

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-420-431](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-420-431)

УДК 621.355

Дмитро Станіславович Захарченко¹, Сергій Анатолійович Степенко²¹аспірант, молодший науковий співробітник Центру протимінної діяльності Міністерства оборони України
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: dimazakhar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3009-5648>, ResearcherID: [AFH-3544-2022](https://orcid.org/AFH-3544-2022)²кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/F-1018-2014), SCOPUS Author ID: [55570068000](https://orcid.org/55570068000)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СКЛАДІ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Стационарні сонячні електричні станції, що складаються з масиву сонячних панелей – одні з найбільш вагомих складових автономних електричних мереж. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів відстежування точки максимальної потужності, метою цієї роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів МРРТ та їх порівняльний аналіз. На основі проведеного аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів. У процесі порівняння основних алгоритмів МРРТ встановлено, що інтелектуальні алгоритми мають певні переваги над базовими. Проте реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему. Автономні електроенергетичні системи, засновані на розподілених незалежних джерелах генерації, привертають все більшу увагу через те, що показують здатність значного заощадження енергії та зменшення викидів забруднюючих речовин завдяки високому поширенню відновлюваних джерел енергії. У порівнянні з використанням електроенергії від традиційних електростанцій, значні зміни у вимогах щодо кількості споживання електроенергії в поєднанні з невизначеністю щодо доступності сонячної та вітрової енергії для необхідного генерування потужності, вимагають впровадження систем зберігання енергії для пом'якшення проблем переривчастості та для виконання вимог пікового споживання електроенергії.

Ключові слова: автономні електричні мережі; електроенергетичні системи; накопичувачі електроенергії; технічні показники; економічні показники; ефективність; фотоелектричні перетворювачі; порівняльний аналіз.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Попит на електроенергію та відповідні ціни мають суттєвий вплив на економічну діяльність будь-якої країни. За останнє десятиліття багато розвинених країн швидко переходять до екологічно чистих і дешевих відновлюваних джерел енергії. В останні кілька років енергетичний ринок України постраждав від поступового збільшення розриву між попитом і пропозицією через збільшення споживання та руйнування енергетичної інфраструктури та об'єктів генерації. За даними Інституту відновлювальної енергетики НАН України [1], загальний економічно-доцільний потенціал відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в Україні становить, приблизно, 454,4 млрд кВт·год, або 59,2 млн т умовного палива на рік. Україна приєдналася до Європейського енергетичного співтовариства та взяла на себе зобов'язання до 2020 року виробляти 11 % електроенергії із відновлюваних джерел енергії та 25 % до 2035 року [2]. Від 2009 року об'єкти відновлюваної енергетики в Україні отримали право на використання зеленого тарифу.

Станом кінець 2020 року сонячна енергетика України становила 6320 МВт загальною номінальною потужністю без урахування близько 407,9 МВт потужностей, які перебувають на окупованій Росією території, які генерують 1,265 млрд кВт·год електроенергії. Частка СЕС на перший квартал 2021 року загальній генерації України складає близько 6 %. За оцінками сонячної енергетики України [3], сонячних електростанцій потужністю приблизно 800-850 МВт було встановлено у 2024 році. У 2025 році сонячна енергетика в Україні продовжує розвиватися, хоча темпи приросту дещо сповільнилися порівняно з попередніми роками. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій в Україні перевищує 7 ГВт, а частка сонячної генерації в загальному енергобалансі становить близько 6 %. Спостерігається зростання кількості малих та середніх сонячних електростанцій, особливо в сегменті домашніх господарств, причому кількість

"просьюмерів" (домогосподарств, що виробляють електроенергію для власних потреб та продають надлишки в мережу) перевищила 45000 одиниць.

В Україні річне надходження сонячного випромінювання перебуває на одному рівні з країнами, які активно використовують сьогодні сонячні колектори (Швеція, Німеччина, США тощо).

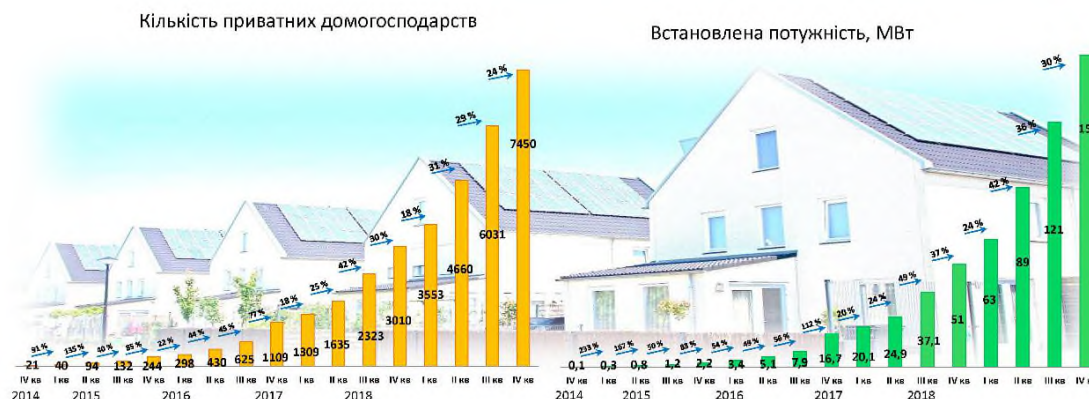


Рис. 1. Динаміка збільшення кількості сонячних електроустановок приватних домогосподарств

