

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.13

УДК 621.316.925

І. І. Коваленко, В. В. Радченко, О. І. Осаул, А. А. Єрофєєва,
В. О. Піліпенко, В. Л. Прихно

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Абстракт. Метою роботи є всебічний аналіз показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств України, з урахуванням статистичних даних до 2022 року та змін, спричинених повномасштабною війною. Особливу увагу приділено електропостачанню в галузях металургії, хімічної промисловості та машинобудування, де фіксуються найбільші відхилення параметрів PQ.

Методика. Робота базується на порівняльному аналізі результатів вимірювань якості електроенергії на українських промислових підприємствах. Залучено статистику до 2022 року, дані моніторингу в період війни 2022–2023 рр., а також стандарти ДСТУ EN 50160:2014, IEEE 519 та вимоги ENTSO-E. Проведено аналіз основних причин відхилення PQ: гармоніки, флікер, несиметрія, реактивна потужність.

Результати. Виявлено, що до війни найбільші порушення PQ спостерігались у зварювальних і ливарних цехах металургії (THD_U до 12%, несиметрія до 3,6%), на хімічних підприємствах – перевищення гармонік 6–16 порядку, а в машинобудуванні – локальні проблеми з реактивною потужністю. Під час війни основні проблеми змістилися до глибоких провалів напруги, нестабільності частоти при генераторному живленні та зниження $\cos\phi$. Частина промисловості була зупинена, що тимчасово знизило рівень гармонік.

Наукова новизна полягає у вперше проведеному комплексному узагальненні впливу війни на параметри PQ в українській промисловості. В роботі наведено дані по THD , флікеру та несиметрії в умовах кризових режимів.

Практичне значення дослідження полягає в обґрунтуванні потреби у впровадженні сучасних засобів покращення якості електроенергії – активних фільтрів, компенсаторів, систем моніторингу PQ.

Ключові слова: якість електроенергії, промислові мережі, гармоніки, флікер, несиметрія, реактивна потужність, воєнний вплив, металургія

© Коваленко Інна, Радченко Віталій, Осаул Олександр, Єрофєєва Аліна, Піліпенко В'ячеслав, Прихно Валерія

Вступ

Як відомо [1-5], якість електроенергії (Power Quality, PQ) – це сукупність параметрів електричної енергії, що визначають її придатність для споживачів. Для промислових підприємств належний рівень PQ критично важливий, адже від нього залежить надійність роботи обладнання, економічні показники та безпечність технологічних процесів. Згідно з українським стандартом ДСТУ EN 50160:2014, напруга має відхилятися не більше $\pm 10\%$ від номіналу, частота – в межах 50 Гц $\pm 1\%$ (для синхронної роботи з енергосистемою) [1], а довготривалий показник флікера (мерехтіння) має бути $\leq 1,0$ протягом 95% часу спостереження [1]. У ЄС та США діють подібні вимоги (наприклад, IEEE 519 вимагає $\leq 5\%$ гармонічних спотворень напруги на середній напрузі) [2,6,7]. Невідповідність цим нормам може призвести до відмов обладнання, браку продукції та фінансових втрат. Для прикладу, 1 хвилина перерви електропостачання у хімічній промисловості коштує приблизно 135 тис. дол., а в харчовій – близько 2,5 тис. дол. втрат [3].

На якість електроенергії впливають як постачальники (генерація, мережі), так і самі промислові споживачі. Основні параметри PQ включають: напругу (рівень, провали, перенапруги), частоту, гармоніки (спотворення форми сигналу), флікер (мерехтіння, викликане коливаннями напруги) та коефіцієнт потужності/реактивну потужність. Промислові установки часто створюють нелінійні та несиметричні навантаження, що генерують гармонічні струми, споживають значну реактивну потужність і викликають коливання напруги. Наприклад, електродугові печі (ЕДП) є одним з найпотужніших джерел перешкод – вони створюють різкі коливання споживання, які призводять до флікер-ефекту та вищих гармонік [8]. Так само, великі перетворювачі частоти та випрямлячі (тягові приводи, зварювальні випрямлячі тощо) спотворюють синусоїду напруги гармоніками [9,10], а масове застосування електронних систем (ІТ-обладнання, світлодіодне освітлення) призводить до накопичення гармонічних струмів у мережі [12]. Напруга може провалюватися при пусках великих двигунів або коротких замиканнях, частота відхилятися при дизель-генераторному живленні ізолюваних вузлів, флікер проявляється як мерехтіння освітлення через коливання напруги від навантажень типу ЕДП чи

зварювальних апаратів, а низький коефіцієнт потужності (значна споживана реактивна потужність) спричиняє перевантаження мережі і додаткові втрати.

Мета роботи полягає у всебічному аналізі статистичних показників якості електроенергії (Power Quality, PQ) у промислових електричних мережах України та зарубіжних країн, з акцентом на галузі металургії, хімічної, харчової промисловості та машинобудування. Основну увагу приділено українському контексту, із врахуванням специфіки впливу воєнних дій 2022–2023 років на енергетичну інфраструктуру та якість електропостачання.

