

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-46>
УДК 621.355

ЛЯСКОВЕЦЬ НАЗАР

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
<https://orcid.org/0009-0009-5778-8779>
email: nazar_liaskovets2201@tntu.edu.ua

ОСАДЦА ЯРОСЛАВ

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
<https://orcid.org/0000-0002-0831-8561>
email: osadtca@tntu.edu.ua

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Використання систем накопичення електричної енергії створює нові можливості для покращення якості управління режимами роботи та оптимізації функціонування будь-яких електроенергетичних систем. У статті проведено огляд найбільш вживаних типів накопичувачів енергії, які використовуються в енергосистемах і знаходяться на різних етапах розробки та застосування в системах енергопостачання. Потреба в зберіганні енергії виникла одночасно зі створенням енергетичних мереж, а з урахуванням розвитку технологій виробництва, передачі та споживання актуальність використання систем накопичення енергії зростає і знаходить все більш широке практичне застосування. Крім цього, в даній роботі зроблено спробу провести аналіз основних типів накопичувачів енергії, які розрізняються за способом накопичення, типом енергії, тривалістю зберігання, потужністю, та проведено узагальнення для порівняння їхніх основних характеристик. Очікувані результати, отримані в даному дослідженні, дозволяють здійснити попередній вибір певного типу накопичувача енергії залежно від енергетичної системи, у якій він використовуватиметься, що дозволить ефективніше керувати енергетичними потоками в процесі виробництва, накопичення енергії та її розвантаження в мережу, забезпечувати регулювання та управління режимами роботи електроенергетичних систем.

Ключові слова: системи накопичення енергії, електроенергетична система, енергоспоживання, акумулятор, генерування, відновлювальні джерела енергії.

NAZAR LIASKOVETS

YAROSLAV OSADTSA

Ternopil Ivan Pului National Technical University

ANALYSIS OF THE MAIN TYPES OF ENERGY STORAGE SYSTEMS AND PROSPECTS FOR THEIR USE IN RENEWABLE ENERGY

In recent years, there has been a growing trend in the use of solar and wind energy for electricity generation. This shift is primarily driven by the global need to reduce greenhouse gas emissions and combat climate change. However, the increasing share of renewable energy sources without the provision of adequate flexible generation or energy buffering, capacity may lead to a range of unforeseen technical and systemic consequences. These may include technological disruptions in the operation of the entire power grid or significant portions of it. One of the key strategies to mitigate such adverse effects is the deployment of energy storage systems. These systems enable efficient management of energy flows during the processes of generation, storage, and discharge of electricity into the grid, as well as the regulation and control of power system operations.

Electrical energy storage systems are technologies designed to retain energy for later use. Each storage technology possesses unique characteristics that contribute to more efficient energy distribution and help meet demand across various energy supply sectors. Their implementation opens new opportunities for improving the quality of operational control and optimizing the performance of energy systems.

This paper provides a review of the most commonly used types of energy storage systems employed in power systems and offers a comparative analysis of their key characteristics. Furthermore, an attempt is made to analyze the main categories of energy storage technologies based on their storage method, energy type, storage duration, and capacity. The findings of this study support the preliminary selection of a suitable type of energy storage system, depending on the specific characteristics and parameters of the energy system in which it is to be applied.

Keywords: energy storage systems, power system, energy consumption, battery, generation, renewable energy sources.

Стаття надійшла до редакції / Received 31.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.06.2025

Вступ

Системи накопичення електричної енергії (СНЕ) належать до технологій, які зберігають енергію з метою її подальшого використання. Кожна із цих технологій має свої унікальні характеристики, які допомагають більш ефективно розподіляти й задовольняти потреби в енергії в різноманітних секторах енергопостачання та оптимізації функціонування будь-яких електроенергетичних систем. У сучасних реаліях у світовій практиці системи зберігання електричної енергії набувають все більшої популярності. Тільки за останні 10 років індустрія накопичення енергії зросла в десятки разів. Середньорічні темпи зростання складають близько 47 % [1].

