

ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В МЕРЕЖІ 0,4 кВ

Саснко Ю.Л.*д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>, e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu;***Любарцева Ю.І.***аспірантка, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0624-1983>, e-mail: lubartseva_y_i@pstu.edu*

Сучасний розвиток енергетики характеризується активною інтеграцією фотоелектричних станцій (ФЕС), особливо малих і середніх, у розподільчі мережі низької напруги 0,4 кВ. Цей процес відповідає світовим тенденціям і сприяє підвищенню енергетичної стійкості України, зменшенню втрат електроенергії та підвищенню енергоефективності. Однак зростання частки ФЕС створює низку критичних викликів для забезпечення належного рівня показників якості електроенергії (ПЯЕ) в мережах 0,4 кВ. Аналіз літературних джерел та практичних досліджень показав, що основними проблемами, які виникають при підключенні ФЕС, є підвищення напруги та її флуктуації при змінній інсоляції, а також гармонічні спотворення. Зокрема, дослідження демонструють, що при проникненні ФЕС до 50% загальний коефіцієнт гармонік (THD) може перевищувати нормативні межі. Додатково виникають проблеми несиметрії напруги через нерівномірне підключення однофазних інверторів і реверсивні потоки потужності. Ці явища негативно впливають на надійність роботи мережі та експлуатацію електрообладнання. Для нівелювання цих технічних проблем та забезпечення надійної роботи системи рекомендовано впровадження комплексних рішень, що включають інвертори з функціями керування напругою та реактивною потужністю (смайт-інвертори), які можуть підтримувати напругу в допустимих межах. Ключовим заходом для боротьби з гармоніками є використання активних фільтрів, таких як розподільчі статичні конденсатори (DSTATCOM), інтегровані з накопичувачами енергії (BESS). Ефективними також є організаційні заходи, такі як балансування навантажень по фазах та оптимізація точок підключення джерел генерації. Впровадження цих технологій разом із модернізацією мережевого обладнання та розбудовою інтелектуальних систем управління (Smart Grid) є необхідною умовою для підвищення операційної надійності енергосистеми в умовах зростаючої децентралізації.

Ключові слова: якість електричної енергії, фотоелектричні станції, розподілена генерація, мережі 0,4 кВ, гармонічні спотворення, підвищення напруги, смайт-інвертори, активні фільтри, Smart Grid.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, серед яких важливе місце займають ФЕС. В умовах зростання попиту на екологічно чисту електроенергію їхня частка у структурі виробництва постійно збільшується. Особливо динамічно розвивається сегмент малих та середніх ФЕС, які підключаються безпосередньо до мережі низької напруги 0,4 кВ (рис. 1) [1-2].

Суттєве підвищення цін на енергоносії та перебої з електропостачанням спричинили зростання інтересу побутових споживачів до використання домашніх сонячних електростанцій для автономного або додаткового забезпечення електроенергією приватних будинків, фермерських господарств і невеликих виробничих об'єктів.

Розподілена сонячна генерація має низку переваг порівняно з централізованими сонячними електростанціями (СЕС). Такі установки можна розміщувати в різних умовах – на дахах житлових і комерційних будівель, автостоянках або сільськогосподарських угіддях. Розташування станцій безпосередньо поруч із місцями споживання електроенергії дозволяє зменшити

потребу в лініях електропередачі та скоротити втрати енергії в мережі.

Разом із позитивними аспектами – зменшенням споживання традиційних енергоресурсів, зниженням викидів парникових газів та підвищенням енергетичної незалежності – інтеграція фотоелектричних станцій у низьковольтні мережі створює низку технічних проблем. Однією з найбільш актуальних є проблема забезпечення належного рівня якості електричної енергії (ЯЕЕ), адже саме у розподільчих мережах 0,4 кВ відхилення параметрів енергії безпосередньо впливають на побутових та промислових споживачів.

Дослідження показують, що підключення ФЕС може призводити до флуктуацій та підвищення напруги, появи гармонічних складових, несиметрії фазних напруг і навіть реверсивних потоків енергії. Ці явища знижують надійність роботи мережі, погіршують умови експлуатації електрообладнання і створюють додаткові виклики для системи релейного захисту та автоматики.

Отже, актуальним завданням є аналіз впливу фотоелектричних станцій на якість електричної енергії у мережах 0,4 кВ та пошук шляхів мінімізації негативних наслідків.