Джерело: [4].

Фотоелектричні (PV) системи є одними з найбільш швидкозростаючих сфер відновлюваної енергії (ВДЕ) у світі завдяки прогресу технологій сонячних батарей [5]. У 2019 році глобальне виробництво сонячної енергії становило від 120 до 140 ГВт, а Китай і Німеччина були найбільшими виробниками сонячних фотоелектричних систем [6].

Постановка проблеми. Глобальне суспільство значно прискорює впровадження відновлюваних джерел енергії та їх інтеграцію в існуючу мережу, щоб протидіяти зростаючим екологічним проблемам, зокрема збільшенню викидів вуглекислого газу минулого століття. Відновлювані джерела енергії мають величезний потенціал для скорочення викидів вуглекислого газу, оскільки вони практично ніколи не виробляють вуглекислий газ чи інші забруднювачі. З іншого боку, на ці джерела енергії зазвичай впливають географічне розташування, погода та інші фактори стохастичного характеру. Система накопичення енергії в акумуляторах застосовується для зберігання енергії, виробленої ВДЕ, а потім використовуватися регулярно та в межах, необхідних для зменшення впливу переривчастого характеру відновлюваних джерел енергії.

В умовах російсько-української війни та вимушених відключень електроенергії, внаслідок пошкодження об'єктів генерації та розподілення енергосистеми України, використання відновлювальних джерел енергії в поєднанні з можливістю тривалого та в достатній ємності зберігання електроенергії питання поширеного використання ESS здобуває додаткової актуальності.

На сьогодні є різноманіття систем накопичення електроенергії. Усі вони відрізняються за техніко-експлуатаційними та економічними показниками, мають як переваги, так і недоліки. Отримання найкращого рішення у виборі правильної ESS залежить від багатьох параметрів системи генерації на накопичення відновлювальної енергії, а також потреб кінцевого користувача. Розглядаються такі показники, як капітальні витрати (CAPEX), ефективність проходження в обидві сторони (η_{RTE}), глибина розряду (DOD), термін служби та кількість циклів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні два десятиліття були розроблені різні технології систем накопичення енергії (ESS) для різних застосувань, таких як мобільні телефони, електричні транспортні засоби та автономні електроенергетичні системи, такі як мікромережі та системи полігенерації, зазвичай організовані з використанням сонячної фотоелектричної енергії [7].

У роботі [8] проаналізовано особливості та сформульовано рекомендації щодо найбільш ефективного використання систем накопичення енергії в розподільних системах і мікросистемах в умовах розширення впровадження локальних відновлюваних джерел енергії. Узагальнено інформацію щодо різних технологій акумулювання енергії та сформульовано рекомендації щодо ефективного їх застосування для різних додатків в електроенергетиці. Розглянуто функції, які можуть і повинні вирішувати системи накопичення енергії в розподільних мережах, у результаті чого обґрунтовано доцільність формування гібридних систем накопичення. На основі аналізу бібліографії та розгляду міжнародного досвіду визначено завдання, які потребують подальших поглиблених досліджень для обґрунтованого вибору структури, параметрів, місць розміщення та режимів роботи гібридних систем накопичення енергії з урахуванням специфіки побудови та режимів роботи вітчизняних систем розподілу електричної енергії за умов інтеграції в них різноманітних локальних джерел енергії.

У статті [9] відзначено вирішальне систем акумуляторного накопичення енергії для модернізації існуючих енергетичних систем, запропоновано вирішення ключових проблем, пов'язаних з мінливістю відновлюваних джерел енергії, та підвищення стабільності та стійкості мережі. У цій роботі можна ознайомитись з дослідженням різноманітного застосування ESS у різних масштабах, від використання на рівні мікроприладів до великомасштабних комунальних та мережевих систем надання послуг, підкреслюючи їхню адаптивність та трансформаційний потенціал. Це дослідження також включає передові застосування, такі як мобільне накопичення енергії, використання акумуляторів другого терміну служби та інноваційні моделі, такі як накопичення енергії як послуга та спільне використання накопичувачів енергії.

