрема методи розподілу компенсаційного завдання між кількома інверторами (з урахуванням їх резерву потужності) [14]. Такий принцип узгоджується із сучасною концепцією гнучких мереж (smart inverters).

Крім фільтрів, для зменшення гармонік важливо обмежувати їх генерацію у джерелі. Нові стандарти (ІЕС 61000-3-2:2018) посилили вимоги до виробників побутової та офісної техніки щодо коефіцієнта нелінійних спотворень струму. Сучасні джерела живлення виконуються за топологією з корекцією коефіцієнта потужності (PFC), яка мінімізує вищі гармоніки. Таким чином, технологічний прогрес сприяє тому, що хоча абсолютна кількість нелінійних навантажень зростає, їх якість з точки зору гармонік підвищується. Тим не менш, у промислових установках із великими перетворювачами додаткові фільтри залишаються необхідними.

5. Компенсація реактивної потужності та флікера. Коливання напруги (флікер) та загальний рівень напруги тісно пов'язані з балансом реактивної потужності в мережі. Для покращення стабільності напруги застосовують стаціонарні батареї конденсаторів та реактори, які вмикаються/вимикаються автоматично за потреби. Однак такі ступінчасті компенсатори не здатні боротися з швидкими коливаннями (наприклад, від дугової печі, де зміни відбуваються кілька разів на секунду). В таких випадках ефективні динамічні компенсатори VAR – SVC та STATCOM. Традиційний SVC складається з тиристорних реакторів і конденсаторів, і може плавно змінювати генеровану/поглинаєму реактивну потужність протягом напівперіоду. Наприклад, на електросталеплавильних комбінатах SVC встановлюють безпосередньо на живлячих шинах печей: він відстежує миттєву реактивну потужність дуги і протидіє їй, згладжуючи коливання напруги [17,18]. Це дозволяє значно знизити флікер (на практиці – в 2-3 рази). Ще кращі показники має STATCOM на базі транзисторних інверторів: він здатен реагувати на зміни за декілька мілісекунд і генерувати реактивний струм з необхідною швидкісною характеристикою, незалежно від напруги мережі. STATCOMи успішно застосовуються для підтримки напруги у вітрових парках, компенсації флікеру від зварювальних машин, а також для швидкого гасіння несиметрії (за рахунок генерування негативної послідовності струму). В [19] автори продемонстрували, що використання керування STATCOMом на основі методів штучного інтелекту дозволяє одночасно поліпшити декілька показників PQ – зменшити і флікер, і гармоніки, і дисбаланс. Для боротьби з флікером також застосовуються електроприводи з регулюванням моменту дуги в печах, стабілізатори процесу, які згладжують коливання струму. Але основний підхід – саме мережеві компенсатори.

6. Усунення несиметрії. Як зазначалося, несиметрія виникає головним чином через однофазні навантаження. Отже, перший крок – раціональний розподіл однофазних споживачів по фазах мережі, щоб збалансувати струми. На промислових об'єктах встановлюють автостабілізатори балансу навантаження – контролери, що

автоматично перемикають частину однофазних навантажень між фазами при довготривалому дисбалансі. Для компенсації залишкової несиметрії та струмів нульової послідовності використовують рівномірно розподілені заземлення нейтралі та фільтри нульової послідовності (зазвичай це трифазні групи конденсаторів/реакторів, з'єднані у відкритий трикутник). У тягових підстанціях залізниць практикується включення балансуєчих трансформаторів або спеціальних схем (наприклад, схема Ле Блана), що перерозподіляють однофазне навантаження по трьох фазах рівномірніше [20]. В мікромережах з несиметрією можуть застосовуватися перетворювачі, які генерують потрібну негативну послідовність для її скасування (деякі сучасні ДСТАТКОМ можуть це робити). Загалом, підтримка симетрії – задача менш технологічно складна, ніж, скажімо, компенсація гармонік, і часто вирішується організаційно (правильним фазуванням).

