

**КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ У
НИЗЬКОВОЛЬТНОМУ ВУЗЛІ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА
НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ: РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВОГО МОНІТОРИНГУ**

А. Є. Райченко, аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: rarteme@gmail.com

Анотація. Метою дослідження є комплексна оцінка параметрів якості електропостачання у низьковольтному вузлі з інтегрованими фотоелектричними модулями та установкою зберігання енергії на основі довготривалого польового моніторингу. Методика реалізації передбачала аналіз часових рядів напруг, струмів, активної потужності, коефіцієнта потужності та тотальних гармонічних спотворень, зареєстрованих приладом SATEC з дискретністю 15 хв у період з вересня 2024 р. до березня 2025 р. Виконано сегментацію даних за режимами імпорту та експорту енергії, усереднення і подієву ідентифікацію інтервалів із відхиленнями від нормативів EN 50160 та IEEE 519. Результати засвідчили, що напруга залишалася в межах допустимих відхилень, тоді як близько 81 % вимірювань характеризувалися перевищенням гармонічних складових струму понад 5%. Абсолютний коефіцієнт потужності у 90% випадків становив не менше ніж 0,9, проте у близько 10 % інтервалів знижувався до 0,85–0,90 через наявність гармонічних спотворень та реактивних перетоків. Додатково виявлено високу жорсткість мережі, що пояснює стабільність параметрів напруги попри значні гармоніки струму. Висновки вказують на необхідність застосування активних або пасивних фільтрів для зниження рівня гармонік та стабілізації коефіцієнта потужності.

Ключові слова: *якість електроенергії, гармонічні спотворення, коефіцієнт потужності, жорсткість мережі, короткозамикальна здатність, низьковольтні мережі, комунально-побутові об'єкти*

Актуальність. Розвиток розподіленої генерації (фотогальванічні установки – PV) та установок зберігання енергії (ESS) в муніципальних і побутових об'єктах змінює локальні режими електропостачання. Збільшується частка перетворювальної електроніки (інвертори, перетворювачі, імпульсні джерела живлення), що підвищує ризики гармонічних спотворень і зміни потоків потужності. Оцінювання відповідності якості напруги нормативам EN 50160 [1] і контроль струмових

гармонік згідно з IEEE 519 [2] вимагають опори на польові вимірювання у реальних об'єктах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У цьому контексті показники «істинного» коефіцієнта потужності ($\cos\phi$), рівні сумарних гармонічних спотворень струму (THD-I) та динаміка експорту/імпорту активної потужності стають критичними для планування заходів із підвищення надійності і енергоефективності будівель із PV+ESS [3–5].

Для забезпечення надійності електропостачання комунально-побутових об'єктів недостатньо контролювати лише середні значення напруги. Необхідний комплексний аналіз показників якості енергії: THD-I, напругових спотворень (THD-U), «істинного» $\cos\phi$ та режимів експорту/імпорту активної потужності.

Стандарти EN 50160 [1] та IEEE 519 [2] формують нормативну рамку оцінювання якості електроенергії та розмежовують відповідальність сторін у точці загального приєднання. Класичні праці з якості електроенергії та гармонік у мережах (Bollen, Hassan; Arrillaga, Watson) окреслюють механізми впливу нелінійних навантажень і методи їхньої компенсації [4, 6].

Сучасні огляди щодо розподіленої генерації та перетворювальної електроніки (Blaabjerg та ін.) підкреслюють, що PV-інвертори й ESS можуть одночасно покращувати гнучкість системи та вносити гармонійні спотворення за відсутності належної фільтрації й керування [3, 5]. Практичні дослідження польових вимірювань на рівні будівель із PV+ESS усе ще обмежені, тому емпіричні серії даних у реальних умовах експлуатації залишаються важливим джерелом для калібрування моделей і формування прикладних рекомендацій [3–6].

Мета дослідження – на основі польових вимірювань SATEC оцінити показники якості електропостачання будівлі з PV+ESS, ідентифікувати джерела зниження «істинного» $\cos\phi$ та підвищених гармонічних спотворень струму, і вдосконалити інженерні заходи оптимізації надійності.

Завдання для досягнення поставленої мети:

– аналіз часових рядів kW, U1–U3, I1–I3, $\cos\phi$, THD-U, THD-I за період 05.09.2024–26.03.2025;

- визначення частки вимірювань із відхиленнями від критеріїв [1–2];
- порівняння показників якості між режимами експорту/імпорту;
- оцінка внеску показника THD-I у зниження $\text{true cos}\phi$ через коефіцієнт гармонічних спотворень;
- формування техніко-економічні рекомендацій (фільтри, налаштування інверторів, EMS/DSM) [3–6].

Матеріали та методи дослідження. Дані для дослідження отримано з трифазного аналізатора SATEC, встановленого в корпусі КПП ім. Ігоря Сікорського із системою PV+ESS. Моніторинг якості електропостачання охопив період з 05.09.2024 до 26.03.2025 з дискретністю 15 хв (4 вимірювання на годину). З аналізованого Excel-файлу вилучено часовий ряд активної потужності (kW), фазних напруг (U_1 – U_3), фазних струмів (I_1 – I_3), коефіцієнта потужності ($\text{cos}\phi$), а також показники тотальних гармонічних спотворень напруги (THD-U) і струму (THD-I) для кожної фази. Для забезпечення відтворюваності обробки даних виконано попереднє очищення: перевірено відсутність дублікатів записів за мітками часу (кожен інтервал має єдине вимірювання); виявлено $\sim 2,4$ % відсутніх вимірювань (пропуски в часовому ряді), що виникли переважно короткочасними паузами в реєстрації. Пропуски не заповнювалися інтерполяцією – подальші розрахунки виконано на основі наявних 97,6 % даних, оскільки втрата є незначною і не спотворює загальні результати. Мітки часу вимірювань були приведені до єдиного формату та прив'язані до реальних інтервалів 15 хв (вихідні значення мали незначні похибки у мілісекундах), що забезпечило коректну хронологію рядів.