Авторами статті [10] системи акумуляторного накопичення енергії розглядаються як перспективна технологія для вирішення виникаючих технічних складнощів, що привертає значну увагу в останні роки. Зокрема, вони викликають дедалі більший інтерес у контексті гібридних установок PV-BESS, що забезпечує різні переваги як для житлових, так і для нежитлових кінцевих користувачів. Ця робота надає детальний огляд аспектів, пов'язаних з ESS, зосереджуючись на застосуванні, розробках та тенденціях досліджень гібридних установок у секторі кінцевих користувачів. У зв'язку з цим надається чіткий огляд акумуляторного накопичення енергії, особливо як розподіленого енергетичного ресурсу, а також детальний опис гібридних установок PV-BESS, їхніх доступних конфігурацій та переваг.

У матеріалах оглядової статті [11] представлено сучасний стану систем накопичення енергії в акумуляторах та визначення їхніх переваг та недоліків. Водночас це допомагає дослідникам та інженерам у цій галузі знайти більш оптимальну конфігурацію для конкретного застосування. Це дослідження пропонує ретельний аналіз системи накопичення енергії в акумуляторах з урахуванням хімічних властивостей акумуляторів, силової електроніки та підходів до управління. У цій статті також запропоновано детальний аналіз застосувань систем накопичення енергії на основі акумуляторів та досліджуються недоліки найкращих архітектур систем накопичення енергії на основі акумуляторів, щоб визначити області, які потребують подальшого вивчення.

ESS забезпечують поєднання послуг балансування та регулювання в рамках інтелектуальної мережі для підвищення її стійкості та гнучкості. Підтримка прийнятного стану та найвищої норми прибутку вимагає динамічного моделювання активу та ретельної оптимізації. Авторами статті [12] порівнюються технічні витрати та економічна вигода від використання акумуляторів у динамічній частоті та діях механізму балансування в інтелектуальній мережі. Як тематичне дослідження вони використовують послуги, придбані National Grid у Великій Британії. Запропонована методологія дає найоптимальніший сценарій участі в обслуговуванні, враховуючи динамічну деградацію та змінне ціноутворення на електроенергію протягом дня. Крім того, вона рекомендує найоптимальніший графік відправлення та декларації цін для акумулятора протягом дня та року, використовуючи алгоритм оптимізації рою частинок та історичні дані.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Метою роботи є комплексний аналіз техніко-експлуатаційних, економічних та екологічних показників, пов'язаних із застосування широкого спектра ESS у складі автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів.

Дана робота здебільшого присвячена детальному та комплексному аналізу критеріїв, що описують продуктивність ESS щодо цілей стійкості та енергетичної безпеки. Запропонований комплекс показників представлений у вигляді систему індикаторів та застосований для вибраних систем зберігання енергії. Це призводить до матриці рішень для проблеми багатокритеріального аналізу рішень.

Мета статті. Метою даного матеріалу є проведення дослідження елементів накопичення електроенергії у складі автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів.

Виклад основного матеріалу. Оскільки технології накопичення енергії мають сприяти покращенню енергетичної стабільності, пріоритети енергетичної політики ЄС можуть бути взяті за основу для побудови набору індикаторів. Пріоритети енергетичної політики ЄС включають: безпеку постачання, конкурентоспроможність, доступність енергії та екологічну стійкість. У світлі цих рекомендацій ми розглядаємо три групи показників, що описують ефективність технологій зберігання енергії: технологічні, економічні та екологічні критерії [13].

Техніко-економічні характеристики елементів накопичення.

Проаналізовано три основні категорії систем накопичення енергії (ЕЕС):

Літій-іонні (Li-Ion) ESS на основі літію демонструють високу щільність енергії порівняно з іншими системами, даючи водночас відносно високу потужність розряду та відмінну ефективність процесів заряду/розряду. Поточна щільність енергії для технологій літій-іонних елементів коливається від 200 Вт·год/л до 735 Вт·год/л для конфігурації NMC/LMO [14]. Вартість коливається від 473 до 1260 доларів США/кВт·год для систем на основі літій-титанового оксиду та від 200 до 840 доларів США/кВт·год для літій-іонних акумуляторів іншої хімії. Глибина розряду даних накопичувачів коливається від 80 до 100 %, тоді як оцінка ефективності літій-іонних технологій для процесів заряду/розряду становить від 92 до 96 %. З роками спостерігалось зниження капітальних витрат [15], і їх використання у стаціонарних автономних електроенергетичних системах стає більш конкурентоспроможним. Дійсно, масштаб розгортання Li-Ion ESS є вищим, ніж інші технології ESS, через їх домінування в електромобілях і стаціонарних автономних електроенергетичних системах. Серед різних літій-іонних технологій розглядаються літій-нікель-марганець-кобальт, літій-оксид марганцю (NMC-LMO) і літій-залізо-фосфат (LIP). Перший тип є звичайним вибором для застосувань у стаціонарних автономних електроенергетичних системах і електромобілях завдяки зниженому використанню дорогого кобальту при збереженні продуктивності. Літій-залізо-фосфатний тип Li-Ion накопичувача демонструє перевагу перед NMC-LCO завдяки кращій термічній стабільності, невід'ємній безпеці та довшому життєвому циклу, але він має нижчу щільність енергії, викликану нижчою електричною та іонною провідністю фосфату заліза.