1. Кількісна оцінка показників якості електроенергії в цехових мережах промислових підприємств до 2022 р. В останні роки українська промисловість поступово запроваджувала європейські стандарти PQ. З 2018 р. нормативні вимоги ДСТУ EN 50160 охоплюють мережі загального призначення [1], а низка досліджень фіксує ситуацію на підприємствах. Проте історично проблема PQ часто недооцінювалась – «українські підприємства борються за виживання і бракує коштів на покращення PQ; належних регуляцій PQ донедавна не було» [11]. Багато заводів експлуатують застаріле обладнання (електропечі, двигуни, трансформатори), коефіцієнт потужності нерідко $<0,9$, а компенсатори реактиву встановлені не всюди. Це призводило до відхилень параметрів якості вже в нормальних умовах.

Металургія (електросталеплавильні та прокатні виробництва). Найбільші відхилення PQ спостерігалися в електромережах підприємств чорної металургії – через потужні дугові печі, прокатні стани та зварювальне обладнання. Так, обстеження ПАТ «Запорізький завод феросплавів» (умовно, ОАО «ЗТЗ» – велике металургійне підприємство в Запоріжжі) виявило значне перевищення гармонічних спотворень напруги у зварювальному й ливарному цехах [12]. У зварювальному цеху ЗТЗ встановлені випрямлячі з мостовою схемою, що генерують вищі гармоніки і збільшують коефіцієнт несинусоїдальності напруги [12]. Виміряні коефіцієнти гармонік (THD_U) становили 8–12% (за норми $\leq 5\%$ для 6–10 кВ), максимальні провали напруги до -9% від номіналу, а коефіцієнт несиметрії (K_{2U}) сягав $3,6\%$ [12]. У ливарному цеху цього ж заводу THD_U був на рівні 7–11%, провали напруги до -7% , несиметрія $\sim 2\text{--}3,5\%$ [12]. Для порівняння, у механічному цеху ЗТЗ, де

переважають асинхронні двигуни, показники були кращими: $THD_U \sim 2-4\%$, відхилення напруги в межах $\pm 5\%$, несиметрія $\sim 1,7-1,9\%$ (в межах норми 2%) [12]. Ці дані свідчать, що саме нелінійні дугові та випрямні установки (зварювальні апарати тощо) були головними винуватцями погіршення PQ в металургії.

Інший приклад – меткомбінат «АрселорМіттал Кривий Ріг», найбільший споживач електроенергії в Україні. Він використовує переважно доменну плавку сталі, але має потужні прокатні стани та електропечі для легованого металу. У мирний час це підприємство споживало $\sim 300-400$ МВт, спричиняючи періодичні просадки напруги в мережі регіону. Публікації конкретних вимірів PQ по ньому обмежені, проте відомо, що під час війни 2022 р. комбінат суттєво знизив виробництво – споживання електроенергії металургією України у 2022 році впало на $\sim 52\%$ [13]. Це, з одного боку, зменшило навантаження на мережу (і відповідно рівень гармонік та флікеру), але з іншого – призвело до нерівномірних режимів через відключення агрегатів та пошкодження мереж. На щастя, показник частоти в об’єднаній енергосистемі вдалося втримати в межах $\pm 1\%$ завдяки синхронній роботі з європейською ENTSO-E з березня 2022 р. [1], хоча в ізолюваних острівних режимах (як-от при роботі від резервних генераторів) стандарт дозволяє відхилення аж до $\pm 15\%$ ($42,5-57,5$ Гц) [1].

Хімічна промисловість. Підприємства хімічної галузі (виробництво добрив, нафтопереробка тощо) зазвичай мають менше нелінійних електропечей, але використовують потужні двигуни, компресори і випрямлячі для електролізу. На прикладі Кременчуцького НПЗ («Укртатнафта») можна простежити якість напруги в різних цехах переробки нафти [12]. Цех крекінгу важких нафтопродуктів живиться від підстанції 6 кВ і має значну концентрацію нелінійних навантажень. Осцилографування напруги показало наявність спектру парних гармонік $6, 8, 10...$ до 16 -ї, деякі з яких перевищили допустимі рівні (напр., 6 -та гармоніка до $0,91\%$ проти норми $0,5\%$) [12]. Втім, сумарний коефіцієнт THD_U не перевищив $3,6\%$, що вписується в норму $\leq 5\%$ [12]. Напруга на виході трималася в межах $\pm 1\%$, несиметрія $\sim 0,5-1,2\%$ (в межах стандарту) [12]. Для відділення ректифікації (очистки фракцій) ситуація схожа: $THD_U \sim 2,3-4,3\%$, гармоніки практично відсутні (домінує 1 -а гармоніка),

відхилення напруги $\sim -1,2...+1\%$, $K_{2U} \sim 1-1,5\%$ [12]. У цеху фільтрації взагалі навантаження переважно лінійні – $THD_U \sim 0,1-0,3\%$, гармоніки $\leq 0,02\%$, напруга $\pm 1\%$, несиметрія $0,2-1,8\%$ [12]. Таким чином, хімічні підприємства за нормальної роботи можуть забезпечувати досить якісну електроенергію (невеликі гармонічні спотворення, стабільна напруга), якщо не використовують потужних нелінійних установок. Однак війна різко змінила ситуацію: значна частина хімічних заводів зупинилася або була пошкоджена. Зокрема, Кременчуцький НПЗ зазнав ракетних ударів і з березня 2022 р. не працює, що усунуло локальні проблеми PQ, але створило дефіцит пального та зміни режимів у мережі.

