

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-3>

УДК 621.316.13

Д. О. Оберемок¹, аспірант

ORCID: 0009-0009-1031-5421

Д. Г. Миргород¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-5494-6227

Р. В. Оксеніч¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-6510-5108

О. Ю. Тоберт¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-9134-0518

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

¹Державний біотехнологічний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: dimaoberemok1992@gmail.com

ПРОБЛЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ

Анотація. У статті досліджуються ключові проблеми та перспективи розвитку енергетичного сектору в умовах зростання споживання електроенергії та необхідності підвищення його стійкості. Особливу увагу приділено нестабільності генерації з відновлюваних джерел, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, що зумовлює потребу у створенні резервних потужностей та впровадженні систем накопичення енергії. Розглянуто роль акумуляторних систем у балансуванні навантажень та підтриманні стабільності мережі, а також значення технологій Smart Grid для ефективного управління потоками енергії. Показано, що сонячні електростанції завдяки інверторам здатні не лише виробляти активну потужність, а й компенсувати реактивну, зменшуючи втрати та підвищуючи ефективність роботи електромереж. Зроблено висновок, що інтеграція інноваційних рішень, таких як системи накопичення, цифровізація управління та оптимізація виробництва, є важливою умовою підвищення надійності, економічності та екологічності сучасних енергетичних систем.

Ключові слова: відновлювальна енергетика, електрична мережа, відновлювані джерела енергії, сонячні панелі, акумуляторні батареї, генерація, стабільність енергосистеми, енергоефективність.

Постановка проблеми. Необхідність пошуку та створення нових джерел електричної енергії зумовлена безперервним зростанням споживання та нерівномірністю його розподілу в часі й за географічним розташуванням споживачів. Альтернативна енергетика динамічно розвивається, що сприяє поступовому збільшенню її частки на енергетичному ринку. Споживання електроенергії протягом доби, місяця чи року характеризується значними коливаннями, тоді як електростанції, що працюють на твердому паливі (ТЕС, АЕС), обмежені у можливостях оперативного регулювання своєї потужності. Часті зміни режимів їхньої роботи негативно позначаються на технічному ресурсі обладнання та підвищують його собівартість [1; 2]. Водночас виробіток електроенергії сонячними та вітровими електростанціями визначається погодними умовами і часом доби, тому не завжди збігається з реальними потребами споживачів (рис. 1).

У 2022–2024 рр. значна частина електрогенеруючого обладнання в Україні була пошкоджена або повністю зруйнована [3; 4]. Відновлення цих потужностей потребує значних фінансових ресурсів, а для захисту електричних мереж необхідні додаткові інвестиції у створення спеціальних інфраструктурних споруд. Сукупність цих чинників зумовлює зростання вартості електроенергії [5; 6]. Високий рівень зношеності традиційного енергетичного обладнання, що функціонує на твердому паливі, підвищує доцільність спрямування інвестицій у сучасні альтернативні джерела енергії. Паралельно розвиток інноваційних технологій у сфері відновлюваної енергетики та вдосконалення виробничих процесів сприяють зниженню собівартості обладнання для сонячних енергосистем. Це, своєю чергою, стимулює подальший розвиток аль-

тернативної енергетики та створює сприятливі умови для залучення інвестицій у дану галузь економіки [7; 8].



Рис. 1. СЕС та споживання енергії

Аналіз останніх досліджень. Розвиток сонячної енергетики в Україні активно підтримується державними механізмами стимулювання. За умови належного проектування сонячних електростанцій термін їх окупності зазвичай не перевищує десяти років. Важливим інструментом у цьому процесі є «зелений тариф» – економічний механізм, запроваджений у 2008 р., який передбачає гарантовану можливість реалізації електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, за пільговими тарифами протягом щонайменше десяти років [9]. Сьогодні сонячна енергетика займає провідне місце серед відновлюваних джерел електроенергії, формуючи близько 60% відповідного ринку [10; 11].