Свинцево-кислотні (LA) ESS є найстарішими і найбільш широко використовуваними типами накопичувачів електроенергії [16]. Вони мають найнижчу капітальну вартість, але, як недолік, вони важкі, громіздкі, характеризуються низькою щільністю енергії та низькою глибиною розряду (DOD). Свинцево-кислотні ESS мають щільність енергії від 50 Вт·год/л до 100 Вт·год/л і термін служби від трьох до п'ятнадцяти років або від 250 до 2500 еквівалентних повних циклів заряду/розряду [15]. До 2030 року очікується покращення характеристик даного типу накопичувача, покращивши термін служби до 5000 еквівалентних повних циклів заряду/розряду. Очікувані вдосконалення виробничих процесів можуть

дозволити цій технології досягти вартості, яка все ще може бути конкурентоспроможною в застосуванні в стаціонарних автономних електроенергетичних системах. Очікується, що до 2030 року вартість установки свинцево-кислотних ESS знизиться зі 105–475 доларів США/кВт-год до 50–240 доларів США/кВт-год. LA накопичувачі енергії за конструкцією можуть бути залитими (Flooded-Lead Acid або FLA), вони вважаються еталонною технологією через зрілість свою та великий досвід експлуатації, навіть незважаючи на те, що їх життєвий цикл низький і виникають проблеми з обслуговуванням, та герметичні (Valve Regulated Lead Acid або VRLA), вони водонепроникні та автономні, тому будуть більш оптимальні для об'єктів, на яких тривалий час не проводиться обслуговування накопичувачів, а також є більші перепади навколишніх температур.

Проточні батареї (FB) ESS є найбільш вивченою технологією ESS за останнє десятиліття завдяки їх масштабованості, придатності для великомасштабних застосувань і збільшеному досвіду виробництва [15]. Поточна щільність енергії коливається від 15 Вт-год/л до 70 Вт-год/л, а вартість установки коливається від 315 до 1680 доларів США/кВт-год. Очікується, що до 2030 року витрати знизяться до 108–576 доларів США/кВт-год. FB показує значний тривалий термін служби та найвищий DOD, близький до 100 %. Як недолік, FB є дорогими через складну архітектуру системи, але це можна компенсувати їх довшим терміном служби. Поки що FB показали низьку ефективність зворотного зв'язку. Ванадієво-відновна проточна батарея (VRF) і цинк Розглядаються бромідні батареї (ZBF). VRFB привертає увагу, оскільки очікується, що до 2030 року не перевищить 360 доларів США/кВт-год із середнім вартість 120 дол. комерціалізація технологій. У табл. 1 наведено всі згадані варіанти технології для порівняння з їх основними показниками ефективності.

Таблиця 1 – Різні типи ЕЕС та їх властивості [15]

Тип акумуляторної батареї	Ефективність заряду/розряду (%)	Глибина розряду (%)	Строк придатності (років)	Кількість циклів
Li NMC-LCO	95	90	12	2000
LIP	92	90	12	2500
LT	96	95	15	10000
FLA	82	50	9	1500
VRLA	80	50	9	1500
VRF	70	100	12	13000
ZBF	70	100	10	10000

Технологічні показники технологій зберігання енергії дозволяють оцінити надійність технологій та їхню здатність забезпечувати безпеку енергопостачання. Економічні показники дозволяють врахувати питання конкурентоспроможності та доступності шляхом врахування витрат, пов'язаних зі встановленням технологій зберігання енергії та, у свою чергу, їхнього впливу на ціни на енергію. Крім питання доступності, ці характеристики визначають вплив конкретних технологій зберігання енергії на конкурентоспроможність економіки. Індикатори впливу на навколишнє середовище дозволяють вирішувати екологічну стійкість. Соціальний вимір не представлено окремою групою індикаторів, однак вимір доступності є найбільш актуальним із соціального погляду. Таким чином, соціальний вимір сталості технологій зберігання енергії в нашому випадку охоплюється економічними показниками. Технічні показники для оцінки зберігання енергії включають:

1. Номінальна потужність вимірюється в МВт. Він показує потужність установки. Цей критерій є максимальним, оскільки вища потужність забезпечує більшу гнучкість у раціоналізації енергопостачання.