Машинобудування. Заводи машинобудування та металообробки (важкі пресово-кувальні цехи, виробництво обладнання) також можуть спричиняти проблеми PQ, хоча зазвичай у меншому масштабі, ніж металургія. Приклад – підприємство «Завод монтажних виробів», м. Дніпро, яке досліджували фахівці НМетАУ [12]. У його цеху механічної обробки виявлено високий рівень гармонік через використання великого індукційного нагрівального обладнання: $THD_U \approx 7,4-9,4\%$, що перевищує норму [12]. Водночас напруга там була досить стабільною (коливання всього $\pm 0,5\%$) за рахунок жорсткої підстанції, а несиметрія – $\sim 1-1,5\%$. У допоміжних цехах цього ж заводу показники кращі: напр., ремонтний цех – $THD_U \sim 0,9-2,9\%$, напруга $\pm 1\%$, $K_{2U} \sim 0,3-1,7\%$; інструментальний цех – $THD_U \sim 1,8-3,8\%$, напруга $\pm 1,2\%$, $K_{2U} \sim 1-2\%$ [12]. Це демонструє, що гармонічні спотворення в машинобудуванні суттєво залежать від наявності частотних перетворювачів, електропечей чи індукційних установок. Більшість же навантажень (двигуни, резистивні печі) є лінійними або близькими до таких, тож загальний рівень THD часто вкладається у $3-5\%$. У наведеному прикладі підприємство мало розбаланс споживання реактивної потужності: на деяких ділянках генерувався надлишковий реактив (внаслідок компенсації або холостого ходу трансформаторів), на інших – споживався. За даними дослідження [12], у мережах $0,4-10$ кВ машинобудівних заводів нерідко спостерігається чергування ділянок з генеруванням та споживанням реактивної потужності, що ускладнює підтримання єдиного рівня коефіцієнта потужності по

підприємству. Зведені дані вимірювань PQ на деяких українських підприємствах до 2022 року наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Показники якості електроенергії на вибраних промислових підприємствах
України (до 2022 р.) [12]

Регіон (Україна)	Галузь (підприємство/цех)	Показники PQ (виміряні значення)
1	2	3
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, зварювальний цех)	Напруга –5...+5% (просадки до –9% при навантаженні); THD_U > 8–12% (вище норми 5%); флікер помітний; несиметрія 1,5–3,6% (перевищення 2%) Причина: випрямлячі дугових зварювальних апаратів
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, ливарний цех)	Напруга –7...+5%; THD_U > 7–11% (вище норми); несиметрія 2,0–3,5% Джерела: індукційні печі, гальванічні ванни (випрямлячі) в цеху
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, мех. цех)	Напруга –5...+4%; THD_U > 2–4% (норма виконана); несиметрія ~1,8% (в нормі) Навантаження: переважно асинхронні двигуни.
Центральна Кременчук	Україна, Нафтопереробка (НПЗ, установка крекінгу)	Напруга –1...+1%; THD_U > ~3,6% (≤5% норми); несиметрія ~0,5–1,2% Вищі парні гармоніки 6–16 присутні.
Центральна Кременчук	Україна, Нафтопереробка (НПЗ, відділення ректифікації)	Напруга –1,2...+1%; THD_U > 2,3–4,3% (норма виконана); несиметрія 1– 1,5%.

Продовження таблиці 1

1	2	3
Центральна Україна, Кременчук	Нафтопереробка (НПЗ, цех фільтрації)	Напруга $-1...+1\%$; THD_U $> 0,1-0,3\%$ (дуже низький); гармоніки незначні ($\leq 0,02\%$); несиметрія $0,2-1,8\%$.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, механічний цех)	Напруга $-0,5...+0,5\%$; THD_U $> 7,4-9,4\%$ (високий рівень); несиметрія $\sim 1-1,5\%$ Причина: індукційні нагрівальні пристрої.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, ремонтний цех)	Напруга $-1...+1\%$; THD_U $> 0,9-2,9\%$ (помірний); несиметрія $0,3-1,7\%$.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, інструментальний цех)	Напруга $-1,2...+1\%$; THD_U $> 1,8-3,8\%$; несиметрія $1-2\%$.