Для подальшого аналізу виконано сегментацію часових рядів за типами показників та фазами. Коефіцієнт потужності аналізувався за модулем $|\text{cos}\phi|$, оскільки знак $\text{cos}\phi$ інформує про напрямок енергопотoku (поточний профіль навантаження/генерації): від'ємні значення $\text{cos}\phi$ вказували на експорт енергії в мережу при надлишку PV-генерації, додатні – на імпорт із мережі. З метою оцінки режимів роботи було побудовано часовий профіль активної потужності корпусу, що відображає зміну споживання та генерації протягом доби і сезону. Також для кожної фази окремо розраховано часові ряди THD струму та THD напруги; при цьому

прийнято порогові критерії: 5 % для THD струму (відповідно до рекомендованого граничного рівня гармонік струму, напр. згідно з IEEE 519 та вимогами до інверторів), та 8% для THD напруги (норматив EN50160). Отримані сегментовані дані дозволили обчислити частку вимірів, що не відповідають заданим критеріям якості (наприклад, долю інтервалів з $\cos\varphi < 0,9$ або $\text{THD} > 5 \%$), а також середні та максимальні відхилення параметрів.

Аналіз виконано в середовищі Python (Google Colab) із використанням бібліотек pandas, numpy, matplotlib та за потреби scipy. Репродуктивність забезпечена шляхом фіксації версій пакетів у ноутбучі та збереженням початкового файлу вимірювань SATEC без модифікацій. Усі часові позначки нормалізовано до локальної часової зони Europe/Kyiv.

Джерело даних – експорт із приладу SATEC (файл Excel) з часовою розгорткою у стовпці Time. Ключові змінні: U1–U3 (напруга по фазах), I1–I3 (струм по фазах), kW (активна потужність), $\cos\varphi$ (коефіцієнт потужності), THD-U1–THD-U3 (гармонічні спотворення напруги), THD-I1–THD-I3 (гармонічні спотворення струму). Аналізований період: 05.09.2024 – 26.03.2025.

Попередня обробка даних включала:

- перетворення колонки Time у тип datetime;
- видалення повних дублікатів;
- перевірку пропусків і, за потреби, інтерполяцію виключно для допоміжних візуалізацій (без впливу на обчислення нормативних показників);
- приведення назв стовпців до узгодженого формату;
- встановлення індексу за Time для подальшого усереднення.

```
import pandas as pd
df = pd.read_excel('IEE.xlsx', sheet_name='Table 1')
df['Time'] = pd.to_datetime(df['Time'])
df = df.drop_duplicates(subset=['Time'])
df = df.set_index('Time').sort_index()
```

Перед аналізом виконано контроль якості вихідних вимірювань. Встановлено, що всі 100 % зафіксованих значень фазної напруги знаходяться в межах, визначених

стандартом EN50160 [1] для мережі 230 В. Зокрема, мінімальна зареєстрована напруга становила 215 В (–6,5 % від номіналу), максимальна – 237 В (+3 %), тобто жодного випадку виходу за допустимий діапазон ± 10 % не зафіксовано. Таким чином, вибірка даних напруги є повною мірою репрезентативною і відповідає нормативним критеріям. Надійність даних струму та потужності перевірено шляхом балансу фаз і контрольних обчислень коефіцієнта потужності: в усіх записах (з урахуванням знаку активної потужності) без аномалій, що підтверджує узгодженість виміряних параметрів.

Для об'єктів із PV+ESS напрям потоку потужності змінюється, тому $\cos\phi$ може набувати від'ємних значень. У дослідженні застосовано аналіз за модулем $|\cos\phi|$ для усунення впливу знаку на оцінку ефективності. Істинний коефіцієнт потужності розкладено як добуток displacement $\cos\phi$ та distortion factor (DF) (1):

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD-I}{100}\right)^2}} \quad (1)$$

Оцінку $\cos\phi$ виконано як $PF \text{ true}/DF$ із обрізанням до $[0; 1]$.

```
import numpy as np
df['PF_abs'] = df['PF'].abs()
THD_I = (df[['I1 THD', 'I2 THD', 'I3 THD']].mean(axis=1).fillna(0))/100.0
DF = 1.0/np.sqrt(1.0 + THD_I**2)
df['cosphi_est'] = (df['PF_abs']/DF).clip(lower=0, upper=1)
```

Виконано сегментацію за режимами: імпорт/експорт енергії, робочий/вихідний день (calendar-type), година доби (0–23). Для підвищення інформативності застосовано усереднення: середньогодинні, середньодобові та середньомісячні значення, а також перцентильні профілі (напр., P95 для пікових режимів).

```
df['mode'] = np.where(df['kW']>=0, 'import', 'export')
hourly = df.resample('H').mean(numeric_only=True)
daily = df.resample('D').mean(numeric_only=True)
```

Ідентифікація подій здійснювалась за порогами:

- $|\cos\phi| < 0.9$;
- $THD-I > 5\%$;

- вихід напруги за межі 207–253 В;
- швидкі зміни напруги $\Delta U/\Delta t$ вище заданого порогу.