2. Енергетичний рейтинг – це тривалість розряду, виміряна в годинах. Кращим є довший період розряду, оскільки це дозволяє краще приборкати дефіцит енергії.

3. Час відповіді вказує час, необхідний для активації установки. Вимірюється за лінгвістичною шкалою. Нижчі значення є кращими, оскільки кращим є швидке реагування на шоки попиту та пропозиції енергії.

4. Щільність енергії вимірює кількість енергії для одиниці фізичного розміру установки. Вимірюється на одиницю ваги у Вт·год/кг. Бажана більш висока щільність. Час саморозряду вказує на частку потужності, втраченої протягом періоду часу, якщо установка не використовується. Цей показник вимірюється у відсотках на добу. Очевидно, що нижчі значення є бажаними.

5. Ефективність передачі в обидві сторони – це відношення кількості енергії, яку може надати установка, до кількості енергії, спожитої під час попереднього заряджання. Критерій вимірюється у відсотках. Бажано вищі значення.

6. Термін служби - це період часу, протягом якого установка може працювати. Вимірюється в роках. Більші значення свідчать про більшу довговічність установки.

7. Кількість циклів роботи (заряджання та розряджання) відображає довговічність установки. Бажано більший кількість циклів.

Економічні показники включають два типи витрат, пов'язаних із потужністю (номінальною потужністю) та кількістю поставленої енергії. Ці витрати можуть відрізнятися через властивості установок, наприклад, для технологій, орієнтованих на короточасне зберігання, порівняно з тими, які орієнтовані на тривале зберігання. Розглядаються два критерії:

1. Вартість електроенергії вимірюється в євро/кВт і відображає загальну вартість встановлення. Нижчі витрати є кращими.

2. Вартість енергії вимірюється в євро/кВт-год і відображає витрати на енергопостачання. Нижчі значення більш бажані.

Екологічний показник. Вважається, що плив на навколишнє середовище оцінюється на основі огляду літератури. Застосовується якісна шкала з п'ятьма рівнями (від відсутності впливу до дуже сильного впливу). Бажаним є мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Техніко-економічні та екологічні характеристики основних технологій накопичення енергії, розглянутих вище, представлені в табл. 1. Ці дані були отримані шляхом комбінування різних джерел. Можна висловити кілька зауважень щодо природи проблеми оцінки технологій зберігання енергії. По-перше, критерії пов'язані з різними одиницями вимірювання. По-друге, критерії мають різні напрямки оптимізації. По-третє, деякі показники оцінюються в лінгвістичних шкалах (наприклад, вплив на навколишнє середовище), які пов'язані з невизначеністю. Таким чином, використання нечітких методів MCDM необхідне для успішного вирішення проблеми вибору технології зберігання енергії з огляду на цілі енергетичної сталості. Таблиця 2 визначає перетворення лінгвістичних міток у нечіткі числа.

Розглядаючи конкретні технології, можна помітити, що як рівні, так і розкиди рейтингів відрізняються. Наприклад, такі технології, як PHS і CAES, призначені для великомасштабних застосувань зі значеннями номінальної потужності понад 100 МВт. Однак першу технологію можна розширити до вищого ступеня, і, таким чином, верхня межа номінальної потужності приблизно в 16 разів перевищує відповідне значення для технології CAES. Інтервал для деякої альтернативи за певним критерієм може бути покритий кінцевими точками інтервалів для іншої альтернативи. Наприклад, Вартість енергії CAES коливається від 10 до 120 євро/кВт-год, тоді як інтервал для технології NaNiCl становить від 70 до 150 євро/кВт-год. Ці випадки ілюструють необхідність застосування теорії нечітких чисел для вирішення проблеми пріоритизації систем зберігання енергії.

У таблиці 2 наведені детальні техніко-економічні характеристики різних технологій накопичення енергії.

Таблиця 2 – Техніко-економічні та екологічні характеристики технологій накопичення енергії [17-23]