Попри стрімкий розвиток відновлюваних джерел поки що не здатні повністю замінити електростанції на твердому паливі [12; 13]. У зв'язку із цим особливої актуальності набуває запровадження систем накопичення енергії. Окрім класичних технологій, таких як гідроакумуляючі та гідроелектростанції, значного поширення набули акумуляторні системи накопичення енергії (АСНЕ, або Battery Energy Storage Systems – BESS). Їхня ключова перевага полягає у здатності здійснювати миттєві зміни вихідної потужності в діапазоні від нуля до номінального значення, що сприяє підвищенню стійкості електричних мереж у разі порушень нормальних режимів роботи. Додатково маневрові можливості таких систем забезпечують підтримання сталої частоти електричної мережі та регулювання напруги у споживачів, віддалених від основних джерел генерації [14].

Серед пріоритетних напрямів розвитку сучасної енергетики актуальним є використання сонячних панелей у поєднанні з акумуляторними системами для створення автономних енергетичних комплексів. У таких системах надлишок електроенергії, вироблений сонячними установками в періоди мінімального споживання, накопичується в акумуляторних батареях, а в години пікового навантаження – повертається в мережу, забезпечуючи її стабільність [15; 16].

Показовим прикладом є комерційні системи накопичення енергії на базі акумуляторних батарей, реалізовані компанією Tesla. Так, енергокомплекс потужністю 100 МВт та ємністю 129 МВт·год забезпечує акумуляування електроенергії з подальшою генерацією у години пікових навантажень, що сприяє підвищенню надійності роботи та зниженню навантаження на електричну мережу [2; 17].

В Україні перша промислова система накопичення енергії була введена в експлуатацію у 2021 р. в місті Енергодар. Її потужність становила 1 МВт, а ємність – 2,25 МВт·год. Уже в 2025 р. планується встановлення систем сумарною потужністю 200 МВт [3; 18]. Очікується, що такі комплекси відіграватимуть ключову роль у балансуванні національної енергосистеми та забезпеченні електропостачання критично важливих споживачів (рис. 2).



Рис. 2. Система зберігання енергії

В енергетичних мережах розрізняють два основні типи потужності: активну та реактивну. Активна потужність безпосередньо виконує корисну роботу, тоді як реактивна необхідна для створення та підтримання електричних і магнітних полів у різних пристроях. Надлишок реактивної потужності може призводити до зниження ефективності роботи енергетичних систем, зростання втрат та навіть пошкодження обладнання. Одним із перспективних рішень щодо її компенсації є застосування сонячних електростанцій (СЕС), які завдяки своїй конструкції та інверторним технологіям здатні не лише виробляти активну потужність, а й компенсувати реактивну.

Традиційно розподільні електричні мережі виконували функцію транспортування та розподілу електроенергії, виробленої централізовано на великих електростанціях. Проте з інтеграцією у їхню структуру відновлюваних та нетрадиційних джерел вони поступово трансформуються у локальні електроенергетичні системи (ЛЕС) [4; 19; 20]. Така трансформація зумовлює появу нових завдань, серед яких: узгодження графіків генерації та споживання з урахуванням нестабільності відновлюваних джерел; оптимізація керування потоками потужності з метою зменшення втрат та підвищення якості електроенергії; забезпечення балансової надійності в умовах комбінування централізованої та локальної генерації.

Важливою характеристикою розподіленої генерації є її децентралізований характер: вона представлена відносно невеликими за потужністю станціями, розташованими по всій енергосистемі, але переважно зосередженими в розподільних мережах [10; 21].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Аналіз сценаріїв попиту і пропозиції електричної енергії з урахуванням специфіки відновлюваних технологій.

Основна частина. Моделювання розвитку генеруючих потужностей та аналіз сценаріїв зміни попиту і пропозиції електричної енергії мають урахувати специфіку відновлюваних



технологій, зокрема вітрових та сонячних електростанцій (ВЕС і СЕС), які характеризуються складністю прогнозування виробітку. У цьому контексті особливого значення набуває забезпечення достатнього обсягу резервних потужностей, необхідних для компенсації коливань генерації [4; 22].