Останнім часом спостерігається стійка тенденція до зростання частки використання сонячної та вітрової енергії для виробництва електроенергії, що пов'язано в першу чергу з необхідністю скорочення викидів парникових газів [2]. З урахуванням нестабільної генерації сонячних та вітрових електростанцій системи накопичення енергії дають можливість зберігати надлишкову енергію (при низькому споживанні) і

відпускати її в мережу в період пікового споживання. Таким чином, одним з основних завдань використання накопичувачів енергії є оптимізація виробництва електроенергії за рахунок вирівнювання навантаження в енергомережі в періоди пікового та зниженого споживання [1].

Однак зростання потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) без забезпечення достатнього обсягу маневрових потужностей може призвести до непередбачуваних наслідків, технологічного порушення в режимі роботи усієї або значної частини енергетичної мережі через пошкодження (знеструмлення) обладнання електричних мереж. Крім цього, це може спричинити передумови до повної втрати генеруючої потужності електростанцій, що декілька років тому мало місце в південній частині Австралії [3] та нещодавно на Піренейському півострові в Європі [4]. Для підвищення стійкості енергетичних систем з урахуванням того, що в їх структурі є значне зростання енергії з відновлюваних джерел, зростають і вимоги прогнозування виробництва та балансування, їх відповідності генерованій потужності та навантаженню. Одним із шляхів врегулювання вищезгаданої проблеми є використання систем накопичення енергії з метою забезпечення балансу потужності електростанцій з використанням альтернативних джерел та навантаження споживання. З розвитком СНЕ можна вирішувати різні задачі, зокрема забезпечення електричних навантажень під час відключень електроенергії. У теперішніх реаліях висока вартість систем накопичення енергії може бути компенсована за рахунок:

- покриття пікових навантажень (накопичення електроенергії в періоди низького попиту, особливо в базові періоди графіка навантаження, та її відпуск в мережу під час максимального споживання в пікові періоди графіка навантаження);

- регулювання частоти і напруги;

- зменшення завантаженості ліній електропередачі;

- підвищення надійності та якісних показників електропостачання;

- отримання додаткових швидкодіючих засобів регулювання режимів роботи на ринку системних послуг;

- забезпечення інтеграції електростанцій з ВДЕ в електроенергетичну систему.

Поряд із цим застосування СНЕ дозволяє відмовитися від будівництва великих резервних маневрових електростанцій при збереженні і забезпеченні надійності, стабільності енергетичних систем та може позитивно вплинути на формування вартості (в бік зниження) електроенергії. Тому актуальною задачею є аналіз накопичувачів енергії, які різняться способом, типом енергії, тривалістю зберігання, порівняння їхніх основних характеристик, а також їхніх переваг та недоліків з метою вибору оптимальної технології СНЕ для конкретного застосування у фотоелектричних та вітрових системах.

Виклад основного матеріалу

За формою зберігання розрізняють механічні, теплові, електричні, електрохімічні та хімічні типи зберігання енергії, які зазвичай використовуються як системи накопичення енергії. Класифікацію СНЕ приведено на рис. 1. В окрему ланку виділено гібридний тип, який поєднує два або більше різних типів зберігання енергії. Крім цього, водневе накопичення віднесене до електрохімічного типу, а не хімічного, оскільки розглядається як частина єдиної системи (електрика>водень>електрика) через інтеграцію водневого накопичення з іншими електрохімічними компонентами.