Технологія	Технічна характеристика							Економічна характеристика		Екологічна характеристика
	Час розряду, год	Здатність реагувати на навантаження	Щільність енергії, Вт·год/кг	Саморозряд (%/день)	Ефективність передачі в обидві сторони, %	Тривалість життя, років	Життєві цикли, кількість	Вартість електроенергії, €/кВт	Вартість електроенергії €/кВт·год	Екологічний вплив
Hydrogen	24	Середня	80	2	50	5	10000	550...1600	1...15	Високий
PHS	24	Середня	0.5	0.0001	85	50	50000	500...3600	50...150	Дуже високий
CAES	24	Велика	30	0.0001	54	25	50000	400...1150	10...120	Дуже високий
Flywheel	0.25	Середня	5	20	95	20	100000	100...300	1000...3500	Дуже низький
SMES	33	Мала	0.5	15	95	20	10000	100...400	700...7000	Дуже високий
Supercap	1	Мала	0.1	2	98	20	1000000	100...400	300...4000	Низький
Pb-acid	3	Дуже мала	30	0.3	95	3	1000	200...650	50...300	Дуже високий
NiCd	1	Дуже мала	40	0.6	91	15	3000	350...1000	200...1000	Дуже низький
Li-ion	1	Дуже мала	75	0.3	100	5	10000	700...3000	200...1800	Низький
NaS	2	Дуже мала	150	20	90	10	4500	700...2000	200...900	Низький
NaNiCl	1	Дуже мала	125	15	90	10	2500	100...200	70...150	Дуже низький
VRB	10	Мала	75	10	85	5	10000	2500...2500	100...1000	Дуже високий
ZnBr	10	Мала	60	1	75	5	2000	500...1800	100...700	Дуже низький
Molten salt	24	Велика	80	1	60	5	10000	200...300	30...60	Низький

Компонентну модель ESS було розроблено з урахуванням робочих параметрів, таких як заряд (η_{Ch}) і ефективність розряду (η_{Dch}), які визначають стан заряду ESS (SOC), DOD, який встановлює мінімальний і максимальний SOC, номінальну ємність E_N , струм I і напругу V кола, календарний термін служби та кількість циклів. Неявні рівняння пов'язують вищезазначені параметри з сімейством ESS (тобто літій-іонний, окисно-відновний ванадій) і номінальною ємністю. Авторами розроблено прийняття функціональних кореляцій, що представляють БД ESS.

Згідно з належним чином перевіреною характеристикою моделі ESS, прийнятою для вирішення проблем оптимальної диспетчеризації та зобов'язань одиниць [24; 25], електричні параметри, такі як генерований струм і напруга, не обговорюються в цьому розділі, навіть якщо вони були взяті до уваги авторами та вбудовані в ESS DB. Відповідно до вищезазначених робочих параметрів ESS, SOC ESS на кожному кроці часу ($t + 1$) виражається як співвідношення між фактично накопиченою енергією ESS (E_{ESS}) на момент часу ($t + 1$) та номінальною потужністю.

$$SOC_{ESS}(t + 1) = \frac{E_{ESS}(t+1)}{E_n}. \quad (1)$$

SOC у цій статті визначається як безрозмірний параметр і враховує DOD. Мінімальне та максимальне значення SOC вводяться для обмеження області здійсненності розв'язку. Відповідно до вищезазначеного, обмеження нерівності, введені для розв'язання ODP, виражаються рівнянням (2):

$$SOC_{ESS}^{min} \leq SOC_{ESS}(t + 1) \leq SOC_{ESS}^{max}. \quad (2)$$

У результаті рівняння енергозбереження ємність ESS (виражена в кВт·год) на етапі часу ($t + 1$) визначається як потужність ESS на етапі часу (t) плюс енергія, введена в ESS під час фази заряду:

$$E_{Ch} = P_{Ch} \cdot \Delta t = P_B^- \cdot \eta_{Ch} \cdot \Delta t, \quad (3)$$

або мінус енергія, отримана від ESS, під час фази розряду:

$$E_{Dch} = P_{Dch} \cdot \Delta t = \frac{P_B^+}{\eta_{Dch}} \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де P_B^- і P_B^+ – потужність, що вводиться та береться від шини електрики відповідно. Для кожного часового кроку потужність ESS виражається за формулою:

$$E_{ESS}(t + 1) = E_{ESS}(t) + E_{Ch} - E_{Dch}. \quad (5)$$

Для забезпечення рівняння енергозбереження протягом усього періоду роботи ЕЕС введено обмеження рівності. Взавши за основу добу з 48 інтервалами (24 години), (рівняння(6)) нав'язує, що енергетичний вміст ESS у момент часу 0 такий самий, як і в момент часу 48, щоб система могла працювати без дефіциту енергії наступного дня. Якщо період роботи заснований на тижні, місяцях або роках, обмеження будуть адаптовані до належного значення кроку в кінці часу:

$$E_{ESS}(t = t_{START}) = E_{ESS}(t = t_{END}) \rightarrow E_{ESS}(0) - E_{ESS}(48). \quad (6)$$

Висновки. Сучасні системи резервного електропостачання характеризуються скороченням розрахункового терміну служби через швидке старіння. У процесі все більшого розповсюдження відновлюваних джерел енергії, їх інтеграції до існуючої мережі та зростаючої загрози для функціонування традиційних систем генерації в умовах російсько-української війни запропонований багатокритеріальний аналіз техніко-експлуатаційних, економічних та екологічних показників для широкого спектра систем накопичення електроенергії. Описані основні типи систем накопичення енергії та їх складових. Визначений широкий спектр параметрів для складових систем накопичення електроенергії та наведені економічна та екологічна характеристики. З огляду на наведені параметри можна зробити вибір щодо найбільш пристосованої системи накопичення електроенергії для конкретних умов використання з урахуванням балансу переваг та недоліків.