Для кожної події формується журнал із часовими мітками та короткою класифікацією.

```
events = []
mask_pf = df['PF_abs']<0.9
mask_ithd = (df[['I1 THD','I2 THD','I3 THD']].mean(axis=1))>5
mask_u = ~df[['U1','U2','U3']].apply(lambda s: s.between(207,253)).all(axis=1)
event_idx = df.index[mask_pf | mask_ithd | mask_u]
for t in event_idx:
    events.append({'Time':t, 'PF_lt_0.9':bool(mask_pf.get(t,False)),
                  'I_THD_gt_5':bool(mask_ithd.get(t,False)),
                  'U_out_of_band':bool(mask_u.get(t,False))})
```

Використано часові графіки для струмів (I1–I3), напруг (U1–U3) із нанесенням меж EN 50160, активної потужності (kW), $|\cos\phi|/\cos\phi$, а також гістограми THD і діаграми відповідності (% вимірів). Для огляду добових закономірностей застосовано теплові карти «година×дата».

```
import matplotlib.pyplot as plt
ax = daily[['U1','U2','U3']].plot(figsize=(12,4))
ax.axhline(207, linestyle='--'); ax.axhline(253, linestyle='--')
ax.set_ylabel('Voltage, V'); ax.set_xlabel('Date'); plt.tight_layout(); plt.show()
```

Усі кроки аналізу оформлено у вигляді послідовних комірок Colab: імпорт даних → передобробка → обчислення показників → сегментація/усереднення → подієвий аналіз → візуалізація → підсумкові метрики та може бути повторно виконаний на іншому середовищі без зміни початкового файлу, що забезпечує відтворюваність результатів.

Результати досліджень та їх обговорення. На рисунку 1 наведено часовий графік активної потужності корпусу протягом всього періоду спостережень. Видно, що режим споживання/генерації змінюється відповідно до добового циклу роботи PV+ESS: в денний час переважає генерація (від’ємні значення активної потужності,

тобто віддача енергії в мережу), а вночі – споживання з мережі (додатні значення активної потужності). Амплітуди коливаються від приблизно –6 кВт (максимум генерації сонячного дня у вересні) до 11,5 кВт (пікове споживання взимку). Сезонний вплив також помітний: восени спостерігалися суттєві перетоки генерації, тоді як взимку активна генерація зменшилася (через меншу сонячну інсоляцію), і корпус частіше споживав енергію з мережі.

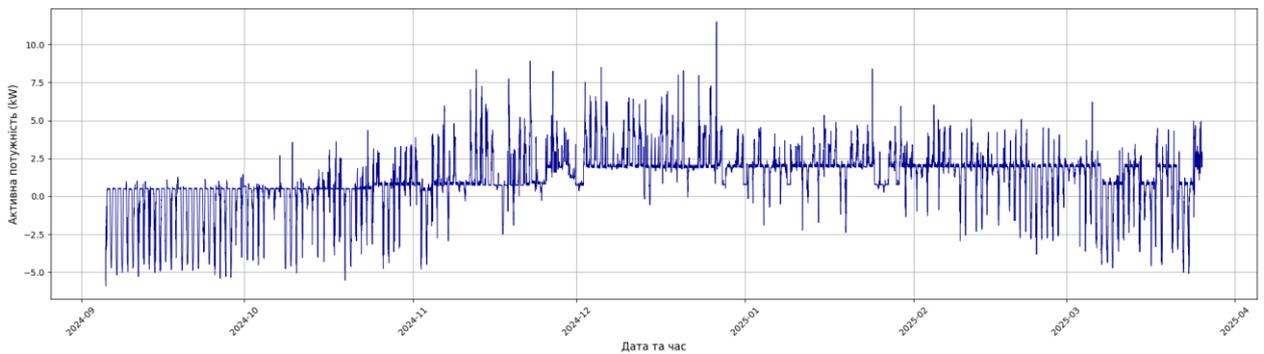


Рис. 1. Зміна активної потужності корпусу з 05.09.2024 по 26.03.2025.
Від'ємні значення відповідають віддачі енергії в мережу (надлишок PV-генерації), додатні – споживанню з мережі.

На рисунку 2 показано динаміку абсолютного коефіцієнта потужності $|\cos\varphi|$ у часі. Більшу частину часу $|\cos\varphi|$ перебуває близьким до 1, що вказує на добрий баланс активної та реактивної потужності при значних навантаженнях або генерації. Однак спостерігаються суттєві провали коефіцієнта потужності до 0 – 0,5 під час окремих інтервалів. Такі епізоди низького $\cos\varphi$ виникають переважно тоді, коли активна потужність близька до нуля (наприклад, перехідні періоди світанку/сутінків, коли PV-генерація майже дорівнює споживанню, або при малому завантаженні, коли переважають холості реактивні перетоки). За підсумком, $|\cos\varphi|$ виявився нижчим за поріг 0,9 у 9,95 % випадків (пунктирна лінія на рис. 2 позначає рівень 0,9). Це означає, що приблизно у 1 з 10 інтервалів потужність споживалася неефективно з точки зору коефіцієнта потужності. Водночас у 90 % часу мережа працювала з $|\cos\varphi| \geq 0,9$, що є прийнятним показником (у багатьох енергокомпаній мінімально допустимий $\cos\varphi$ для споживачів – 0,9 або 0,95).