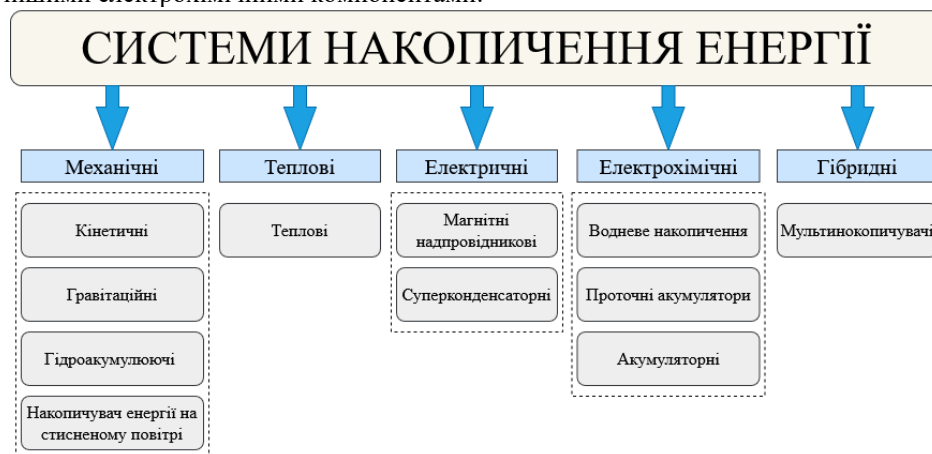


Рис. 1. Класифікація систем накопичувачів енергії

Кінетичні накопичувачі енергії (маховикові накопичувачі, Flywheel energy storage (FES)) – зберігають енергію за допомогою обертання маховика [5]. Зазвичай він виготовляється з легкого вуглецевого волокна і обертається з високою швидкістю всередині вакуумного герметичного корпусу, що зменшує тертя та втрати енергії. Механічна енергія накопичується і зберігається в кінетичній формі завдяки обертанню тіла навколо своєї осі обертання.

Спрощену схему кінетичного накопичувача енергії приведено на рис. 2 [6]. При надлишку електроенергії накопичувач працює у режимі заряджання. Змінний струм, що надходить з мережі за допомогою блоку силової електроніки (інвертора), перетворюється на постійний і надходить на мотор-

генератор, який обертає маховик з високою швидкістю. При цьому кінетична енергія обертання маховика є накопиченою енергією. У режимі розрядження (при відсутності електроенергії у мережі) мотор-генератор генерує електричну енергію за рахунок обертання маховика.

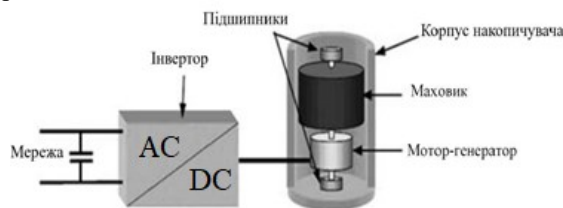


Рис.2. Спрощена схема кінетичного накопичувача енергії

Застосування таких видів накопичувачів є доцільним для стабілізації мережі та в якості джерел безперебійного живлення. Їхніми перевагами є швидкий час відгуку, оскільки можуть реагувати на зміни попиту протягом кількох секунд, відносно тривалий термін служби порівняно з іншими технологіями накопичення енергії та висока ефективність роботи. Однак FES недоцільно застосовувати для тривалого накопичення енергії через високі втрати енергії внаслідок тертя.

Гравітаційне накопичення енергії (ГНЕ), Gravity energy storage (GES)) – це технологія застосування накопичувачів, які зберігають потенційну енергію шляхом підняття вантажів на певну висоту. Енергію можна вивільнити шляхом опускання вантажів і приведенням в дію генератора. Технологія ГНЕ активно застосовується для накопичення енергії з вітрових та сонячних електростанцій у періоди пікових генерацій (потужний вітер, сонцестояння), коли вироблена надлишкова енергія витрачається на підйом вантажу. Суттєвою перевагою систем ГНЕ є їхня екологічність, оскільки у своєму складі ці системи не містять хімічних компонентів. Основний недолік – невисока потужність.

Технологія ARES (Розширене залізничне накопичення енергії) знайшла застосування в деяких країнах Південної Америки. По суті, така система являє собою наземний потяг (рис. 3) [7], який накопичує потенційну енергію за рахунок підйому вагонів по колії вгору і спускає їх униз при дефіциті енергії. Згідно з оцінкою розробників ефективність системи складає понад 85 %, а її вартість є нижчою, порівняно з акумуляторними накопичувачами. Окрім цього, швидкість реакції систем є вищою порівняно, наприклад, з гідроакумуляуючими станціями. Недоліками таких систем є потреба в значних площах з певними геологічним рельєфом (система потужністю 50 МВт займає площу близько 0,4 га, та парку із 210 вагонів загальною масою 75 000 тон [8]).