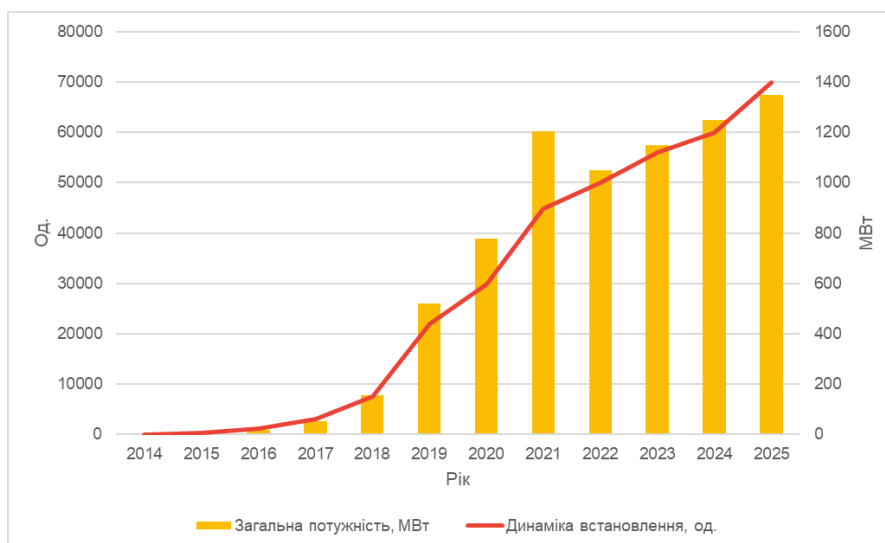


Рис. 1 – Динаміка розвитку домашніх СЕС у приватних домогосподарствах України

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поточний рівень інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичну систему України залишається недостатнім для забезпечення належної енергетичної стійкості та розглядається як ключовий напрям подальшого технологічного розвитку. Водночас наявний високий невикористаний потенціал ВДЕ, який, за оцінками, становить близько 60 ГВт для сонячної та 30 ГВт для вітрової енергетики, суттєво перевищує поточні обсяги їх впровадження [3]. Така диспропорція свідчить про значні можливості для розширення відновлюваної генерації в Україні. Разом із тим спостерігається регіональна нерівномірність розвитку, адже найбільша концентрація потужностей зосереджена у південних і степових регіонах, що створює додаткові виклики для управління транзитними потоками електроенергії, балансування навантажень і підтримання стабільності мережі у віддалених зонах. Потенціал відновлювальної енергії в Україні наведено в табл. 1.

Збільшення частки встановленої потужності ВДЕ в електричних мережах призводить до ускладнення керування та прогнозування режимів роботи таких мереж для операторів системи передачі (ОСП) та операторів систем розподілу (ОСР). Так, збільшення встановленої потужності ВДЕ в електромережах призводить до зростання похибки прогнозування, що вимагає застосування більш складних та сучасних моделей для побудови прогнозу з урахуванням більшої кількості вхідних параметрів [4], [5].

Інтеграція перебуває на етапі, що вимагає комплексних системних змін, а не лише нарощування потужностей. Фактичний ступінь інтеграції обмежений недостатнім розвитком балансувальних потужностей та

інтелектуальних систем управління (Smart Grid). Окрім проблеми недостатнього розвитку ВДЕ в Україні, що свідчить про актуальність даної теми, також активно досліджуються питання впливу інтеграції ФЕС у розподільні електричні мережі на якість електроенергії та роботу системи.

Відповідно до [3] різні типи ВДЕ по-різному впливають на технічну стабільність енергосистеми. Найбільші коливання напруги та частоти спостерігаються у разі використання сонячних (12-15% та 8-10%) і вітрових (10-14% та 7-9%) електростанцій, що зумовлено їхньою залежністю від погодних умов (табл. 2).

У статті [6] досліджено алгоритми визначення оптимального розміщення та потужності СЕС, а також аналіз змін гармонічних спотворень напруги й струму при різних рівнях проникнення СЕС у мережу. Дослідження показали, що рівень проникнення 48% від загального навантаження призводить до зростання гармонік та погіршення якості електроенергії.

У роботі [7] досліджені розподільні мережі з включенням фотоелектричних установок, розглянуті варіанти з різним рівнем встановленої потужності (від 10% до 50% від загального навантаження) та різними погодними умовами, що впливають на генерацію. В роботах аналізувалися наступні показники: рівень напруги, частота, гармонічний склад струму та напруги при раптових змінах навантаження чи генерації.

Підсумовуючи наведені дослідження, можна навести основні показники якості електричної енергії, що змінюються при збільшенні частки ФЕС (табл. 3) У роботі [8] було розглянуто зміну коефіцієнту гармонік в мережах різного класу напруги. Як бачимо, даний показник зменшується зі збільшенням класу напруги і саме в мережах 0,4 кВ є найбільш високим.