2. Вплив війни (2022–2023 рр.) на PQ в Україні. Повномасштабна війна різко погіршила ситуацію з електропостачанням. Російські обстріли з осені 2022 р. призвели до масових відключень споживачів і аварійних режимів. За оцінками, загальне споживання електроенергії в Україні впало щонайменше на 50% [14]. Значна частина генерації була зупинена або знищена (ТЕС, ТЕЦ, підстанції) [14]. Для промисловості це означало часті та тривалі перерви електропостачання, роботу від резервних дизель-генераторів і сильні коливання напруги при перепідключеннях. Найбільше постраждали енергоємні галузі – металургійні заводи Донбасу й Придніпров’я (деякі окуповані або зруйновані), хімзаводи (Азот, нафто переробка) та машинобудівні гіганти на прифронтових територіях.

Під час екстрених відключень взимку 2022–23 рр. напруга в мережах часто знижувалася нижче норми через перевантаження уцілілих ліній. Повідомлялося про випадки роботи обладнання на пониженій напрузі (наприклад, $\sim 180-190$ В замість 220 В у низьковольтних мережах під час дефіциту генерації). Частота ОЕС України, на щастя, залишалася близькою до

50 Гц завдяки аварійному експорту/імпорту з ЄС та автоматичі відключень – відхилення не перевищували $\pm 0,2$ Гц (0,4%) навіть у кризові моменти, що відповідає вимогам ENTSO-E. Флікер-ефект в системному масштабі проявлявся як миготіння світла в будівлях при перемиканні схем живлення; його кількісні оцінки відсутні, але суб’єктивно комфорт споживачів погіршувався.

На окремих підприємствах, що працювали під обстрілами або на генераторах, показники PQ могли істотно відхилятися. Наприклад, коли завод живиться від дизель-генератора, частота може коливатися в межах $\pm 2\%$ і більше залежно від навантаження (допустимо до $\pm 15\%$ згідно стандартів для ізольованих систем [1]). Реактивна потужність при роботі на генераторі часто не компенсується повністю, що веде до низького коефіцієнта потужності $\sim 0,7-0,8$ і додаткового падіння напруги. Фактичних публікацій з вимірами PQ на промислових об’єктах під час бойових дій практично немає (з міркувань безпеки та через зупинку багатьох виробництв). Однак можна очікувати, що гармонічні спотворення переважно зменшились (бо відключені основні генератори гармонік – дугові печі, великі приводи), натомість провали напруги та флікер почастишали через нестабільні режими. Найбільшим викликом стало забезпечення живлення критичної інфраструктури: багато заводів перепрофілювали електроспоживання або перейшли на меншу потужність, щоб працювати в умовах дефіциту енергії.

В умовах післявоєнного відновлення на Україну чекає масштабна робота з відбудови електромереж та впровадження сучасних засобів покращення PQ (динамічні компенсатори, фільтри тощо). Вже зараз міжнародні компанії (наприклад, Siemens) передають обладнання для стабілізації напруги та частоти в Україні [14]. Уряд та НКРЕКП працюють над оновленням нормативів і вимог до якості електропостачання з врахуванням досвіду війни. Таким чином, в українській промисловості питання якості електроенергії перейшло з розряду суто технічних у розряд стратегічних – адже стає електропостачання є основою економічного відновлення [1].

3. Причини відхилень PQ та їхні джерела. Типові причини погіршення якості електроенергії в промислових електромережах можна згрупувати так:

Нелінійні навантаження, що генерують гармоніки. Це, передусім, силові перетворювачі: випрямлячі, інвертори, тиристорні перетворювачі частоти. На підприємствах металургії – це електродугові та індукційні печі, великі випрямлячі для гальваніки, зварювальне обладнання. Як зазначено у дослідженні, ЕДП створює значні гармонічні струми і несиметрії [8], а випрямлячі зварювальних апаратів на феросплавному заводі збільшили THD до 12% [12]. Навіть у харчовій і машинобудівній галузях впровадження частотних приводів призводить до появи 5-ї, 7-ї та інших гармонік струму. Джерелом парних гармонік можуть бути нелінійні елементи з насиченням (трансформатори, дугові печі – вони генерують 2-гу, 4-ту, 6-ту тощо). Це призведе до наслідків: гармоніки викликають додаткові нагріви двигунів і трансформаторів, резонанси в конденсаторах, помилки електроніки.