Серед можливих шляхів розв'язання зазначених проблем варто виокремити:

- розвиток систем накопичення енергії – акумуляторні станції здатні акумулювати надлишкову електроенергію у денні години та віддавати її до мережі у вечірні періоди підвищеного навантаження;
- модернізацію електричних мереж – розширення та оновлення інфраструктури (трансформаторного обладнання, кабельних ліній, систем автоматизованого контролю та обліку) підвищує стійкість енергосистеми до динамічних змін генерації та споживання;
- запровадження гнучких ринкових механізмів – зокрема компенсацій за вимушені обмеження виробітку або диференційованих тарифів для виробників, які готові регулювати рівень генерації;
- упровадження інтелектуальних систем управління (Smart Grid) – цифровізація енергосистем забезпечує можливість оперативного керування потоками енергії у реальному часі, що зменшує потребу у жорстких адміністративних обмеженнях.

Застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління енергетичними системами. Використання алгоритмів глибокого навчання дає змогу підтримувати баланс між генерацією та споживанням електроенергії, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню надійності роботи електричних мереж. Оптимізація функціонування енергетичної інфраструктури за допомогою ШІ забезпечує більш раціональне використання ресурсів, а також сприяє скороченню викидів парникових газів [5; 23].

Додатковою перевагою застосування інтелектуальних алгоритмів є здатність виявляти приховані закономірності та взаємозалежності у виробничих і споживчих процесах, що відкриває перспективи для подальшого підвищення енергоефективності. Штучний інтелект здатний прогнозувати майбутні обсяги генерації електроенергії та формувати рекомендації щодо її оптимального використання як на рівні національних енергосистем, так і на рівні індивідуальних відновлюваних джерел, зокрема приватних сонячних панелей [6; 24].

У сучасних електричних мережах реактивна потужність є невід'ємним складником процесів генерації та розподілу електроенергії. Вона забезпечує роботу трансформаторів, електричних двигунів, обмоток та інших пристроїв, що функціонують на основі електромагнітних полів. Традиційно для компенсації реактивної потужності застосовуються конденсаторні батареї та спеціалізовані компенсатори.

Водночас сонячні електростанції (СЕС) завдяки використанню сучасних інверторних технологій здатні виконувати додаткову функцію – компенсацію реактивної потужності. Основне призначення СЕС полягає у виробництві активної потужності за допомогою фотогальванічних панелей. Проте інвертори, інтегровані в їхню структуру, можуть не лише перетворювати постійну напругу на змінну для підключення до електричних мереж, а й здійснювати регулювання параметрів реактивної потужності.

Ця здатність досягається шляхом керування фазовим зсувом між струмом і напругою, що дає змогу інверторам генерувати або поглинати реактивну потужність залежно від умов роботи мережі. Таким чином, СЕС можуть виконувати роль не лише джерела активної енергії, а й ефективного елемента системи компенсації реактивної потужності. Це, своєю чергою, знижує навантаження на традиційні компенсаторні пристрої, такі як конденсаторні батареї чи статичні компенсатори, підвищуючи ефективність та надійність електроенергетичних систем.

Сучасні інвертори сонячних електростанцій можуть функціонувати в декількох режимах. У режимі генерації активної потужності вони забезпечують подачу електроенергії до мережі шляхом перетворення енергії, отриманої від сонячних панелей. У режимі компенсації реактивної потужності інвертори здійснюють регулювання фазового зсуву напруги та струму, що дає змогу як генерувати, так і поглинати реактивну потужність. Це є необхідним для підтримання стабільності роботи енергосистеми. Новітні моделі інверторів виконують таке регулювання в режимі реального часу, що забезпечує більш ефективну взаємодію з мережею та знижує потребу в додаткових пристроях компенсації реактивної потужності [7; 25].