Технологія накопичення енергії G-VAULT (рис. 4) [9] реалізована компанією Energy Vault з використанням способу гравітаційного накопичення і застосовується для накопичення надлишкової енергії, отриманої ВДЕ. Конструкція системи становить споруду, здатну підіймати блоки на висоту до 140 метрів. Перевагою такої системи в порівнянні із ARES є те, що для її повноцінної роботи необхідна значно менша площа земельної ділянки, навіть без наявності природних схилів. Ефективність такої системи становить від 75 до 80 % (експериментальні дані, отримані фахівцями Energy Vault [10]). Перший такий комерційний гравітаційний акумулятор потужністю 25 МВт та ємністю - 100 МВт·год побудовано в Китаї [10].



Рис. 3. Технологія ARES (залізничне накопичення енергії)



Рис. 4. Гравітаційний акумулятор G-VAULT, компанії Energy Vault

Гідроакумуляуючі накопичувачі (гідроакумуляуючі електростанції (ГАЕС), Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES)) – тип рідинних гравітаційних накопичувачів, принцип дії яких полягає в перетворенні електричної енергії в потенціальну енергію об'єму води. Цей тип накопичувачів має найбільшу питому потужність серед СНЕ і широке застосування. За даними Міжнародної гідроенергетичної асоціації (ІНА) [11], гідроакумуляуюча енергетика забезпечує понад 90% усієї накопиченої енергії у світі.

Зазвичай споруди ГАЕС (рис. 5) складаються з двох різнорівневих басейнів, верхнього та нижнього, які сполучені між собою водоводами. Гідроагрегати встановлюються в споруді ГАЕС в нижній частині водоводу. У більшості випадків є: тримашинними, де на одному валу розміщені оборотна електромашини (двигун-генератор), насос і гідротурбіна; або двомашинними – оборотна електромашини і оборотна гідромашина знаходяться на одному валу, які залежно від напрямку обертання можуть працювати в насосному режимі або в турбінному [12]. Тримашинна агрегатна схема має вищий ККД і більш маневрена порівняно із двомашинною і застосовується при високих напорах (понад 300 м). Прикладом двомашинної ГАЕС (найбільш поширеної у світі) може слугувати Дністровська ГАЕС – 2270 МВт із напором 152 м.

До переваг ГАЕС можна віднести те, що час пуску і зміни режимів роботи становить декілька хвилин, що і зумовлює їх високу експлуатаційну маневреність, а межі регулювання, виходячи з принципу її роботи (як виробника і споживача), майже вдвічі перевищують встановлену потужність. Крім цього, ГАЕС мають довготривалий період експлуатації, їхня деградація близька до нуля, тобто пікова потужність може підтримуватись практично впродовж всього життєвого циклу електростанції.