Список використаних джерел

1. Кудря, С. О. (2024). *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України*. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. <https://doi.org/10.36296/atlas-2024>.
2. Корольчук, Ю. (2013, 14 липня). *Відновлювана енергетика: перспективи України*. Радіо Свобода. <https://www.radiosvoboda.org/a/25044801.html>.
3. Interfax-Ukraine. (2025, 9 січня). *Потужності СЕС у 2024 р. зросли на 800-850 МВт - голова АСЕУ*. Інтерфакс-Україна. <https://interfax.com.ua/news/press-conference/1039623.html>.
4. 7 лютого – публічний звіт Голови Держенергоефективності Сергія Савчука «Розвиток сфери енергоефективності та «зеленої» енергетики в Україні: Підсумки 2018 р. і плани на 2019 рік». (б. д.). Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. <https://sace.gov.ua/news/7-liutogo-publicnii-zvit-golovi-derzenergoefektivnosti-sergiia-savcuka-rozvitok-sferi-energoefektivnosti-ta-zelenoyi-energetiki-v-ukrayini-pidsumki-2018-r-i-plani-na-2019-rik>.
5. Camarasa, C., Kalahasthi, L. K., & Rosado, L. (2020). Drivers and barriers to energy-efficient technologies (EETs) in EU residential buildings. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.08.002>.
6. Jäger-Waldau, A. (2019). *Pv status report 2019*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/326629>.
7. Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>.
8. Zharkin, A. F., Popov, V. A., Yarmoliuk, O. S., & Natalych, V. O. (2023). Features of organization and use of energy storage systems in distribution networks. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, (3). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.271492>.
9. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
10. Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *Journal of Energy Storage*, 86, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>.
11. Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the future: A comprehensive review of battery energy storage systems. *Energies*, 16(17), 6344. <https://doi.org/10.3390/en16176344>.
12. Kirli, D., & Kiprakis, A. (2020). Techno-economic potential of battery energy storage systems in frequency response and balancing mechanism actions. *The Journal of Engineering*, 2020(9), 774–782. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.1053>.
13. Wimmmler, C., Hejazi, G., Fernandes, E. d. O., Moreira, C., & Connors, S. (2015). Multi-Criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 185–195. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.193>.
14. Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2017). Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Applied Energy*, 190, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.153>.
15. IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
16. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018b). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
17. *European Commission* (2014d). *Energy Storage. Thematic Research Summary*. https://energy.ec.europa.eu/publications/study-energy-storage_en.
18. EASE/EERA (2013a). *Joint EASE/EERA Recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030*. http://www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents/Stakeholders.
19. EASE/EERA (2013 b), *Joint EASE/EERA recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030; Technical Annex*. www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents.
20. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.

21. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
22. Schoenung, Susan & Hassenzuhl, William. (2003). Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia Report SAND.
23. DG ENER Working Paper (2013). The future role and challenges of Energy Storage. http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/Ccc/energy-storage/2013/energy_storage.pCf.
24. Tazvinga, H., Zhu, B., & Xia, X. (2015). Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries. *Energy Conversion and Management*, 102, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.015>.
25. Nosrat, A., & Pearce, J. M. (2011). Dispatch strategy and model for hybrid photovoltaic and trigeneration power systems. *Applied Energy*, 88(9), 3270–3276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.044>.