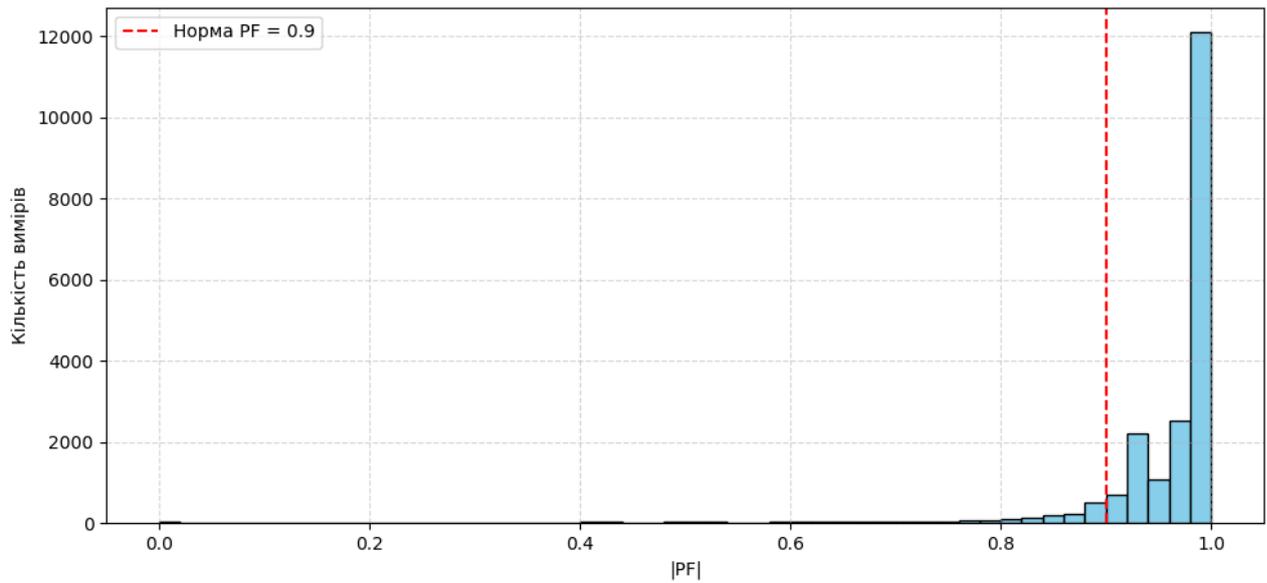


Рис. 2. Часова залежність коефіцієнта потужності $|\cos\phi|$ протягом періоду дослідження.

Пунктирною лінією показано граничне значення $|\cos\phi| = 0,9$ (зони нижче якого відповідають низькому коефіцієнту потужності)

Результати аналізу гармонічних спотворень струму. На рисунках 3, 4, 5 наведено профілі тотального гармонічного спотворення струму (THD-I) для фаз 1 (струм I1), 2 (I2) і 3 (I3) відповідно. Горизонтальною пунктирною лінією позначено рівень 5 %. Як видно з рис. 3 та рис. 5, на фазах 1 та 3 THD струму майже завжди знаходиться нижче 5 % – протягом більшості часу показник коливається в діапазоні 1–4 %. Лише поодинокі імпульсні кидки (як правило, при дуже малих струмах навантаження) спричиняли перевищення 5 % на цих фазах. Натомість фаза 2 демонструє стабільно високий рівень гармонік: рисунок 4 показує, що THD струму фази 2 майже весь час перевищує 10 %, сягаючи середньо 12–15 %. Протягом ~81,16 % вимірювань на цій фазі THD перевищував поріг 5 %. Така суттєва присутність гармонічних струмів може бути обумовлена роботою інвертора PV або іншого нелінійного навантаження, підключеного до фази 2. Незважаючи на високі гармоніки струму, слід зауважити, що в фазах 1 і 3 спотворення незначні, отже середня по системі гармонічна складова струму розподілена нерівномірно і сконцентрована у одній фазі.

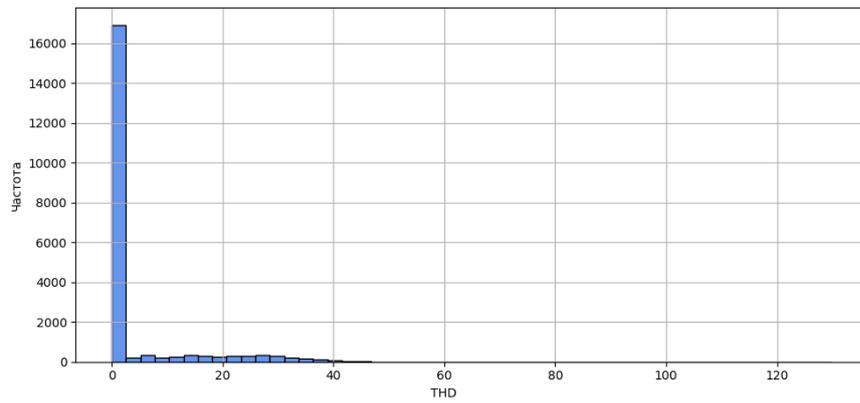


Рис. 3 Тотальні гармонічні спотворення струму, THD-I фази 1 (I1)

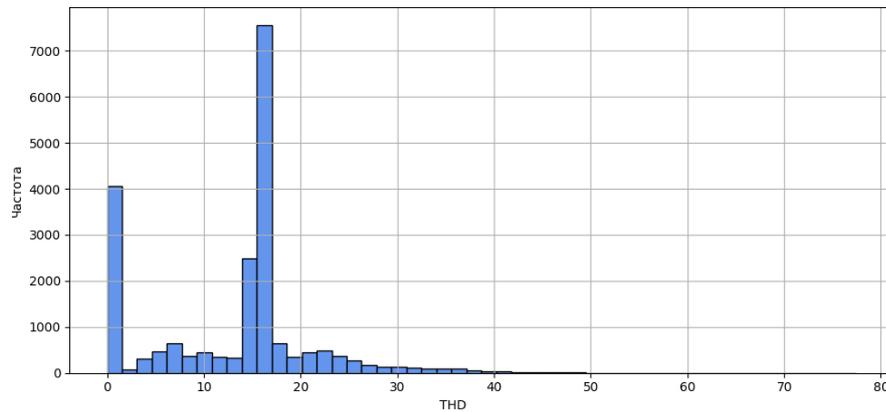


Рис. 4. Тотальні гармонічні спотворення струму, THD-I фази 2 (I2)