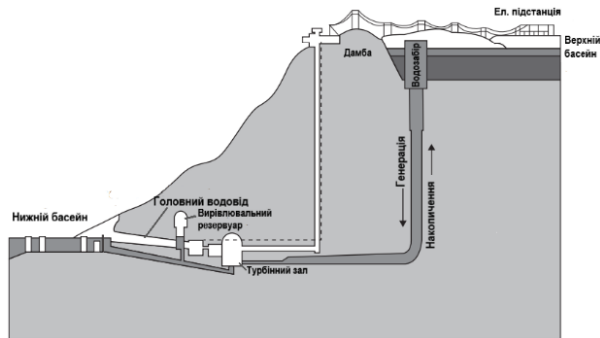


Рис.5. Схематичне зображення ГАЕС

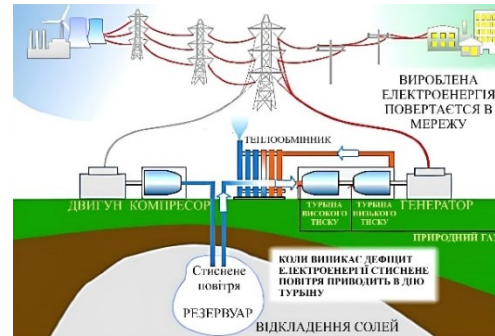


Рис.6. Принципова схема НЕСП

Накопичувачі енергії на стисненому повітрі (НЕСП, Compressed air energy storage (CAES)) мають перевагу в застосуванні для великопотужних енергетичних систем.

НЕСП працюють за тим самим принципом, що і гідроаккумуляційні накопичувачі, але мають додатковий ступінь через необхідність у стисненні повітря. У них надлишкова електроенергія приводить в дію компресори, які нагнітають попередньо охолоджене повітря у сховища, в якості яких найчастіше використовуються підземні порожнини природного або штучного походження. За потреби стиснене повітря попередньо нагрівається та приводить в дію турбогенератор. Нагрівання може здійснюватися як за рахунок тепла, що виділяється під час стиснення повітря, так і тепла від згоряння природного газу в турбіні, де стиснене повітря та паливо змішуються, утворюючи газ високої температури та високого тиску в просторі горіння. Принцип роботи НЕСП показаний на схемі рис 6.

Оскільки пристрій НЕСП складається з двох різних робочих ступенів: стиснення та розширення, і ці два ступені працюють у різний час, то ефективність технології накопичення енергії за допомогою стиснення повітря вища, ніж у традиційних газотурбінних систем. Сьогодні розроблено велику кількість різних концепцій технології накопичення енергії за допомогою стиснутого повітря для адаптації до вимог застосування в різноманітних сценаріях. Однак ця технологія обмежена наявністю безпечних та герметичних підземних резервуарів для тривалого зберігання повітря.

Згідно з [13] принципово можна виділити наступні перспективні типи НЕСП:

- Удосконалені адіабатичні НЕСП (AA-CAES)[14]. У них тепло, яке вивільняється з фази стиснення, потім може зберігатися та повторно використовуватися в адіабатичній ємності під час фази розширення і таким чином завдяки використанню накопиченого тепла зменшується необхідність у використанні вихідного палива.

- Накопичувачі енергії на зрідженому повітрі (Liquid Air Energy Storage (LAES)) – це інноваційна технологія, яка має на меті збільшити щільність накопичення енергії за рахунок зрідження повітря. Перешкодою для широкого впровадження таких систем є їх складність.

- Накопичувачі енергії на надкритично стисненому повітрі (НЕНСП) Supercritical CAES (SC-CAES), перевагами яких є висока ефективність та висока щільність накопичення енергії. Згідно з дослідженнями [15], щільність енергії в них приблизно у 20 разів вища, ніж у звичайних CAES, а ефективність накопичення становить приблизно 52 – 71 %. Зазначена технологія активно розвивається в Китаї та Австралії. Недоліком її застосування є необхідність підземних резервуарів для накопичення стисненого повітря.

Теплові накопичувачі енергії (ТНЕ, Thermal energy storage (TES)) – накопичувачі, що забезпечують зберігання та передачу теплової енергії відповідно до потреб. Як правило, тепла енергія може накопичуватися у таких формах, як прихована теплота (накопичується при фазовому переході в носіях зберігання), раціональне тепло (матеріал накопичення не зазнає жодних змін форм – енергія зберігається шляхом нагрівання бетону, солі, кераміки тощо) та термохімічне накопичення. Зберігання прихованого тепла забезпечує кращу ємність зберігання з мінімальними вимогами до об'єму завдяки використанню матеріалів із зміною фази порівняно з формою раціонального тепла, а термохімічне накопичення базується на оборотних ендо- або екзотермічних хімічних реакціях, що дозволяє зберігати енергію протягом тривалого часу з мінімальними втратами.