Використання сонячних електростанцій для компенсації реактивної потужності має низку переваг:

- підвищення ефективності енергетичних мереж – зменшення навантаження та зниження втрат електроенергії;
- зниження потреби в додатковому обладнанні – інтеграція функції компенсації у СЕС дає змогу зменшити використання традиційних пристроїв, зокрема конденсаторних батарей та компенсаторів;
- забезпечення стабільності роботи мережі – підтримка оптимального балансу між активною та реактивною потужностями;
- економічні вигоди – скорочення витрат на обслуговування мережі та підвищення загальної економічної ефективності СЕС.

Водночас існують технічні обмеження, пов'язані з використанням сонячних електростанцій для компенсації реактивної потужності. Основним із них є нестабільність генерації, зумовлена залежністю від погодних умов, часу доби та сезону. Це вимагає безперервного регулювання рівня компенсації, щоб уникнути перебоїв у роботі енергосистеми [8; 26]. Для мінімізації зазначених ризиків необхідно впроваджувати сучасні технології управління енергією та системи накопичення, які забезпечують акумулювання надлишкової електроенергії та її використання у періоди низької сонячної активності.

Розвиток локальних електричних систем (ЛЕС) та розосереджених джерел енергії (РДЕ) має не лише технічне, а й суттєве науково-соціальне значення. Це проявляється у впровадженні сучасних нанотехнологій у фотогальванічних панелях та системах накопичення енергії, використанні SMART-систем для вимірювання, обліку та діагностики, а також у застосуванні інтелектуальних систем релейного захисту та автоматики (рис. 3).



Рис. 3. Схема впровадження інтелектуальних систем управління

Такі рішення створюють умови для гнучкого регулювання рівнів напруги у вузлових точках як показника якості електроенергії, ефективного керування потоками потужності у лініях та



трансформаторних вітках розподільних мереж, а також запобігання аварійним перевантаженням. Додатково це сприяє зменшенню частки витрат на традиційне паливо у кінцевій вартості електроенергії, зниженню негативного екологічного впливу та скороченню собівартості продукції споживачів за рахунок оптимізації використання електроенергії [9]. Значною перевагою ЛЕС і РДЕ є їх екологічна привабливість, що стимулює активне впровадження цих технологій [27; 28].

Інтеграція сучасних Smart Grid-технологій у ЛЕС забезпечує високий рівень управління та інформаційного обміну, особливо за наявності великої кількості інверторів сонячних електростанцій. Це дає змогу запобігати або оперативнo усувати понаднормові відхилення електричних параметрів (напруги, струму, потужності) на шинах підстанцій та у лініях електропередачі шляхом регулювання режимів роботи сонячних, гідро- та інших станцій [29; 30]. При цьому важливо відмовитися від концепції фіксованого коефіцієнта потужності та постійного реактивного складника генерації, забезпечуючи можливість динамічного регулювання потужності РДЕ залежно від змін навантаження протягом доби. Системи автоматичного керування можуть функціонувати віддалено від джерел генерації, що передбачає застосування сучасних засобів автоматизованого управління та диспетчерського контролю.

Розвиток відновлюваної енергетики, зокрема сонячних та вітрових електростанцій, у поєднанні із системами накопичення енергії є ключовим напрямом модернізації сучасних електроенергетичних систем. Зростання споживання електроенергії, обмеженість маневрових можливостей ТЕС та АЕС, а також руйнування частини генеруючих потужностей в Україні актуалізують потребу у створенні гнучких та стійких локальних електроенергетичних систем. Використання акумуляторних систем накопичення енергії (BESS) дає змогу ефективно балансувати попит і пропозицію, забезпечувати стабільність частоти та напруги в мережі, а також підвищувати надійність живлення критичних споживачів (табл. 1).