Таблиця 1

Потенціал відновлювальної енергії в Україні

Тип ВДЕ	Потенційна потужність (ГВт)	Основні регіони розташування
Сонячна енергетика	60	Південні регіони: Херсон, Миколаїв, Одеська області
Вітрова енергетика	30	Приморські та степові регіони: Запорізька, Донецька, Львівська області
Біоенергетика	25	Центральні та західні регіони: Київська, Вінницька, Черкаська області
Гідроенергетика	8	Карпати, Придніпров'я, Дністер
Геотермальна енергетика	5	Закарпаття, Карпати
Загальний потенціал	128	

Таблиця 2

Середнє значення коливання частоти і напруги у % від номінального в мережі з ВДЕ

Тип ВДЕ	Колівання напруги (%)	Колівання частоти (%)
Сонячна енергетика	12-15	8-10
Вітрова енергетика	10-14	7-9
Біоенергетика	4-6	2-4
Гібридні системи	6-8	4-6

Таблиця 3

Вплив ФЕС на показники ПКЕ

Показник	Норма (ДСТУ)	Без ФЕС	ФЕС 30%	ФЕС 50%
Напруга (відхилення)	± 5	0,8%	3,2%	6,1%
Частота (відхилення)	$\pm 0,2$ Гц	0,05 Гц	0,11 Гц	0,18 Гц
Загальний коефіцієнт гармонік (THD)	$\leq 3\%$	1,2%	2,8%	4,5%

Мета статті

Метою статті є всебічна оцінка впливу інтеграції фотоелектричних станцій на показники якості електричної енергії у розподільчих мережах напругою 0,4 кВ та обґрунтування технічних рішень, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків цього впливу.

Виклад основного матеріалу

З метою оцінки впливу інтеграції СЕС на показники якості електроенергії було проведено серію вимірювань на одній із розподільчих підстанцій Київської області. Вимірювання здійснювалися у два етапи – до та після поетапного підключення сонячної електростанції до мережі. Під час експерименту реєструвалися навантаження приєднань та основні показники якості електроенергії, зокрема коливання напруги (%), загальний коефіцієнт гармонік (THD, %), відхилення частоти (Гц). Для кожної величини наведені середні значення, 95% довірчі інтервали (табл. 4). Результати показують погіршення в усіх показниках після інтеграції СЕС.

Період спостережень склав по 168 точок (1 тиждень при 1-годинній вибірці) – «до» та «після» інтеграції. Для визначення показників ЯЕЕ був використаний

прилад аналізатор якості електроенергії типу Fluke 435-II. Інтервали осереднення – 10 хвилин. Рівень інтеграції склав 20% від встановленої потужності мережі.

Результати даних вимірювань дозволяють описати характер змін показників якості електроенергії (ПКЕ).

Середнє відхилення напруги зросло з 2,10% до 3,40% (приблизно +62% відносного зростання). Це свідчить про посилення коливань локальної напруги після інтеграції фотоелектричної генерації – ймовірно через фазову несиметрію, нерегулярну генерацію при змінній інсоляції та недостатню реактивну потужність місцевої мережі.

Загальний коефіцієнт гармонік THD: зріст з 3,2% до 4,8% (приблизно +50% відносного зростання). Додавання перетворювачів постійного струму в змінний струм (інверторні системи) можуть вносити вищі гармоніки, відсутність відповідної фільтрації місцевої підстанції THD.

Середнє абсолютне відхилення частоти зросло з 0,08 Гц до 0,12 Гц (приблизно +50% відносного зростання), що вказує на тимчасове збільшення локальних дисбалансів між генерацією та навантаженням.

Отримані результати підтверджують висновки попередніх дослідників щодо впливу ВДЕ на ПЯЕ.

Таблиця 4

Результати вимірювань

Показник	До інтеграції (n =168). Середні 95% довірчі інтервали	Після інтеграції (n =168). Середні 95% довірчі інтервали
Напруга (відхилення), %	2,10 (1,98 – 2,22)	3,40 (3,22 - 3,58)
Частота (відхилення), Гц	0,080 (0,075 - 0,085)	0,120 (0,112 - 0,128)
Загальний коефіцієнт гармонік (THD),%	3,20 (3,05 – 3,35)	4,80 (4,56 – 5,04)

Проаналізувавши дослідження, можна виділити декілька основних напрямів для мінімізації проблем, пов'язаних зі збільшенням ФЕС у розподільчих мережах 0,4 кВ:

1. Використання інверторів з функціями керування напругою та реактивною потужністю.
2. Встановлення активних фільтрів для зниження гармонік.
3. Балансування навантажень по фазах та вибір місця підключення СЕС до розподільчої мережі.
4. Модернізація мережевого обладнання (трансформатори з РПН, сучасні релейні захисти).
5. Використання систем моніторингу якості електричної енергії, побудова Smart grid.

Розглянемо кожен із них більш детально

Використання інверторів з функціями керування напругою та реактивною потужністю.