References

1. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine]/ *Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU - Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine*. <https://doi.org/10.36296/atlas-2024>.
2. Korolchuk, Yu. (2013, 14th of July). Vidnovliuvana enerhetyka: perspektyvy Ukrainy [Renewable energy: prospects for Ukraine]. *Radio Svoboda – Radio Svoboda*. <https://www.radiosvoboda.org/a/25044801.html>
3. Interfax-Ukraine. (2025, 9th of January). Potuzhnosti SES u 2024 r. zrosly na 800-850 MVt - holova ASEU [SPP capacities to increase by 800-850 MW in 2024 - Head of ASEU]. *Interfax Ukrainy – Interfax of Ukraine*. <https://interfax.com.ua/news/press-conference/1039623.html>.
4. 7th of February – publichnyi zvit Holovy Derzhenerhoefektyvnosti Serhiia Savchuka «Rozvytok sfery enerhoefektyvnosti ta «zelenoi» enerhetyky v Ukraini: Pidsumky 2018 r. i plany na 2019 rik». (n.d.). [Public report of the Head of the State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine Serhii Savchuk "Development of Energy Efficiency and Green Energy in Ukraine: Results of 2018 and Plans for 2019" (n.d.). *Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy – State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine*. <https://sae.gov.ua/news/7-liutogo-publichnyi-zvit-golovi-derzenenergoefektivnosti-sergiia-savchuka-rozvitok-sferi-energoefektivnosti-ta-zelenoyi-energetiki-v-ukrayini-pidsumki-2018-r-i-plani-na-2019-rik>.
5. Camarasa, C., Kalahasthi, L. K., & Rosado, L. (2020). Drivers and barriers to energy-efficient technologies (EETs) in EU residential buildings. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.08.002>.
6. Jäger-Waldau, A. (2019). *Pv status report 2019*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/326629>.
7. Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>.
8. Zharkin, A. F., Popov, V. A., Yarmoliuk, O. S., & Natalych, V. O. (2023). Features of organization and use of energy storage systems in distribution networks. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, (3). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.271492>.
9. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
10. Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *Journal of Energy Storage*, 86, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>.
11. Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the future: A comprehensive review of battery energy storage systems. *Energies*, 16(17), 6344. <https://doi.org/10.3390/en16176344>.
12. Kirli, D., & Kiprakis, A. (2020). Techno-economic potential of battery energy storage systems in frequency response and balancing mechanism actions. *The Journal of Engineering*, 2020(9), 774–782. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.1053>.

13. Wimmmler, C., Hejazi, G., Fernandes, E. d. O., Moreira, C., & Connors, S. (2015). Multi-Criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 185–195. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.193>.
14. Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2017). Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Applied Energy*, 190, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.153>.
15. IRENA (2017), Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
16. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018b). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
17. European Commission (2014d). Energy Storage. Thematic Research Summary. https://energy.ec.europa.eu/publications/study-energy-storage_en.
18. EASE/EERA (2013a). Joint EASE/EERA Recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030. http://www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents/Stakeholders.
19. EASE/EERA (2013 b), Joint EASE/EERA recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030; Technical Annex. www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents.
20. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.
21. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
22. Schoenung, Susan & Hassenzuhl, William. (2003). Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia Report SAND.
23. DG ENER Working Paper (2013). The future role and challenges of Energy Storage. http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/Ccc/energy-storage/2013/energy_storage.pCf.
24. Tazvinga, H., Zhu, B., & Xia, X. (2015). Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries. *Energy Conversion and Management*, 102, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.015>.
25. Nosrat, A., & Pearce, J. M. (2011). Dispatch strategy and model for hybrid photovoltaic and trigeneration power systems. *Applied Energy*, 88(9), 3270–3276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.044>.

Отримано 23.06.2025

UDC 621.355

Dmytro Zakharchenko¹, Serhii Stepenko²

¹PhD student, junior researcher at the Mine Action Center of the Ministry of Defense of Ukraine
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dimazakhar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3009-5648>. **ResearcherID:** [AFH-3544-2022](https://orcid.org/0000-0003-3009-5648)

²PhD in electrical engineering, Associate Professor, Leading Research Scientist,
Associate Professor at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>
ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). **SCOPUS Author ID:** [55570068000](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776)

RESEARCH OF ELECTRICITY STORAGE ELEMENTS IN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON PHOTOELECTRIC CONVERTERS

Stationary solar power plants consisting of an array of solar panels are one of the most important components of autonomous power grids. Given the variety of existing topologies and methods for tracking the maximum power point, the purpose of this work is to review converter topologies, classify MPPT algorithms and their comparative analysis. Based on the analytical review, a comparative table for the considered algorithms was compiled.

By comparing the main MPRT algorithms, it was found that intelligent algorithms have a number of advantages over basic ones. However, implementation of these algorithms is complex and requires more computational resources, which until recently was a significant problem. Autonomous power systems based on distributed independent sources of generation are attracting increasing attention due to the fact that they show the ability to significantly save energy and reduce pollutant emissions due to high prevalence of renewable energy sources (RES).

Compared to the use of electricity from traditional power plants, significant changes in requirements for the amount of electricity consumption, combined with uncertainty about available solar and wind energy for the required power generation, require implementation of energy storage systems to mitigate intermittency problems and to meet requirements of the peak electricity consumption. In the autonomous electric power system, energy storage technologies usually exist in the form of electrochemical energy storage and thermal energy storage.

The cost and technological capabilities of energy storage systems are key parameters that affect optimal design and operation of the system. In this paper, the analysis and study of the technical and economic impact of various storage technologies for optimal design and operation of autonomous electric power systems were conducted.

Key words: autonomous electrical networks; electric power systems; electricity storage devices; technical indicators; economic indicators; efficiency; photovoltaic converters; comparative analysis.

Fig.: 1. Tables: 2. References: 22.