Таблиця 1

Гнучкі локальні електроенергетичні системи

Технологія	Функції	Переваги
Акумуляторні системи (BESS)	Накопичення та віддача енергії	Балансування в енергосистемі, регулювання частоти та рівнів напруги
СЕС + BESS	Автономне енергозабезпечення	Зберігання надлишку денної енергії для використання у вечірні піки, підвищення надійності живлення критичних споживачів
Smart Grid (Штучний інтелект)	Оперативне управління	Прогнозування генерації та споживання, оптимізація потоків енергії у реальному часі, зниження витрат

Особливе значення має застосування інверторів сонячних електростанцій, які здатні не лише перетворювати постійний струм у змінний, а й компенсувати реактивну потужність. Це сприяє зменшенню втрат у мережах, скороченню потреби у додаткових компенсуючих пристроях і підвищенню ефективності роботи енергосистеми. Інтеграція таких функцій у СЕС відкриває нові можливості для оптимізації роботи розподільних мереж та формування локальних електроенергетичних систем (ЛЕС).

Висновки. Упровадження Smart Grid-технологій є актуальним та важливим завданням сьогодення. Розвиток Smart Grid-технологій забезпечує цифровізацію та автоматизацію управління енергетичними потоками. Це дає змогу в реальному часі координувати роботу генерації та споживання, уникати аварійних перевантажень і підвищувати якість електроенергії. Поєднання штучного інтелекту, систем накопичення та інтелектуальних інверторів створює умови для гнучкого, надійного й екологічно безпечного розвитку енергетики. Таким чином, майбутнє



електроенергетики України та світу полягає у комплексній інтеграції відновлюваних джерел, сучасних технологій керування і накопичення, що забезпечить сталий розвиток та енергетичну безпеку.

Список використаних джерел

1. Кодекс системи передачі. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 23.09.2025).
2. Introducing Megapack: Utility-Scale Energy Storage. URL: <https://www.tesla.com/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage?redirect=no> (дата звернення: 23.09.2025).
3. ДТЕК інвестує €140 млн в установки зберігання енергії для посилення енергетичної безпеки України. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-to-invest-140-million-in-energy-storage-systems-to-strengthen-ukraines-energy-secur/> (дата звернення: 23.09.2025).
4. Lezhniuk P., Buslavets O., Rubanenko O. Balancing electricity generation and consumption in a system with renewable energy sources. *2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570087>.
5. Luo Y., Shi L., Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2014. 80. 407–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.061>.
6. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical Modelling of Cogeneration Photoelectric Module Parameters for Hybrid Solar Charging Power Stations of Electric Vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.
7. Arefifar S.A., Mohamed Y.A.-R.I., El-Fouly T.H.M. Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2012. 3. 1491–1502. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2198246>.
8. Держенергоєфективності України. Статистика впровадження ВДЕ. URL: <https://saee.gov.ua/> (дата звернення: 23.09.2025).
9. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень* : матеріали Міжнар. наук. конф., 10 квітня 2020 р. Луцьк : МЦНД, 2020. 1. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.
10. Belik M. Optimisation of energy accumulation for renewable energy sources. *Energy Power Qual. J.* 2021. 19. 205–210. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj19.258>.
11. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>.
12. Дзюбановська Н.В. Інноваційні підходи до формування енергетичної мережі майбутнього із застосуванням штучного інтелекту. *Інноваційна економіка*. 2023. 1(93). 158–163.
13. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. 16(6). 2638. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062638>.
14. Каллот К., Флінт Б., Челлен Е. Як штучний інтелект може прискорити енергетичний перехід. *Enkorr*. https://enkorr.ua/uk/publications/yak_shtuchniy_ntelegt_mozhe_priskoriti_energetichniy_perehd/259397 (дата звернення: 23.09.2025).
15. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko, V. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. *Applied Sciences*. 2022. 12(10). 5190. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12105190>.
16. Hannan M.A., Al-Shetwi A.Q., Begum R.A., Ker P.J., Rahman S.A., Mansor M., Mia M.S., Muttaqi K.M., Dong Z.Y. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Energy Storage*. 2021. 42. 103040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.



17. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. 2019. 19(3). 130–141. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.
18. Lim S, Lee J, Lee S. Model Predictive Control-Based Energy Management System for Cooperative Optimization of Grid-Connected Microgrids. *Energies*. 2025. 18(7). 1696. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071696>.
19. Бордаков М.М. Компенсація реактивної потужності сонячною електростанцією та вплив на роботу електричної мережі. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 15–16 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 314–319.
20. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. 3(1). 199–204. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>.
21. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*, 2019. 132. 01025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>.
22. Lakshmi G.S. Battery Energy Storage Technologies for Sustainable Electric Vehicles and Grid Applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1495. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012014>.
23. Dall'Anese E., Dall'Anese E., Zhu H., Giannakis G. Distributed optimal power flow smart microgrids. *IEEE Transaction on power electronics*. 2013. 3. 1464–1475.
24. Vovk O. Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43.
25. Kumar K., Kwon S., Bae S. Deep reinforcement learning-based control strategy for integration of a hybrid energy storage system in microgrids. *J. Energy Storage*. 2025. 108. 114936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114936>.
26. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Малогулко Ю.В. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2014. 60. 68–77.
27. Koushki M.M., Ayoubi E., Miveh M.R., Ghadimi A.A. A model predictive control for a four-leg inverter in a stand-alone microgrid under unbalanced condition. In *Proceedings of the 2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. Tabriz, Iran, 2–4 February 2021. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405873>.
28. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. 35. 2587–2595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>.
29. Barrios L.A., Valerino J.B., del Nozal A.R., Escano J.M., Martinez-Ramos J.L., Gonzalez-Longatt F. Stochastic unit commitment in microgrids based on model predictive control. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Seville, Spain, 10–12 September 2018. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495736>.
30. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 51. 1564–1577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 09.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025





D. Oberemok¹, D. Myrgorod¹, R. Oksenysh¹, O. Tobert¹, S. Halko²

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

PROBLEMS OF INTEGRATION OF SOLAR POWER PLANTS AND ENERGY STORAGE SYSTEMS INTO DISTRIBUTION NETWORKS

Summary

The article addresses the pressing challenges and future prospects of the power sector in the context of increasing electricity consumption, regional and temporal demand imbalances, and the rapid expansion of renewable energy. Traditional coal- and nuclear-based power plants lack flexibility for frequent power adjustments, which negatively affects equipment life cycle and operational costs. At the same time, solar and wind generation depend on weather and time of day, often misaligned with consumer demand. This creates a need for advanced modeling of generation capacity development, including the integration of demand-side management, energy efficiency measures, and storage technologies. The study emphasizes the importance of energy storage systems, particularly battery energy storage (BESS), which offer instant response, enhance network stability, support frequency regulation, and improve voltage profiles in distributed grids. The paper also highlights recent progress in Ukraine, where renewable integration is gaining momentum despite large-scale destruction of traditional power infrastructure during 2022–2024, driving investments into alternative sources. Economic mechanisms such as the «green tariff» further stimulate solar energy, which already accounts for about 60% of the renewable market. Special attention is devoted to the dual role of solar power plants: in addition to generating active power, their inverters can compensate reactive power, reducing energy losses, lowering costs, and enhancing overall system reliability. The paper explores scenarios involving smart grids, artificial intelligence for predictive load balancing, and distributed generation through local energy systems. Case studies, including Tesla's 100 MW/129 MWh BESS and Ukraine's first operational 1 MW storage plant, demonstrate practical applications and benefits. The research concludes that integrating storage, smart grid technologies, and reactive power compensation by PV inverters is a critical step toward building resilient, efficient, and environmentally sustainable power systems capable of addressing both technical and economic challenges.

Keywords: electrical grid, renewable energy sources, solar panels, batteries, generation, power system stability, renewable energy.