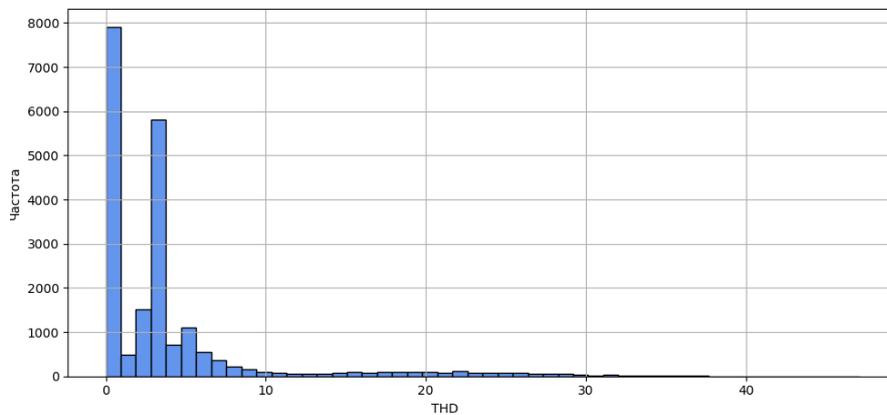


Рис. 5. Тотальні гармонічні спотворення струму, THD-I фази 3 (I3)

Результати аналізу гармонічних спотворень напруги. На рисунках 6, 7, 8 показано тотальні гармонічні спотворення напруги (THD-U) по фазах 1 (U1), 2 (U2) і 3 (U3). На відміну від струмів, рівень гармонік напруги залишається дуже низьким на всіх фазах. Максимальні значення THD-U не перевищують $\sim 1,4\%$, середні значення знаходяться в межах $0,8-1,0\%$. Таким чином, за показником THD напруги

мережа повністю відповідає вимогам EN50160, який обмежує гармонічні спотворення напруги рівнем 8 % (для основної гармоніки 50 Гц). Відсутні будь-які аномальні викиди THD-U навіть у ті моменти, коли THD-I був підвищеним – це свідчить, що вплив гармонічних струмів від PV+ESS установки на напругу в точці приєднання незначний, і параметр напруги залишається в нормативних межах як за амплітудою, так і за гармонічним складом.

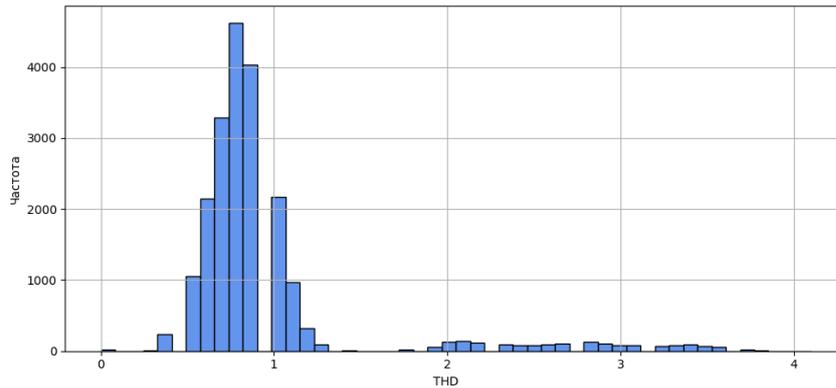


Рис. 6. Тотальні гармонічні спотворення напруги, THD-U фази 1 (U1)

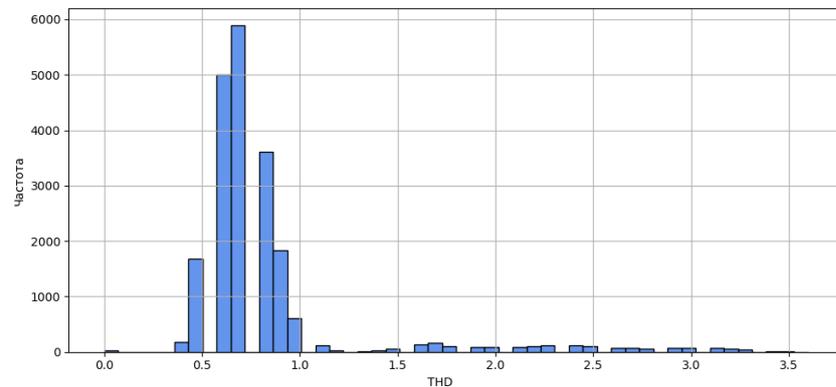


Рис. 7. Тотальні гармонічні спотворення напруги, THD-U фази 2 (U2)

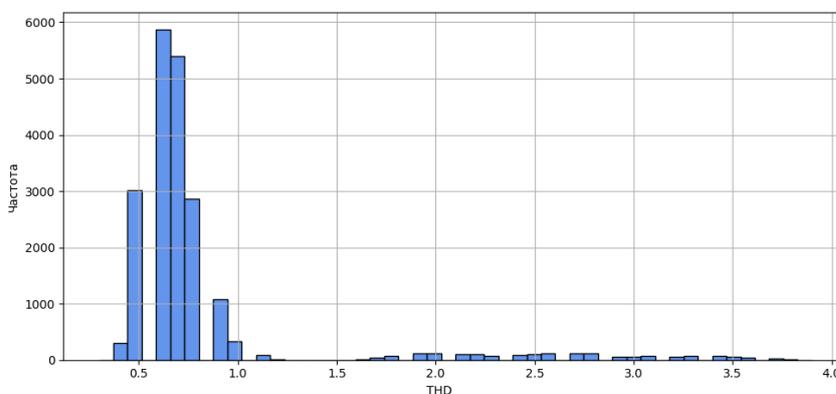


Рис. 8. Тотальні гармонічні спотворення напруги, THD-U фази 3 (U3)