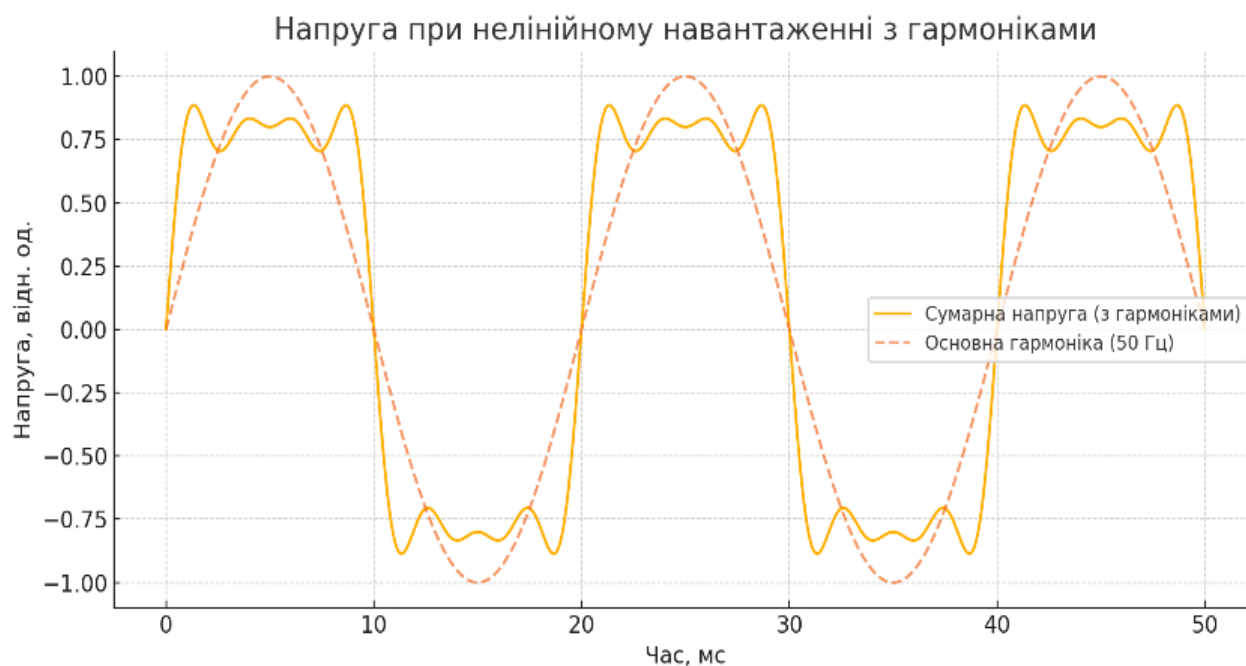


Рисунок 1 - Графік напруги при нелінійному навантаженні, що генерує гармоніки

З рис.1 видно спотворення синусоїди — результат додавання гармонік (3-ї, 5-ї, 7-ї) до основної частоти 50 Гц.

Різко змінні та імпульсні навантаження (флікер). Коливання напруги (мерехтіння) породжуються навантаженнями, що швидко змінюють споживану потужність. Класичний приклад – електродугова сталеплавильна піч: її дуга

горить нестабільно, споживаний струм хаотично коливається, спричиняючи низькочастотні коливання напруги в мережі (флікер) [8].. Флікер вимірюється показниками Pst, Plt. В мережах промислових підприємств України Pst часто перевищує одиницю без компенсації, тобто світло мерехтить помітно для ока. Інші джерела флікера – точкове зварювання (автозаводи), великі електродвигуни при пусках (особливо якщо пуск “директний”), навіть ліфти та крани на слабких живильних лініях можуть викликати миготіння [8]. Наслідки флікера: погіршення самопочуття людей, швидке старіння ламп освітлення, збої автоматики. Як відомо [8], флікер – проблема переважно металургії; в інших галузях Pst зазвичай низький.