Використання інверторів із функціями керування напругою та реактивною потужністю є одним із ключових напрямів підвищення стійкості та ефективності роботи електричних мереж із розподіленою генерацією. Такі інвертори, що часто називаються «смарт-інверторами», здатні не лише перетворювати постійний струм у змінний, а й виконувати динамічне регулювання напруги в точці приєднання шляхом зміни реактивного обміну з мережею [9-10]. Застосування алгоритмів типу Volt-VAR, Volt-Watt та Q(P) забезпечує підтримання напруги в допустимих межах, зменшення втрат потужності й покращення якості електроенергії. Крім того, такі пристрої можуть працювати у режимах постійного коефіцієнта потужності або автоматичної компенсації реактивних навантажень, виконуючи функції, подібні до STATCOM. Це дозволяє реалізувати децентралізоване регулювання режимів розподільчих мереж, особливо актуальне для систем із великою часткою фотоелектричних станцій, де виникають коливання напруги через нестатистичність генерування.

Інвертори з функціями керування напругою та реактивною потужністю відіграють ключову роль у сучасних електроенергетичних системах, особливо у мережах із розподіленою генерацією на базі відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні фотоелектричні станції та вітрові установки.

Інвертор – це перетворювач постійного струму у змінний, який синхронізується з мережею. Сучасні «смарт-інвертори» не лише передають активну потужність у мережу, а й здійснюють динамічне

регулювання напруги та компенсацію реактивної потужності, забезпечуючи підтримку стабільності та якості електроенергії.

Такі інвертори працюють у четвертому квадранті діаграми потужності – тобто можуть як споживати, так і генерувати реактивну потужність залежно від умов мережі.

Функції керування напругою:

- Підтримка локальної напруги (Voltage Support). Інвертор автоматично регулює рівень напруги у точці приєднання, змінюючи співвідношення між активною (P) та реактивною (Q) потужностями.

- Функція Q(V) або Volt-VAR. Це залежність реактивної потужності від напруги. Якщо напруга зростає вище номінальної, інвертор споживає реактивну потужність (індуктивний режим), а коли падає – генерує (ємнісний режим).

- Функція P(V) або Volt-Watt. За надлишку напруги інвертор може знижувати відпуск активної потужності для запобігання перевищенню допустимих меж.

Функції керування реактивною потужністю:

- Компенсація реактивних навантажень. Інвертори можуть працювати як динамічні компенсатори (аналог STATCOM), підтримуючи заданий $\cos\phi$ або реактивний обмін з мережею.

- Режим постійного $\cos\phi$ (Power Factor Control). Інвертор утримує фіксований коефіцієнт потужності незалежно від рівня напруги.

- Режим Q(P). Реактивна потужність регулюється пропорційно активній – корисно при зміні інтенсивності сонячного випромінювання або вітру.

Переваги використання:

Підвищення стабільності напруги у слабких мережах;

Зменшення втрат потужності у лініях розподілу;

Поліпшення якості електроенергії (зниження коливань напруги, підтримка симетрії фаз);

Можливість децентралізованого регулювання без необхідності централізованих пристроїв компенсації;

Зниження ризику відключення СЕС та ВЕС при коливаннях напруги завдяки стійкішому режиму роботи.

Встановлення активних фільтрів для зниження гармонік.

Одним із перспективних методів підвищення якості електроенергії у розподільчих мережах з

інтегрованими сонячними електростанціями є використання розподільчого статичного компенсатора (DSTATCOM), оснащеного системою накопичення енергії (BESS). Такий підхід дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність, зменшувати гармонічні спотворення та стабілізувати напругу в умовах змінної генерації від СЕС. Особливо це актуально під час синхронізації або відключення СЕС від мережі, а також при різких змінах інсоляції, що викликають коливання активної та реактивної потужності.

У дослідженні [11] було реалізовано модифіковану модель IEEE-13-вузлової тестової системи з інтегрованою СЕС потужністю 500 кВт та DSTATCOM, керованим за допомогою теорії синхронної координатної системи (SRF). Контролер SRF дозволяє трансформувати струми у dq-координати, виділяти активні та реактивні компоненти, а також генерувати сигнали широтно-імпульсної модуляції (PWM) для керування інвертором DSTATCOM. Такий підхід забезпечує швидке реагування на зміни в мережі та дозволяє підтримувати рівень гармонік нижче 5%, що відповідає стандарту IEEE-519.

Результати моделювання, підтверджені в реальному часі за допомогою цифрового симулятора RTDS, показали, що запропонований метод дозволяє зменшити гармонічні спотворення до 90% та покращити стабільність напруги під час аварійних режимів роботи СЕС. Зокрема, під час відключення СЕС спостерігалось зменшення пікових коливань напруги на 41% завдяки втручанням DSTATCOM. Таким чином, інтеграція DSTATCOM з BESS є ефективним рішенням для забезпечення високої якості електроенергії в умовах зростаючого проникнення відновлюваних джерел енергії в розподільчі мережі.