Інтегральні результати вимірювань якості електроенергії узагальнені на рисунку 9. Як зазначалося, напруга повністю відповідає стандарту EN50160 (100 % вимірювань у межах допуску по рівню та гармоніках). Значна частка вимірювань струму – 81,16 % – характеризується THD-I вище 5 %, що вказує на суттєву присутність нелінійних навантажень/генераторів у системі. Водночас 18,84 % вимірювань THD-I знаходилися в межах норми (<5 %). Коефіцієнт потужності має від’ємні значення більшу частину доби (що очікувано при переважанні генерації над споживанням у денні години), проте за абсолютним значенням $|\cos\phi|$ лише у 9,95 % випадків опустився нижче 0,9. Отже, переважно (≈ 90 % часу) енергопостачання здійснювалось з високим коефіцієнтом потужності, хоча в ~ 10 % інтервалів потрібна корекція (наприклад, залучення систем компенсації реактивної потужності) для покращення цього показника. З отриманих результатів видно, що система PV+ESS не викликала порушень якості напруги, проте внесла значні гармонійні спотворення струму в одну фазу та спричинила режим низького завантаження за активною потужністю (з відповідним падінням $\cos\phi$) у частині часу. Ці аспекти слід врахувати при подальшій експлуатації та можливому балансуванні навантажень між фазами.

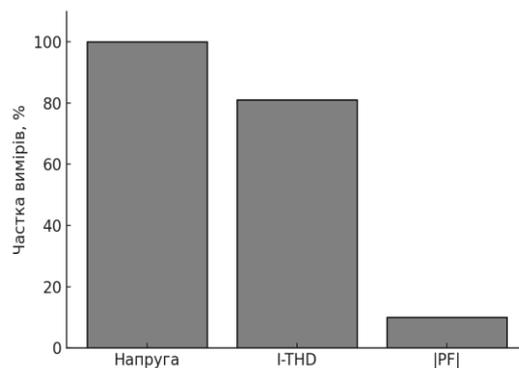


Рис. 9. Узагальнення показників якості електропостачання:
напруга відповідає EN50160 (100 % вимірювань у нормі); 81,16 % вимірювань струму мають $THD > 5$ %; 9,95 % вимірювань характеризуються коефіцієнтом потужності $|\cos\phi| < 0,9$.

Аналіз отриманих результатів демонструє, що параметри напруги живлення перебували в межах норми. Протягом усього періоду моніторингу відхилення напруги не перевищували допустимих ± 10 % від номіналу, а сумарний коефіцієнт

гармонічних спотворень напруги (THD-U) залишався нижчим за 4 %. Це повністю відповідає вимогам діючих стандартів якості електроенергії, зокрема, за EN 50160 граничне значення THD-U для мереж низької напруги становить близько 8 % [1]. Таким чином, можна стверджувати, що вплив нелінійних навантажень на напругу в точці приєднання є незначним. Відсутність суттєвих спотворень напруги навіть за наявності значних гармонік струму вказує на високий коефіцієнт потужності короткого замикання енергосистеми (жорсткість мережі). У сильній мережі протікання гармонійних струмів не призводить до виходу параметрів напруги за норми, що узгоджується зі стандартом IEEE 519, який для мереж із великим резервом пропускної здатності дозволяє відносно високий рівень спотворень струму (TDD до ~20 %) без погіршення якості напруги [2].

За результатами обробки вимірювань SATEC у вузлі приєднання корпусу оцінено внутрішній опір мережі, як медіана за тисячами локальних пар:

$$Z_{th} \approx -\frac{\Delta U}{\Delta I},$$

що відповідає потужності короткого замикання

$$SCR = \frac{S_{кз}}{S_H}$$

Коефіцієнт жорсткості SCR, як відношення оціненої потужності короткого замикання $S_{кз}$, до максимальної зафіксованої потужності об'єкта S_H , становить близько 44, що свідчить про високу жорсткість мережі та пояснює низькі спотворення напруги навіть за наявності значних гармонік струму.

Параметр	Значення
Медіанний внутрішній опір Z_{th} , Ом	0.0460
Оцінена потужність короткого замикання $S_{кз}$, кВА	1150.3
Максимальна потужність об'єкта S_H , кВА	26.17
Коефіцієнт жорсткості SCR	44.0

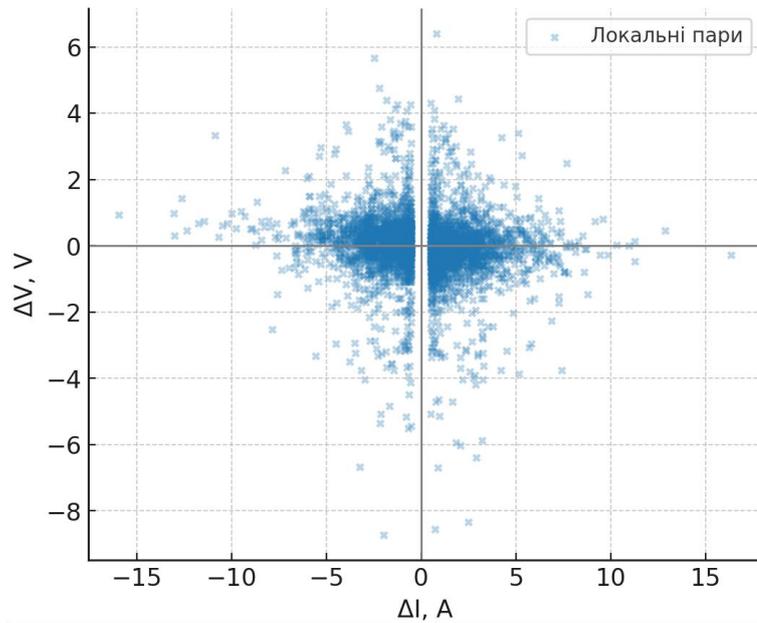


Рис. 10 Залежність зміни напруги від зміни струму (оцінка внутрішнього опору мережі)