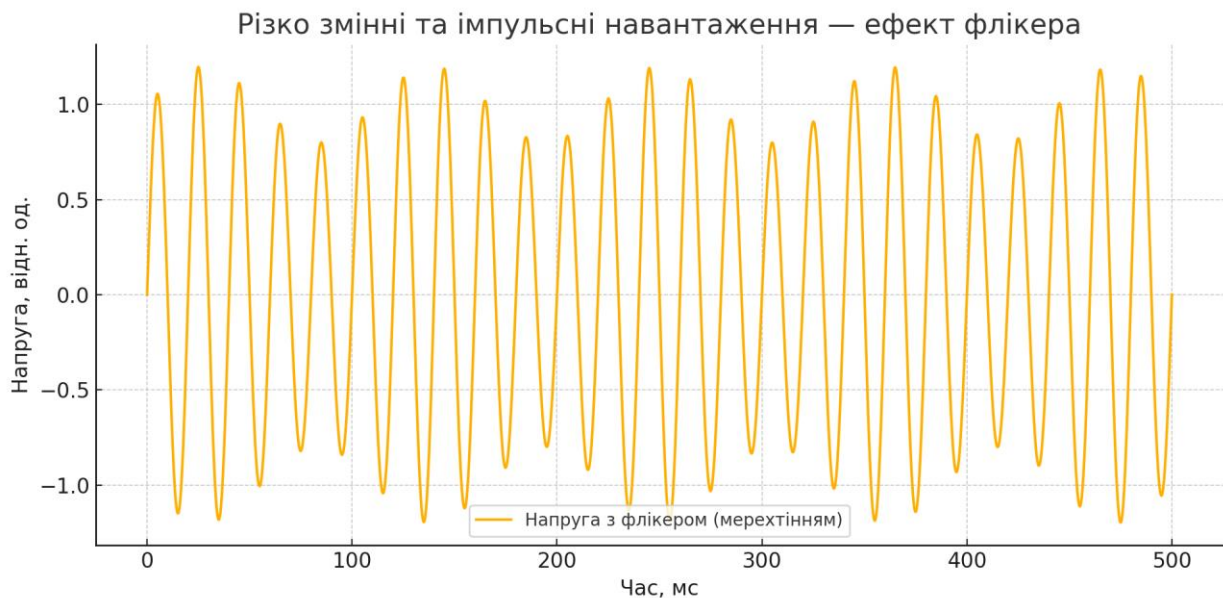


Рисунок 2 - Графік напруги з ефектом флікера — мерехтіння спричинене амплітудною модуляцією на низькій частоті (близько 9 Гц)

Надлишок або нестача реактивної потужності (низький $\cos\varphi$). Велика кількість індуктивних навантажень (двигуни, трансформатори) призводить до споживання реактивної потужності, яке якщо не компенсувати, викликає зниження напруги на шинах підприємства та перевантаження мереж. В Україні були випадки, коли ділянки підприємств генерували реактивну потужність (через перекомпенсацію), в той час як інші споживали – це створювало нерівномірний режим і “гойдало” напругу [12]. Низький $\cos\varphi \sim 0,75$ означає, що струм в 1,3 раза більший за активний – отже, більші втрати і просадка напруги

на лініях. Наприклад, на Дніпровському заводі (механічний цех) до фільтрації $\cos\varphi \approx 0,8$, після – $0,95$, і напруга піднялась з -4% до -1% [2]. Джерела реактивної потужності: асинхронні двигуни (особливо при недовантаженні), електрозварювання, печі, дуги. Наслідки: падіння напруги, нагрів проводів, штрафи від постачальника.

Несиметричні навантаження. Викривлення симетрії напруг (коеф. несиметрії K_{2U}) виникає при нерівномірному розподілі однофазних навантажень по фазах або при несправностях (обрив фази і т.д.). В таблиці 1 помітно, що на деяких укр. підприємствах K_{2U} доходив до $3\text{--}3,6\%$ [12], що перевищує норму 2% . Це було спричинено однофазними випрямлячами (наприклад, електролізні ванни у феросплавному виробництві живляться двофазно, що створює несиметрію) [12]. Наслідки несиметрії: нагрів роторів двигунів, пульсації моменту, спрацювання захистів. В розвинутих країнах великі однофазні навантаження практично не допускаються до мереж, у той час як в Україні ще зустрічалися застарілі схеми живлення, що створюють несиметрію.

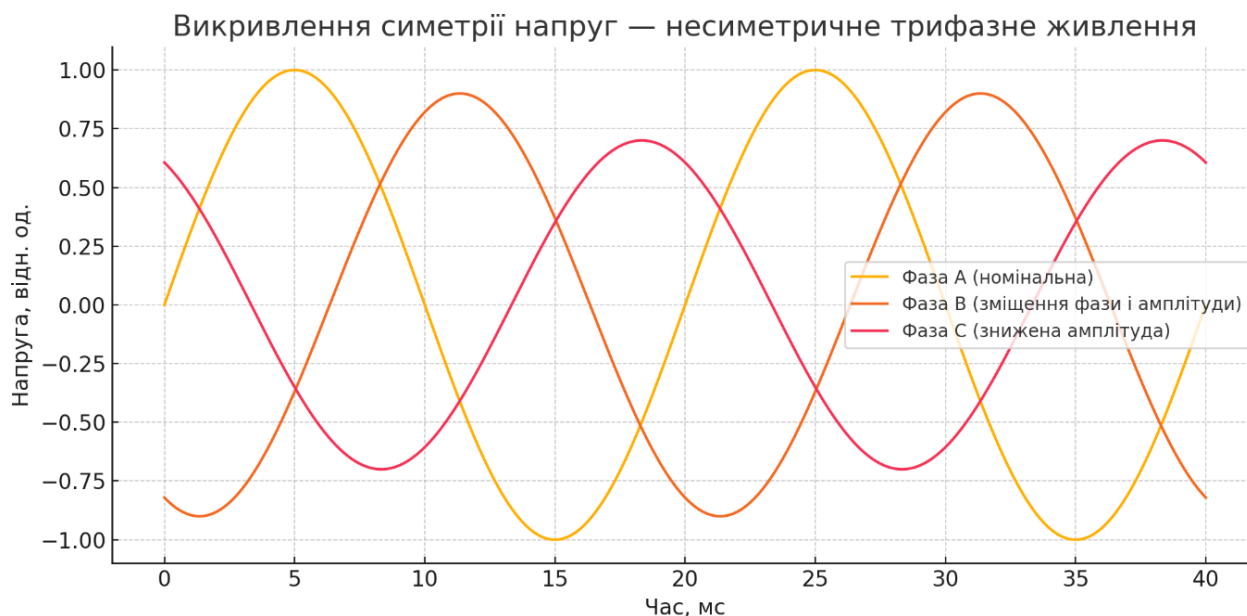


Рисунок 3 - Графік несиметричної трифазної системи напруги

Аварійні та зовнішні впливи. До них відносяться короткі замикання, грозові перенапруги, аварійні відключення ліній. Для промисловості це