Балансування навантажень по фазах та вибір місця підключення СЕС до розподільчої мережі.

Балансування однофазних інверторів за фазами є одним із ключових аспектів забезпечення стабільності та якості електроенергії у розподілених енергетичних системах. У мережах із великою часткою розподіленої генерації (РГ), зокрема фотоелектричних станцій, часто застосовуються однофазні інвертори, підключені до різних фаз трифазної мережі. Нерівномірний розподіл потужності між фазами призводить до фазного дисбалансу, що проявляється у зростанні струмів нульового провідника, появи гармонічних спотворень та підвищенні втрат у мережевому обладнанні. Це, у свою чергу, знижує ефективність енергопостачання та може негативно впливати на роботу як побутових, так і промислових споживачів.

Застосування алгоритмів побудови мереж, спрямованих на балансування однофазних інверторів між фазами, дозволяє зменшити ці негативні ефекти. Оптимальний розподіл активної та реактивної потужності між інверторами сприяє зниженню асиметрії напруг і струмів, покращенню показників якості електроенергії та підвищенню надійності роботи системи в цілому. Важливу роль при цьому відіграє правильний вибір

точки підключення інвертора до мережі. Невдало обрана точка може призвести до локального перевантаження елементів мережі, появи коливань напруги та збільшення втрат енергії. Раціональне визначення місця підключення з урахуванням конфігурації мережі, потужності джерел та характеру навантаження забезпечує ефективний розподіл генерованої енергії, мінімізує вплив РГ на мережеві режими та підвищує рівень електромагнітної сумісності.

У роботі [12] виконано моделювання та оптимізацію режимів роботи електроенергетичних систем із розосередженою генерацією з урахуванням впливу відновлюваних джерел енергії на параметри мережі. Авторі застосували імітаційне моделювання для оцінювання впливу потужності та місця розташування джерел РГ на втрати електроенергії, профілі напруги та стабільність режимів. Запропонований підхід базується на поєднанні математичної оптимізації та комп'ютерного моделювання, що дало змогу визначити ефективні стратегії інтеграції ВДЕ у розподільні електричні мережі.

Результати дослідження показали, що оптимальне розміщення джерел РГ дозволяє зменшити втрати електроенергії на 10-20% та покращити показники якості напруги, особливо в периферійних вузлах мережі. Робота підтверджує ефективність використання моделей оптимального розподілу генерації для забезпечення енергоефективності та підвищення надійності електричних мереж з великою часткою ВДЕ.

Модернізація мережевого обладнання (трансформатори з РПН, сучасні релейні захисти).

Трансформатори з РПН дозволяють регулювати напругу в мережі в режимі реального часу, що особливо важливо для забезпечення сталості напруги у розподільчих мережах із змінними навантаженнями та генерацією від ФЕС. Це дає змогу підтримувати напругу в межах нормативів, запобігаючи її перевищенню чи зниженню, що може виникати через нерівномірний розподіл генерації та споживання. Ефективне застосування РПН сприяє зниженню втрат електроенергії, а також покращенню стабільності і якості електропостачання споживачам [13-14].

Сучасні релейні захисти на основі мікроелектроніки забезпечують більш високий рівень надійності й швидкості відключення при аварійних ситуаціях у мережі [15]. Це знижує ризик поширення аварій, що важливо для захисту мереж із ФЕС, де можуть виникати нестабільності через варіації генерації. Використання комбінованих систем релейного захисту дозволяє зберігати селективність та стійкість мережі при застосуванні децентралізованих джерел генерації, зокрема сонячних [16].

Інтеграція ФЕС призводить до зміни перетоку потужності, що може викликати нестабільність напруги і збільшення гармонік у мережі. Модернізація із застосуванням РПН і сучасних захистів допомагає адаптуватися до цих змін, забезпечуючи оптимальний режим роботи мережі і покращуючи якість електроенергії.

Крім того, сучасні системи управління реактивною потужністю ФЕС разом з РПН трансформаторами дозволяють регулювати напругу більш ефективно, зменшуючи необхідність включення додаткових компенсаторів.

У роботі [17] досліджено задачу визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції до розподільної електричної мережі промислового підприємства з метою мінімізації втрат електроенергії та відхилень напруги. Для аналізу використано комп'ютерне імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink, що дало змогу порівняти режими роботи мережі за різних варіантів підключення СЕС. Результати показали, що підключення до шин низької напруги забезпечує нормативні рівні напруги, але збільшує втрати активної потужності приблизно на 42%, тоді як приєднання безпосередньо до точки навантаження зменшує втрати, проте викликає понаднормові відхилення напруги. Автори зробили висновок про доцільність підключення СЕС у точці навантаження за умов застосування заходів для нормалізації напруги, що підкреслює важливість комплексного підходу до оптимізації інтеграції відновлюваних джерел енергії в розподільні мережі.