Існує багато різновидів ТНЕ, однак ми розглянемо тільки ті, що придатні для накопичення значних обсягів електроенергії. Одним із прикладів є технологія Rondo Heat Battery, яка реалізована компанією Rondo Energy. Ця система використовує вогнетривкі блоки, які нагріваються до температури 1200 °C за допомогою електроенергії, отриманої з ВДЕ. Тепло зберігається до 24 годин і може бути використане безпосередньо в промисловому процесі або для виробництва пари/електроенергії. В одному з пілотних проєктів у Каліфорнії система потужністю 2,4 МВт забезпечує понад 50 МВт·год накопиченої енергії на добу з тепловими втратами

в межах 1 %. Система має низьку капітальну вартість (менше 50 \$/кВт·год) і орієнтована на заміщення викопного палива в промисловому теплопостачанні. На даний момент компанія пропонує до впровадження накопичувачі потужністю 7 і 20 МВт, ємністю 100 та 300 МВт·год-відповідно [16].

Поки що через невисокий ККД в межах 35 – 50 % (електроенергія → тепло → електроенергія) технології ТНЕ більш придатні як накопичувачі енергії для систем теплопостачання, однак широко ведуться дослідження, зокрема фахівцями університету Райса, де теплові випромінювачі перетворюють тепло на електроенергію за допомогою світла для фотоелектричних елементів з ККД перетворення ~60 % [17].

Магнітні надпровідникові накопичувачі (індукційні, Superconducting magnetic energy storage (SMES)), у яких енергія зберігається в полі надпровідної електромагнітної котушки. Для створення надпровідності електромагнітні котушки охолоджують до надкритично низьких температур за допомогою криогенної установки. При цьому втрати енергії в котушці майже відсутні. Енергія за потреби може бути легко перетворена спочатку в постійний струм, а потім в змінний. Ефективність перетворення складає понад 95%. Проте така технологія є однією з найскладніших та найбільш вартісних технологій зберігання енергії [18].

Перспективи використання індуктивних накопичувачів енергії пов'язують з тим, що через свою швидкодію їх можна використовувати як компенсуючий елемент потужності для підтримки стабільності електричної мережі. Для альтернативних джерел енергії ці накопичувачі можуть бути використані для мінімізації коливань потужності в діапазоні від декількох секунд до кількох хвилин, а також в енергетичних системах майбутнього та для інтеграції з іншими технологіями зберігання. Очікується, що такі гібридні системи матимуть значні переваги в енергетичних системах та застосуваннях.

Суперконденсаторні накопичувачі енергії (Super Capacitor Energy Storage (SES)) – для накопичення енергії використовують електричне поле, як і звичайні конденсатори, але мають набагато більшу щільність зберігання енергії, яка дозволяє їм накопичувати і віддавати велику кількість електричної енергії [19].

Основними перевагами суперконденсаторних накопичувачів є висока швидкість реакції, заряду та розряду, можливість розрядження до нуля, високий ККД циклу, проста конструкція зарядного пристрою, термін служби (10 – 15 років) та відносно невелика маса. До недоліків можна віднести меншу питому енергію в порівнянні з акумуляторами на основі літію (1 – 10 Вт·год/кг проти 100 – 265 Вт·год/кг) та високе саморозрядження порівняно з акумуляторними системами.

Суперконденсаторні системи можуть використовувати для стабілізації електричних мереж, для гасіння короточасних падінь напруги і стабілізації енергопостачання. Суперконденсатори у цих системах забезпечують миттєву підтримку енергії протягом кількох секунд або хвилин до повного відновлення напруги з основного джерела. Вони мають широкі можливості для застосування у електротранспорті та у гібридних системах накопичення енергії з метою збільшення швидкості реакції системи [20].

Електрохімічні накопичувачі енергії – це накопичувачі, у яких електроенергія виступає в якості ініціатора хімічних реакцій, які за потреби перетворюють її знову в електричну, шляхом зворотних реакцій в накопичувачі.