неконтрольовані фактори, але вони сильно впливають на PQ. Наприклад, короткі замикання у мережі викликають глибокі провали напруги (sags) на долі секунди, які можуть зупинити чутливі верстати. У мирній Україні середньостатистичне промислове підприємство відчувало 10–20 провалів напруги на рік [1], під час війни ця цифра зросла в рази. Захиститися від цього можна лише установкою UPS або DVR (динамічний регулятор напруги).

Інший аспект – коливання частоти в об’єднаній енергосистемі при раптовому відключенні великих генеруючих потужностей. У Європі та США автоматика підтримує частоту в межах 49,5–50,5 Гц чи 59,5–60,5 Гц, тоді як, наприклад, в Індії 2018 р. були зафіксовані відхилення 48–52 Гц при розділенні мережі (blackout), що позначилося на промислових споживачах (зупинки конвеєрів тощо). Військові дії можна розглядати як екстремальний зовнішній фактор, що призвів до масових аварій – і тут український досвід унікальний для сучасного світу [1].

Підсумовуючи: в Україні до війни основними джерелами проблем PQ були застарілі технології (дугові печі, некомпенсовані двигуни, нерівномірні навантаження). Війна додала фактор зниження надійності живлення – тепер першочергово стоїть питання просто подати напругу, а вже потім – її якість. За кордоном же більшість “рутинних” причин PQ (гармоніки, реактив) локалізовані на підприємствах самими підприємствами, і на передній план виходять питання флікера та провалів напруги, які вимагають спільного вирішення з енергокомпаніями.

Висновки

1. Рівень якості електроенергії на промислових підприємствах України до війни варіювався від прийнятного (THD~2–5%, флікер мінімальний у хімічній і харчовій галузях) до вкрай незадовільного (THD>10%, Pst>>1 на окремих металургійних об’єктах). Дані вимірювань (табл.1) показали перевищення нормативів за гармоніками у зварювальних, електроплавильних підрозділах та випадки низького cosφ без компенсації. Втім, більшість таких проблем мала технічні рішення (встановлення фільтрів, компенсаторів), які часто не реалізовувались через брак фінансів чи пріоритетів

2. Війна 2022–2023 рр. драматично вплинула на PQ в Україні, зрушивши акценти з гармонік на підтримання елементарної напруги та частоти. Масштабні руйнування енергооб’єктів спричинили безпрецедентну кількість провалів напруги, перерв електропостачання, аварійних режимів. Споживання електроенергії промисловістю впало ~50%, що зменшило генерацію гармонік і флікеру (бо багато “важких” навантажень просто вимкнено), але посилило ризики провалів напруги через перенавантаження вузьких місць мережі. Фактично, якість енергії перестала відповідати стандартам у зонах бойових дій та відключень – головним стало забезпечити живлення будь-якої якості. Це підкреслює, що PQ нерозривно пов’язана з надійністю і цілісністю енергосистеми.

3. Причини відхилень PQ носять універсальний характер у світі – нелінійні та динамічні навантаження (печі, випрямлячі, двигуни) і недостатня компенсація – але їх масштаби відрізняються. Для України досі актуальні випадки, коли ціле підприємство працює з низьким $\cos\phi$ чи без фільтрів гармонік, тоді як у розвинених країнах це скоріше виняток. З іншого боку, війна поставила українську промисловість в умови, подібні до блекаутів та природних катаклізмів, з якими стикалися і інші країни.

4. Для покращення PQ на українських підприємствах у майбутньому потрібен комплексний підхід: модернізація обладнання (впровадження технологій з меншою емісією гармонік – перетворювачів з ШІМ, плавних пусків), встановлення компенсаторів реактивної потужності та активних фільтрів, розробка систем моніторингу PQ (на рівні як підприємств, так і операторів систем). Важливою є нормативна база – контроль і стимулювання якості електроенергії. НКРЕКП вже привела правила до європейських, наступний крок – забезпечити їх виконання навіть у складних умовах.