Водночас на стороні споживача зафіксовано значну присутність нелінійних навантажень, що проявляється у високому рівні гармонічних складових струму. Зокрема, у понад 80 % інтервалів спостережень сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струму (ТНД-І) перевищував порогове значення 5 %. В окремі моменти часу ТНД-І сягав 20–30 %, а при малих навантаженнях – навіть понад 100 % на окремих фазах. Настільки високі відносні показники відповідають літературним даним: відомо, що за наявності значної кількості гармонік струму їх сумарний рівень може перевищувати 100 % від основної компоненти [3]. Втім, настільки великі відсоткові спотворення спостерігалися лише в режимах мінімального споживання, коли абсолютні величини струмів були незначними. Це важливий нюанс при інтерпретації показників якості електроенергії: високий ТНД за малих навантажень фактично не призводить до суттєвих додаткових втрат чи нагрівання, оскільки гармонійні струми малі за амплітудою. Для об'єктивної оцінки в таких випадках використовують показник TDD (Total Demand Distortion), що нормує гармоніки відносно максимального навантаження [8]. Наші результати узгоджуються з цим підходом: екстремальні значення ТНД-І фіксувалися у години низького споживання, тому їх вплив на обладнання мінімальний. Натомість у

періоди активного використання електроприймачів (вищі навантаження) рівень THD-I перебував переважно в межах 20–30 %, що все ж перевищує бажані рекомендації (<20 % при номінальному навантаженні) [8] і потребує уваги.

Переважання значних гармонік струму спричинене великою часткою сучасних нелінійних пристроїв у електромережі об'єкта. Такі пристрої, як комп'ютери та офісна техніка, імпульсні блоки живлення, LED-освітлення, перетворювачі частоти тощо, споживають струм несинусоїдальної форми (короткими імпульсами), генеруючи вищі гармоніки [9]. У результаті сумарна спотворена складова струму стає помітною відносно основної гармоніки. Відомо, що перевищення THD-I понад 5 % може мати негативні наслідки: зокрема, спричиняти додатковому нагріванню обладнання, передчасному старінню ізоляції та збою в роботі чутливих електронних пристроїв [9]. Отже, виявлений у даному дослідженні факт, що більшість вимірювань (≈ 81 %) характеризуються THD-I >5 %, свідчить про потенційну можливість деградації роботи окремих пристроїв та потребує впровадження коригувальних заходів.

Цікавим спостереженням є коефіцієнт потужності в електромережі об'єкта. У середньому значення $\cos\phi$ залишалося високим (0,95–0,98), що відповідає енергоефективності. Однак близько 10 % вимірних інтервалів показали зниження повного коефіцієнта потужності нижче 0,90. Така ситуація може бути зумовлена двома факторами: наявністю нерегульованої реактивної потужності (індуктивні навантаження без достатньої компенсації), і спотворенням форми струму внаслідок гармонік. Останній фактор знижує так званий коефіцієнт спотворення потужності. Важливо, що традиційні засоби компенсації (конденсаторні батареї) коригують лише дисперсійну (фазову) складову $\cos\phi$, але не усувають спотворення форми сигналу [8]. Тому за значної присутності гармонік навіть повна компенсація реактивної енергії не гарантує високого повного $\cos\phi$. У нашому випадку це і спостерігалось: епізоди низького $\cos\phi$ збігалися з періодами підвищеного THD-I. Для підвищення коефіцієнта потужності в таких умовах необхідно зменшувати саме гармонійну складову струму (знижувати THD-I).

Зіставлення отриманих результатів з літературними даними показує, що ситуація, зафіксована на даному об'єкті, є типовою для сучасних комерційних та адміністративних споживачів електроенергії. Так, відсутність значних спотворень напруги узгоджується з практикою: у більшості випадків електромережі здатні підтримувати якість напруги в заданих межах, навіть якщо окремі нелінійні навантаження генерують значні гармоніки (за умови достатньо малої внутрішньої імпедансії системи). Водночас рівні гармонік струму, подібні до отриманих нами (10–30 % при типовому навантаженні), широко підтверджені в дослідженнях офісних будівель та інших об'єктів з великою кількістю обладнання на напівпровідникових перетворювачах [8 - 9]. Іншими словами, виявлені показники якості електроенергії відповідають тенденціям, що спостерігаються в енергосистемах зростаючої електронізації навантажень. Це підкреслює актуальність контролю за гармонічними спотвореннями та впровадження засобів їх зниження.

Варто зазначити, що це дослідження має певні обмеження. Вимірювання проводилися на одній точці – на вводі живлення об'єкта. Це дає інтегральну оцінку параметрів якості, але ускладнює ідентифікацію внеску конкретних пристроїв або підсистем у загальні спотворення. Також використовувався інтервал усереднення ~15 хв, тому короточасні пікові відхилення могли лишитися непоміченими. Нарешті, результати дослідження справедливі для конкретного типу навантаження і умов його роботи; вони можуть відрізнятися для інших об'єктів з іншою конфігурацією споживачів або для інших сезонів та режимів енергоспоживання.

Отримані результати відкривають кілька напрямів подальших робіт. Першочергово, доцільно зосередитись на розробці та впровадженні технічних рішень для зниження рівня гармонічних спотворень. Зокрема, перспективним є застосування активних фільтрів гармонік або пасивних фільтруючих пристроїв, а також установок компенсації реактивної потужності нового покоління, що здатні покращувати коефіцієнт потужності в умовах наявності гармонік [11]. Ефективність таких заходів варто перевірити експериментально: наприклад, шляхом порівняння показників THD-I та $\cos\phi$ до і після встановлення фільтрів. Другим напрямом подальших досліджень є більш детальний аналіз джерел гармонік всередині об'єкта.