7. Управління якістю в розподілених системах. Із розширенням мікромереж і Smart Grid виникає можливість гнучкіше керувати якістю на місцевому рівні. Наприклад, інвертори сонячних батарей можуть працювати за стратегією “Volt-VAr”, тобто при підвищенні напруги генерувати реактивну потужність (знижуючи напругу), а при зниженні – споживати (піднімаючи напругу). Це схоже на роботу STATCOM, але розподілено по багатьох малих джерелах. Таким чином, просунуті функції “розумних” інверторів дозволяють пом'якшити проблему перенапруги в денний час у мережах із великою генерацією на даху будинків. Аналогічно, масове підключення електромобілів може бути перетворене з проблеми на ресурс: зарядні станції з функцією двонаправленого живлення V2G теоретично можуть віддавати потужність у мережу при просіданні напруги або виступати як активні фільтри для гармонік. Хоча такі схеми ще в стадії досліджень, проте вони обговорюються у літературі [14]. Інший сучасний концепт – торгівля якістю електроенергії. В [21] автори запропонували “ринок гармонік” у мікромережі, де різні учасники (генератори чи споживачі з фільтрами) можуть пропонувати послуги з фільтрації гармонік за винагороду. Такий підхід стимулює економічно встановлення фільтрів там, де це потрібно, і дозволяє розподілити витрати на забезпечення PQ між усіма зацікавленими сторонами [22].

8. Управління якістю на стороні споживачів. Користувачі електроенергії, особливо промислові, теж вживають заходів для захисту свого обладнання і зниження негативного впливу на мережу. Окрім вже згаданих фільтрів і джерел безперебійного живлення, великі підприємства впроваджують системи енергетичного менеджменту, які контролюють графіки навантаження, щоб уникати раптових стрибків. Наприклад, розподіл пусків двигунів у часі (пуск не всіх одночасно, а по черзі) зменшує максимальні провали. Використання пристроїв плавного пуску (Soft Starter) істотно знижує кидки струму, хоч і подовжує розгін. Для зниження гармонік від перетворювачів частоти виробники часто інтегрують у них фільтри гармонік або активні фронт-енд модулі – це дозволяє виконати норматив IEEE 519 навіть без додаткових зовнішніх фільтрів. Якщо обладнання дуже чутливе до навіть невеликих відхилень напруги (наприклад, деякі медичні прилади, високоточні верстати з ЧПУ),

встановлюються локальні стабілізатори напруги або регулятори напруги швидкої дії на місці споживача. Вони підтримують вихідну напругу стабільною при зміні вхідної в діапазоні, скажімо, $\pm 15\%$. Хоча це не впливає на напругу у всій мережі, але захищає конкретний критичний процес від збою.

Отже, арсенал засобів контролю та покращення якості електроенергії є доволі широким. На рівні мережі оператори використовують компенсатори реактивної потужності, фільтри гармонік, регулятори напруги та резервні схеми живлення. На рівні споживачів – фільтри, пристрої захисту від провалів (UPS, DVR), засоби плавного пуску та балансування навантаження. Інтелектуальні мережі відкривають можливості розподіленого управління якістю: інтеграції функцій компенсації в самі розподілені джерела, створення локальних сервісів PQ (Quality as a Service). Важливою є і регуляторна сторона: стимули і тарифи, які заохочують споживачів не перевищувати встановлені ліміти за показниками якості. Приміром, у деяких контрактах за перевищення допустимого викиду гармонік або викликання провалу напруги можуть накладатися штрафи на споживача-“забруднювача”. Такий підхід мотивує встановлювати фільтри і компенсатори. З іншого боку, у випадку недотримання рівнів напруги постачальником, споживач може вимагати компенсацію (що передбачено правилами енергопостачання в ряді країн).

Підсумовуючи аналітичний огляд, слід відзначити, що ефективне забезпечення якості електроенергії в сучасних умовах потребує комплексного підходу: постійного моніторингу PQ-показників, швидкої діагностики причин відхилень та застосування відповідних технічних засобів корекції на різних рівнях системи. Лише поєднання заходів на боці мережі (загальні компенсатори, стандартизація параметрів) і на боці споживача (фільтрація, захист обладнання) дозволяє досягти стабільного дотримання норм якості електроенергії в умовах росту навантажень і децентралізації генерації.