Використання систем моніторингу якості електричної енергії, побудова Smart grid.

Робота [3] є джерелом, що розкриває технологічні та управлінські аспекти інтеграції розподілених джерел енергії (РДЕ) в національну енергосистему. Дослідження фокусується на ідентифікації критичних чинників, що визначають успішність децентралізації генерації в контексті енергетичної стійкості України.

Автори підтверджують, що впровадження розподіленої генерації є безальтернативним напрямком для підвищення стійкості, ефективності та екологічної безпеки енергосистеми. Це є методологічною основою для подальших досліджень у сфері енергетичного переходу.

Пріоритетність технологічних рішень: дослідження емпірично обґрунтовує ключову роль систем накопичення енергії (СНЕ), зокрема гібридних СНЕ, для балансування нерівномірної генерації від сонячних та вітрових електростанцій. Найбільша гнучкість, автономність та висока надійність досягається шляхом створення гібридних мікромереж – конфігурації, визнаної найбільш перспективною для України.

Кількісне обґрунтування ефективності управління: у роботі представлені вагомні кількісні показники, що підтверджують економічну та технічну доцільність запропонованих рішень:

Встановлення інверторних систем, СНЕ та гібридних мікромереж потенційно дозволяє знизити середні витрати енергії на 12-18%.

Застосування інтелектуальних систем управління сприяє скороченню пікових навантажень на електромережу на 15-20%.

Вимоги до систем управління: автори акцентують на необхідності комплексної модернізації інфраструктури через впровадження інтелектуальних систем:

- Smart Grid для забезпечення адаптивного управління.
- DERMS (Distributed Energy Resource Management System) для координації децентралізованих джерел та оптимізації процесів генерації-споживання.

Таким чином, робота [3] є базовим джерелом для аналізу технічних переваг та управлінських викликів децентралізації. Її висновки підкреслюють необхідність зміщення фокусу з простого нарощування потужностей ВДЕ на інтеграційні технології (СНЕ, мікромережі) та цифровізацію управління (Smart Grid, DERMS) для забезпечення операційної надійності національної енергосистеми.

Висновки

У ході дослідження встановлено, що активна інтеграція фотоелектричних станцій у розподільчі мережі 0,4 кВ, попри значні екологічні та енергетичні переваги, супроводжується низкою технічних проблем.

Основними з них є підвищення та флуктуації напруги, гармонічні спотворення, несиметрія фаз і реверсивні потоки потужності, що негативно впливають на показники якості електроенергії та надійності електропостачання. Аналіз існуючих підходів показав, що ефективне вирішення цих проблем можливе за рахунок комплексного впровадження смарт-інверторів із функціями регулювання напруги та реактивної потужності, застосування активних фільтрів (DSTATCOM), балансування однофазних інверторів між фазами, модернізації мережевого обладнання з використанням трансформаторів із РПН та впровадження інтелектуальних систем керування типу Smart Grid.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка математичних моделей для моделювання процесів інтеграції великої кількості ФЕС у розподільчі мережі, оптимізація місць їх підключення та алгоритмів керування реактивною потужністю. Важливим є також дослідження взаємодії систем накопичення енергії з інверторними технологіями та побудова цифрових платформ управління на основі DERMS.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання енергопостачальними компаніями для підвищення стабільності та якості електропостачання, а також розробниками обладнання – для створення інтелектуальних інверторних систем, фільтрів та пристроїв компенсації, що забезпечать безпечну та ефективну інтеграцію розподілених джерел генерації у мережі низької напруги.

Перелік використаних джерел

- [1] Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Інформаційні матеріали. URL: <https://old.sae.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy> (дата звернення: 15.05.2025).