У рамках цього напрямку корисно провести вибіркові вимірювання на рівні окремих підрозділів або груп обладнання (ІТ-обладнання, система освітлення, силові перетворювачі тощо) для визначення найбільших генераторів гармонійних струмів. Це дозволило б розробити цільові рекомендації – приміром, заміну найбільш «шкідливих» з точки зору гармонік приладів на сучасні моделі з активними коректорами коефіцієнта потужності, встановлення локальних фільтрів на певних лініях живлення тощо. Також цікавою задачею є оцінка впливу зафіксованих гармонік на енергоефективність системи та стан обладнання. Як зазначалося, значні гармонійні струми можуть спричиняти додаткові втрати енергії та перегрівання елементів мережі [9]. Подальше дослідження цього впливу (наприклад, шляхом тепловізійного контролю стану кабельних ліній чи трансформаторів під час різних рівнів THD, або аналізу збільшення втрат у двигунах через несинусоїдальність напруги) матиме практичну цінність для оцінки економічного ефекту від поліпшення якості електроенергії.

Висновки і перспективи. Проведений аналіз показав, що усі виміряні значення напруги перебували в межах нормативних допусків (відхилення не перевищували ± 10 % номіналу), а рівень гармонічних спотворень напруги ($\text{THD-U} \leq 4$ %) відповідав вимогам стандартів [1], що свідчить про належну якість живлення без суттєвих відхилень. Водночас результати виявили наявність значної частки нелінійних навантажень у мережі об'єкта: у близько 81 % інтервалів було зафіксовано перевищення допустимого рівня сумарних гармонік струму ($\text{THD-I} > 5$ %), а при часткових навантаженнях цей показник сягав 20–30 %. Такі значення перевищують рекомендовані межі (наприклад, не більше ніж 20 % [8]) та створюють потенційні ризики довгострокового негативного впливу на обладнання [9]. Повний коефіцієнт потужності у більшості випадків перевищував 0,95, проте приблизно в 10 % вимірювань спостерігалось його зниження до рівня 0,85–0,90, що зумовлено поєднанням недостатньої компенсації реактивної потужності та наявності гармонічних складових у струмі. Використання традиційних засобів компенсації (конденсаторних установок) виявилось неефективним у цих умовах, адже вони не усувають впливу гармонік. Для забезпечення стабільного коефіцієнта потужності на

нормативному рівні ($\cos \varphi \geq 0,9$) доцільним є впровадження активних або пасивних фільтрів гармонік, що дозволить зменшити рівень THD-I і підвищити енергоефективність системи. Подальший моніторинг показників якості електроенергії після впровадження таких заходів є необхідним для підтвердження їхньої результативності та оцінки довгострокової ефективності оптимізації.

References

1. DSTU EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). (2023). Voltage characteristics of electricity in general purpose power supply systems. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTS", 58p.
2. IEEE Std 519-2014. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 29.
3. Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A.V. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics.
4. Bollen M.H.J., Hassan F. (2011). Integration of Distributed Generation in the Power System. Hoboken: Wiley-IEEE Press.
5. Blaabjerg F., Ma K. (2013). Future on power electronics for wind turbine systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.
6. Arrillaga J., Watson N.R. (2003). Power System Harmonics. 2nd ed. Chichester: Wiley.
7. Hioki E.E. Corporation. (2021). *Why Is It Important to Understand Total Harmonic Distortion (THD)?* URL: <https://www.hioki.com/us-en/learning/electricity/thd.html>.
8. Roderick A. (2021). *Total Harmonic Distortion (THD) and Power Factor Calculation*. EEPower – All About Circuits, 10.05.2021. URL: <https://eepower.com/technical-articles/total-harmonic-distortion-thd-and-power-factor-calculation/>.
9. Senergy. *Harmonic Distortion General Information*. (05.05.2019). URL: <https://s3energy.com/learn/harmonic-distortion-general-information/>.
10. Inan A., Ermis N., Argin M. (2003). *Measurements of Harmonics at Office Equipments in a Large Office Building* Proc. of 3rd Int. Conf. on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2003), Bursa, Turkey, 1–5. URL: https://www.emo.org.tr/ekler/969e5817467c11f_ek.pdf
11. Kovalenko I., Radchenko V., Osaul O. (2025). *Analysis of power quality indicators in industrial power networks* // Modern problems of metallurgy, 28. URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/view/2210>

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF POWER QUALITY IN A LOW-VOLTAGE NODE WITH DISTRIBUTED GENERATION AND ENERGY STORAGE: EVIDENCE FROM FIELD MONITORING

A. Raichenko

Abstract. *The objective of this study is to conduct a comprehensive assessment of power quality parameters in a low-voltage node incorporating photovoltaic modules and an energy storage system, based on long-term field monitoring. The methodology involved analyzing time series of voltages, currents, active power, power factor, and total harmonic distortion recorded with a 15-minute resolution during the period September 2024 – March 2025. Data were segmented according to import and export modes of energy flow, resampled, and subjected to event-based detection of intervals deviating from EN 50160 and IEEE 519 standards. The results demonstrated that voltage consistently remained within permissible limits, whereas approximately 81% of measurements indicated current harmonic distortion exceeding 5%. The absolute power factor was not lower than 0.9 in 90% of cases, but declined to 0.85–0.90 in nearly 10% of intervals, primarily due to harmonic distortion and reactive power exchange. Moreover, the analysis confirmed the high stiffness of the supply network, which accounts for the stability of voltage parameters despite pronounced current harmonics. The findings underline the necessity of implementing active or passive filtering measures to mitigate harmonic distortion and maintain power factor stability.*

Key words: *power quality, harmonic distortion, power factor, grid stiffness, short-circuit capability, low-voltage networks, municipal facilities*