Висновки. Методи контролю і підвищення якості електроенергії інтенсивно розвиваються, пропонуючи як традиційні інженерні рішення, так і інноваційні підходи. До перевірених технічних засобів належать: конденсаторні батареї та реактори для підтримання рівня напруги; статичні вар-компенсатори (SVC) та статичні синхронні компенсатори (STATCOM) для динамічної компенсації реактивної потужності та флікеру; пасивні фільтри гармонік для найбільш проблемних частот; активні фільтри на силових інверторах, здатні в режимі реального часу очищувати мережу від широкого спектру гармонік; пристрої типу DVR та джерела безперебійного живлення для захисту відповідальних споживачів від провалів напруги та коротких перерв. Паралельно розробляються системи автоматичного керування цими засобами: зокрема, використання алгоритмів на основі штучного інтелекту дозволило покращити ефективність D-STATCOM при згладжуванні коливань напруги і компенсуванні несиметрії. В літературі останніх років також запропоновано концепції розподіленої компенсації, коли функції покращення PQ вбудовано у самі генератори і навантаження (наприклад, “розумні” мережеві інвертори з функцією фільтрації гармонік та регулювання напруги. Це особливо перспективно для мікромереж і активних розподільчих систем: проаналізовані дослідження підтверджують можливість

підвищення якості напруги в мікромережі за рахунок координації роботи розподілених джерел та накопичувачів. На стороні споживачів впроваджуються програми керування навантаженням, щоб знизити пікові кидки, а також встановлюються локальні засоби захисту (стабілізатори, фільтри) відповідно до вимог до якості живлення їхнього обладнання.

Комплексне забезпечення якості електроенергії потребує співпраці між усіма учасниками енергосистеми. Енергопостачальні підприємства повинні виконувати інвестування в модернізацію мереж (для зменшення внутрішнього опору, встановлення засобів компенсації і фільтрації на підстанціях), впроваджувати системи моніторингу PQ та швидкого реагування на відхилення (автоматичне перемикання мережевих конфігурацій, адаптивне керування збудженням генераторів тощо). Споживачі, особливо промислові, зі свого боку повинні дотримуватися норм емісії гармонік і реактивної потужності – для цього великі підприємства застосовують фільтрокомпенсуючі установки і пристрої плавного пуску. Виробники електротехніки продовжують вдосконалювати пристрої з точки зору електромагнітної сумісності (наприклад, майже всі сучасні LED-драйвери мають PFC-коректори, що дозволяє суттєво знизити коефіцієнт гармонік струму). Крім технічних, дієвими є економічні та нормативні механізми: диференціація тарифів та штрафні санкції за порушення показників якості. Наприклад, введення “контрактів якості” стимулює обленерго підтримувати напругу в заданих межах (інакше передбачена компенсація споживачам), а промислових споживачів – не перевищувати встановлені гармонічні струми (в іншому разі штраф або відключення). Такий підхід наразі застосовується у ряді країн і показує ефективність у зниженні кількості скарг на якість електропостачання.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. IEC 61000-4-30:2015. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. EN 50160:2010. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks*. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, 2010.
3. IEEE Std 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2014.
4. IEC 61000-4-15:2010. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*. 2nd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010.
5. IEC 61000-4-7:2008. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation*. 2nd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008.