На завершення, зазначимо, що якість електропостачання – це спільна відповідальність енергетиків та промисловців. Війна показала, наскільки критичною вона є для стійкості економіки. Досвід інших країн та власні напрацювання дають змогу після відновлення впровадити сучасні рішення, аби українська промисловість отримала електроенергію належної якості, необхідну для ефективної та безпечної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Якість електричної енергії. Офіційний портал Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
2. Park, B.; Lee, J.; Yoo, H.; Jang, G. Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study in a Steel Mill Power System. *Energies* 2021, 14, 2278. <https://doi.org/10.3390/en14082278>
3. Bruna R.P. Conrado, Wesley A. de Souza, Eduardo V. Liberado, Helmo K.M. Paredes, Danilo I. Brandao, Alexandre C. Moreira, Towards technical and economic feasibility of power quality compensators, *Electric Power Systems Research*, Volume 216, 2023, 109020, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109020>.
4. Mjorning, L. ABB Drives and Control System for Hot Flat Rolling Mills Improves Yield and Quality; South East Asia iron and Steel Institute (SEAISI): Shah Alam, Malaysia, 2005.
5. Hosoda, H.; Kodama, S.; Tessenorf, R. Large PWM Inverters for Rolling Mills. *Iron Steel Technol.* 2008, 5, 65–73.
6. Emadi, A.; Nasiri, A.; Bekiarov, S.B. Uninterruptable Power Supplies and Active Filters; Illinois Institute of Technology: Chicago, IL, USA; CRC Press: Washington, DC, USA, 2005.
7. 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>
8. S. Dhivya Various model of flicker measurement methods and static var compensation for power quality improvement. *Malaya Journal of Matematik*, Vol. S, No. 2, 3392-3397, 2020 <https://doi.org/10.26637/MJMOS20/0885>
9. Patel, V.D., Rathor, S.K. (2018). Harmonic Analysis and Simulation of a Chemical Plant—A Case Study. In: Kher, R., Gondaliya, D., Bhesaniya, M., Ladid, L., Atiquzzaman, M. (eds) *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing . Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 671. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6977-2_26
10. Kachan, Y. G., Dyachenko, V. V., & Kuznetsov, V. V. (2016). *Sredstva effektivnogo ispol'zovaniya elektricheskoy energii: Monografiya* [Means of Efficient Use of Electric Energy: Monograph]. Zaporizhzhia State Engineering Academy (ZSEA), 156 p.
11. Alexander ABRAMOVITZ , Volodymyr YASKIV, Keyue SMEDLEY Power factor correction as the right step towards a safer environment. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 3a/2013
12. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text] : Monograph . M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p.
13. Металурги України у 2022 році скоротили споживання електроенергії на 52%. <https://gmcenter.ua/news/metallurgi-ukraini-u-2022-roci-skorotili-spozhyvannya-elektroenergi-na-52-r-r>
14. Ткач, Д. (2023). ЯКІ ВТРАТИ ПОНЕСЛА ЕНЕРГОСИСТЕМА УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК МАСОВИХ АТАК З БОКУ РОСІЇ. *Економіка та суспільство*, (52). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-41>
15. Siemens to donate cogeneration units to Ukraine. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-donate-cogeneration-units-ukraine>

Received 16.04.2025.

Accepted 18.05.2025.

UDC 621.316.925

Inna Kovalenko, Vitalij Radchenko, Oleksandr Osaul, Alina Yerofieieva,
Viacheslav Pilipenko, Valeriia Prykhno

ANALYSIS OF POWER QUALITY INDICATORS IN INDUSTRIAL POWER NETWORKS

Abstract. *The aim of this study is to conduct a comprehensive analysis of power quality (PQ) indicators in the electrical networks of industrial enterprises in Ukraine, taking into account statistical data up to 2022 and changes caused by the full-scale war. Special attention is given to power supply in the metallurgical, chemical, and machine-building sectors, where the largest deviations in PQ parameters are recorded.*

The methods. The study is based on a comparative analysis of power quality measurement results at Ukrainian industrial enterprises. It incorporates statistical data up to 2022, monitoring results from the wartime period of 2022–2023, as well as relevant standards such as DSTU EN 50160:2014, IEEE 519, and ENTSO-E requirements. The analysis focuses on key causes of PQ deviations: harmonics, flicker, voltage unbalance, and reactive power issues.

Findings. Prior to the war, the most significant PQ violations were observed in welding and foundry shops of metallurgical plants (THD_U up to 12%, voltage unbalance up to 3.6%), harmonic distortion of the 6th–16th orders at chemical facilities, and localized reactive power issues in machine-building enterprises. During the war, the primary challenges shifted to deep voltage sags, frequency instability under generator supply, and low power factor ($\cos\phi$). Part of the industrial sector was shut down, temporarily reducing the overall harmonic levels.

The originality lies in the first comprehensive generalization of wartime impact on PQ parameters in Ukrainian industry. The paper presents unique data on THD, flicker, and unbalance under crisis conditions.

Practical implementation of the research is in substantiating the need to implement modern tools for improving power quality — including active filters, reactive power compensators, and PQ monitoring systems.

Keywords: *power quality, industrial networks, harmonics, flicker, unbalance, reactive power, war impact, metallurgy.*

Коваленко Інна Ігорівна – викладач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: innamorkovochka@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-1526-4610>

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>

Осаул Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0007-5672-3143>

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>

Піліпенко В'ячеслав Олександрович – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. . E-mail: pilipenko992@gmail.com; <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. E-mail: valeria.prihno@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>