- [2] Ігнат'єв С. За перше півріччя 2025 року енергосистема додала 1 ГВт розподіленої генерації. Український інститут майбутнього (UIF). 2025. URL: <https://uifuture.org/publications/energosityema-1-gvt/> (дата звернення: 15.05.2025).
- [3] Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid / I. Hrytsiuk et al. *Machinery & Energetics*. 2025. Vol. 16. Pp. 130-145. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.130>.
- [4] The impact of meteorological data on the accuracy of solar electricity generation forecasting using neural networks / Sayenko Y., Pawelek R., Baranenko T., Liubartsev V. *Energies*. 2025. Vol 18(9). Article 2309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092309>.
- [5] Sayenko Y., Baranenko T., Liubartsev V. Forecasting of electricity generation by solar panels using neural networks with incomplete initial data. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 07-11 September 2020. Pp. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263085>.
- [6] Sharew E. A., Kefale H. A., Werkie Y. G. Power quality and performance analysis of grid-connected solar PV system based on recent grid integration requirements. *International Journal of Photoenergy*. 2021. Vol. 16(1). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4281768>.
- [7] Причини підвищення напруги у вузлі підключення ФЕС до розподільної мережі та інверторне регулювання напруги / Гаєвський О. Ю., Гаєвська Г. М., Бодняк В. В., Коновалов М. О. *Відновлювана енергетика*. 2022. Вип. 1(68). С. 27-36. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).27-36](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).27-36).
- [8] Zhao B., Wang C., Zhang X. Grid-integrated and standalone photovoltaic distributed generation systems: Analysis, Design, and Control. 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119187349>.
- [9] Сенько В. І., Трубіщин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти : монографія. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 300 с.
- [10] Лежнюк П., Комар В., Сікорська О. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 195 с.
- [11] Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator / O. P. Mahela et al. *IET Power Electron*. 2021. Vol. 14 (5). Pp. 912-922. DOI: <https://doi.org/10.1049/pel2.12074>.
- [12] Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms / V. Kovalenko et al. *Системні технології*. 2025. Vol. 1(156). Pp. 177-189. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-20>.
- [13] Яндутьський О. С., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 184 с.
- [14] Лежнюк П., Рубаненко О., Гунько І. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. Вип. 3. С. 7-13.
- [15] Гребченко М. В., Єрьоменко Є. В. Швидкодіючий адаптивний захист від коротких замикань в електричних мережах microgrid з розподіленою генерацією. *Технічна електродинаміка*. 2021. Вип. 1. С. 57-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/tech-ned2021.01.057>.
- [16] Сабарно Л., Кошман В., Севаст'юк І. Модель універсальної адаптивної системи релейного захисту для мереж з розподіленою генерацією. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. 2019. Вип. 204. С. 32-34.
- [17] Визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції до мережі методом комп'ютерного моделювання / Плешков П., Зінзура В., Плешков С., Солдатенко В. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). С. 48-57. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.48-57](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.48-57).

POWER QUALITY ISSUES ASSOCIATED WITH THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS INTO 0,4-kV DISTRIBUTION NETWORKS

Sayenko Yu.

D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>, e-mail: sayenko_y_l@pstu.edu;

Liubartseva Yu.

postgraduate student, senior lecturer, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0624-1983>, e-mail: liubartseva_y_i@pstu.edu

The modern development of the energy sector is characterized by the active integration of photovoltaic power plants (PVPPs), particularly small and medium-sized ones, into low-voltage (0.4 kV) distribution networks. This process aligns with global trends and contributes to enhancing Ukraine's energy resilience, reducing electricity losses, and improving energy efficiency. However, the increasing share of PVPPs introduces a number of critical challenges in maintaining

adequate power quality indicators (PQI) in 0.4 kV networks. A review of the literature and practical studies has shown that the main problems arising from the connection of PVPPs include voltage rise and fluctuations caused by variable solar irradiance, as well as harmonic distortions. In particular, studies demonstrate that when PVPP penetration reaches 50%, the total harmonic distortion (THD) may exceed regulatory limits. Additional issues such as voltage unbalance, due to uneven connection of single-phase inverters, and reverse power flows also occur. These phenomena negatively affect network reliability and the performance of electrical equipment. To mitigate these technical challenges and ensure reliable system operation, the implementation of comprehensive solutions is recommended. These include inverters with voltage and reactive power control functions (smart inverters) capable of maintaining voltage within permissible limits. A key measure to address harmonic distortions is the use of active filters, such as distribution static compensators (DSTATCOM), integrated with battery energy storage systems (BESS). Organizational measures, such as phase load balancing and optimization of generation connection points, also prove effective. The deployment of these technologies, along with modernization of network equipment and the development of intelligent control systems (Smart Grid), is essential for enhancing the operational reliability of the power system under conditions of increasing decentralization.

Keywords: power quality, photovoltaic power plants, distributed generation, 0,4 kV networks, harmonic distortion, voltage rise, smart inverters, active filters, Smart Grid.