6. IEC 61000-4-5:2014. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. 3rd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.
7. *Revised IEC and IEEE Standards for PQ Measurements for Users of PQ Monitoring Equipment*: Available at: <https://powerquality.blog/2021/07/30/revised-iec-and-ieee-standards-for-pq-measurements-for-users-of-pq-monitoring-equipment>
8. 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>
9. 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
10. *Detecting power quality issues*. Available at: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/power-quality/a-fresh-look-at-power-quality-basics?srsltid=AfmBOopXsnzVoXx0VPThYhgXsO2Y2RwdG9tgt3YTiu4IbBhhkLiKG>
11. *Power quality*. Available at: <https://new.abb.com/low-voltage/launches/power-quality>
12. Divya Soni, Upendra singh Tomar, Narottam Dutt Upadhyay *Grid Connected Wind Energy System Power Quality Improvement Using STATCOM*. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*. Volume 3, Issue 2, September 2023, pp. 335-337. DOI: 10.48175/IJARSCT-13050
13. V. Kuznetsov, M. Tryputen, Y. Kuznetsova, M. Babyak, V. Artemchuk and M. Kovzel, "Ways to Improve Power Quality under the Conditions of Industrial Enterprises," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240801.
14. 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>
15. Ali, Z.M.; Alenezi, F.Q.; Kandil, S.S.; Abdel Aleem, S.H. *Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems*. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2018, 103, 660–675.
16. Augusto Matheus dos Santos Alonso, Danilo Iglesias Brandao, Tommaso Caldognetto, Fernando Pinhabel Marafão, Paolo Mattavelli, *A selective harmonic compensation and power control approach exploiting distributed electronic converters in microgrids*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 115, 2020, 105452, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105452>.
17. M.E. Hamedani Golshan, Haidar Samet, *Updating stochastic model coefficients for prediction of arc furnace reactive power*, *Electric Power Systems Research*, Volume 79, Issue 7, 2009, Pages 1114-1120, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2009.02.001>.
18. Haidar Samet, Aslan Mojallal, Teymoor Ghanbari, Mohammad Reza Farhadi *Enhancement of SVC performance in electric arc furnace for flicker suppression using a Gray-ANN based prediction method* *Int Trans Electr Energ Syst.* 2019; 29:e2811. pp.1-20. <https://doi.org/10.1002/etep.2811>

19. Chen, J.-H., Tan, K., & Lee, Y. (2022). *Intelligent controlled DSTATCOM for power quality enhancement*. *Energies*, 15(11), 4017. <https://doi.org/10.3390/en15114017>
20. 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>
21. Marini, A., Ghazizadeh, M. S., Mortazavi, S. S., & Piegari, L. (2019). *A harmonic power market framework for compensation management of DER based active power filters in microgrids*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113, 916–931. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.017>
22. 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.

Received 26.03.2025.
Accepted 28.03.2025.

Monitoring and enhancement of power quality in industrial power networks

The aim of this research is a comprehensive analysis of power quality (PQ) issues in industrial power networks, as well as the development and systematization of methods for monitoring, diagnosing, and improving key PQ parameters, such as harmonic distortions, flicker, voltage sags, phase unbalance, and reactive power.

The methods. The study employs a combination of theoretical analysis, review of relevant standards (IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519), and practical experience in the implementation of modern digital PQ analyzers. The use of filters, compensators, and intelligent systems is analyzed, including DVR, STATCOM, hybrid active filters, and machine learning algorithms for classifying PQ events.

Findings. The research outlines the main PQ indicators and presents methods for their measurement, diagnosis, and compensation. Examples of implemented technical solutions for improving power quality are provided, including passive and active harmonic filters, SVC and STATCOM for flicker mitigation, methods for reducing phase unbalance, and protection against short-term voltage disturbances.

The originality. The study proposes a concept of distributed power quality compensation using smart inverters and charging stations. The application of neural networks and S-transforms for real-time identification of disturbance sources is discussed. The advantages of integrated approaches to both local and centralized PQ correction are substantiated.

Practical implementation. The results can be used by energy management engineers and enterprise personnel to build monitoring systems, protect critical equipment, and enhance energy efficiency. The proposed solutions reduce failure rates, energy losses, and maintenance costs, ensuring compliance with modern sustainable development standards.

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

Стьопкін Василь Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5727-8343>

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

Ровенський Олег Олександрович – студент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <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. <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>

Піліпенко В'ячеслав Олександрович – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

Прихно Валерія Леонідівна – старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>

Stopkin Vasyl - Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine.

Radchenko Vitalij - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Rovenskyi Oleh - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Yerofieieva Alina - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Pilipenko Viacheslav - Playtika Holding Corp, Dnipro, Ukraine.

Prykhno Valeriia - Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.