References

- [1] Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhoberezhennia Ukrainy. Informatsiini materialy. (State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. Information materials). [Online]. Available: <https://old.sae.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy>. Accessed on: May 15, 2025.
- [2] S. Ihnatiev, Za pershe pivrichchia 2025 roku enerhosystema dodala 1 HVt rozpodilenoї heneratsii. Ukrainyskyi instytut maibutnoho 2025 (In the first half of 2025, the power system added 1 GW of distributed generation. Ukrainian Institute of the Future 2025). Ukrainian Institute for the Future (UIF). [Online]. Available: <https://uifuture.org/publications/energosystema-1-gvt/>. Accessed on: May 15, 2025.
- [3] I. Hrytsiuk, V. Volynets, Y. Hrytsiuk, I. Bandura and N. Komenda, "Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid," *Machinery & Energetics*, vol. 16, pp. 130-145, 2025. doi: 10.31548/machinery/1.2025.130.
- [4] Y. Sayenko, R. Pawelek, T. Baranenko, and V. Liubartsev, "The Impact of Meteorological Data on the Accuracy of Solar Electricity Generation Forecasting Using Neural Networks," *Energies*, vol. 18(9), article 2309, 2025. doi: 10.3390/en18092309.
- [5] Y. Sayenko, T. Baranenko, and V. Liubartsev, "Forecasting of Electricity Generation by Solar Panels Using Neural Networks with Incomplete Initial Data," in *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, Sept. 07-11, 2020, pp. 140-143. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263085.
- [6] E. Sharew, H. Kefale, and Y. Werkie, "Power Quality and Performance Analysis of Grid-Connected Solar PV System Based on Recent Grid Integration Requirements," *International Journal of Photoenergy*, vol. 16(1), pp. 1-14, 2021. doi: 10.1155/2021/4281768.
- [7] O. Haievskyi, H. Haievskaya, V. Bodniak, and M. Kononov, "Prychyny pidvyshchennia napruhy u vuzli pidkluchennia FES do rozpodilnoi merezhi ta invertorne rehuliuвання napruhy" ["Reasons for voltage increase at the connection point of the PV power plant to the distribution network and inverter voltage regulation"], *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, vol. 1(68), pp. 27-36, 2022. doi: 10.36296/1819-8058.2022.1(68).27-36. (Ukr.).
- [8] B. Zhao, C. Wang, and X. Zhang, *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems: Analysis, Design, and Control*. Wiley, 2017. doi: 10.1002/9781119187349.
- [9] V.I. Senko, *Invertory i peretvoriuvachi chastoty* [Inverters and frequency converters]. Kyiv, Ukraine: Lira-K Publishing House, 2020. (Ukr.).
- [10] P. Lezhniuk, V. Komar, and O. Sikorska, *Rozoseredzhene heneruvannia v zadachakh pidvyshchennia enerhoefektyvnosti rozpodilnykh elektrychnykh merezh* [Distributed generation in tasks to improve the energy efficiency of electrical distribution networks]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2023. (Ukr.).
- [11] O. Mahela, B. Khan, H. Alhelou, S. Tanwar and S. Padmanaban, "Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator," *IET Power Electron*, vol. 14(5), pp. 912-922, 2021. doi: 10.1049/pel2.12074.
- [12] V. Kovalenko, V. Radchenko, N. Miniailo, A. Yerofieieva, V. Artemchuk, and V. Prykhno, "Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms," *Systemni tekhnolohii – System technologies*, vol. 1(156), pp. 177-189, 2025. doi: 10.34185/1562-9945-1-156-2025-20.
- [13] O.S. Yandulskyi, H.O. Trunina, and A. B. Nesterko, *Rehuliuвання napruhy v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh z vidnovliuvanyimi dzherelamy enerhii* [Voltage regulation in distribution networks with renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. (Ukr.).
- [14] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, and I. Hunko, "Vplyv soniachnykh elektrychnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV" ["The impact of solar power stations on the voltage of 0.4 kV consumers"],

Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energetics: economics, technology, ecology, vol. 3, pp. 7-13, 2015. (Ukr.)

- [15] M. V. Hrebchenko, and Ye. V. Yeromenko, “Shvydkodiiuchy adaptivnyi zakhyst vid korotkykh замыкан v elektrychnykh merezhakh microgrid z rozpodilenoju heneratsiieju” [“Fast adaptive protection against short circuits in electrical networks of microgrids with distributed generation”], *Tekhnichna elektrody-namika – Technical electrodynamics*, vol. 1, pp. 57-60, 2021. doi: 10.15407/techned2021.01.057. (Ukr.).

- [16] L. Sabarno, V. Koshman, and I. Sevastiuk, “Model universalnoi adaptivnoi systemy releinoho zakhystu dlia merezh z rozpodilenoju heneratsiieju” [“Model of a universal adaptive relay protection system for networks with distributed generation”], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva. Problemy*

enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Problems of energy supply and energy conservation in the agro-industrial complex of Ukraine, vol. 204, pp. 32-34, 2019. (Ukr.)

- [17] P. Plieshkov, V. Zinzura, S. Plieshkov, and V. Soldatenko, “Vyznachennia optymalnoi tochky pryiednannia soniachnoi elektrostantsii do merezhi metodom kompiuternoho modeliuвання” [“Determining the optimal point for connecting a solar power plant to the grid using computer modelling”], *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, vol. 8(39), pp. 48-57, 2023. doi: 10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.48-57. (Ukr.).

Стаття надійшла 05.07.2025

Стаття прийнята 08.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Саєнко Ю. Л., Любарцева Ю. І. Проблеми якості електроенергії при впровадженні фотоелектричних станцій в мережі 0,4 кВ. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 110-118. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344730>.