Водневе накопичення енергії (Hydrogen energy storage (HES)). У зазначеній системі накопичення електроенергія використовується для електролізу води з метою отримання водню. За потреби відбувається спалювання водню у водневій газовій турбіні чи в двигуні внутрішнього згорання та приводиться в дію генератор, який виробляє електроенергію, або за допомогою процесу зворотного електролізу з використанням паливного елементу. При цьому, шляхом реакції з'єднання водню та кисню виділяється енергія та утворюється вода. Водень за своїми характеристиками є універсальним, безпечним, екологічно чистим енергоносієм та має високу щільність накопичення енергії, його можна зберігати як у зрідженому чи стисненому стані, так і за допомогою абсорбції гідридів металів або вуглецевих нанотрубок.

Для комбінації «електролізер - паливна комірка» коефіцієнт рекуперації електроенергії може становити понад 40 %, що для енергогенеруючих установок на базі ВДЕ є цілком прийнятним [21].

Проточний акумулятор (Flow Batteries) – це тип електрохімічних накопичувачів, який складається з двох хімічних компонентів, розчинених у рідині, розділених мембраною. Його можна назвати вдосконаленою технологією водно-електролітичного акумулятора, і він є проміжною технологією між звичайними паливними елементами та акумуляторами [22]. Цей тип акумулятора відрізняється від звичайних вторинних акумуляторів тим, що один або декілька активних компонентів розчинені в електроліті, тобто в електроліті і зберігається енергія. Зарядка і розрядка акумулятора відбувається шляхом перенесення іонів від одного компонента до іншого через мембрану, яка виконує функцію силового ядра, перетворюючи хімічну енергію на електроенергію. Таким чином, проточні акумулятори складаються з активних електролітів і не мають саморозряду. Додатковий електроліт зберігається у двох окремих зовнішніх резервуарах, прокачується через реактор і викликає хімічну реакцію. Електроліти розділені мікроскопічною мембраною, яка дозволяє обмеженій кількості іонів проходити через неї. Ці іони беруть участь в реакціях окислення та відновлення всередині реактора, завдяки чому виробляється електроенергія. Проточні акумулятори, попри свої переваги, поки що не набули широкого комерційного впровадження. Основні причини цього пов'язані з економічними, технологічними та інфраструктурними бар'єрами, хоча ця технологія є перспективною для впровадження у ВДЕ. Схема проточного акумулятора показана на (рис. 7).

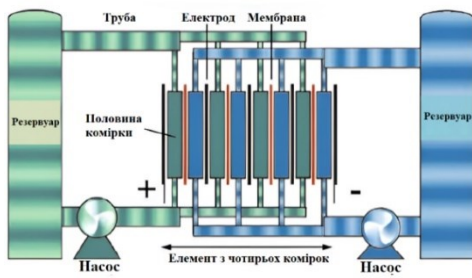


Рис.7. Схематичне зображення проточного акумулятора



Рис.8. Акумуляторна система накопичення промислового масштабу (BESS)

Акумуляторні накопичувачі (battery energy storage system (BESS)) – пристрої, які використовують для накопичення електроенергії і в яких вона акумулюється у формі хімічної енергії, яка при споживанні перетворюється назад в електричну. Принцип їхньої дії базується на електрохімічних реакціях, що відбуваються між електродами й електролітом [23]. Залежно від типу батареї її номінальна потужність може варіюватись від сотень Вт, до декількох МВт у великих стаціонарних системах зберігання енергії. Ефективність акумуляторів також значно відрізняється: для свинцево-кислотних батарей вона становить близько 70 ... 85 %, тоді як літій-іонні системи можуть досягати 90 ... 95 %. За останні роки виробництво та асортимент акумуляторних батарей значно виросло завдяки широкому використанню в електромобілях, портативній електроніці та системах відновлюваної енергетики. На (рис. 8) [24] зображена акумуляторна система накопичення.

Існує велика кількість типів акумуляторних батарей: літій – іонні, літій-залізо-фосфатні, літій-титан оксидні, свинцево-кислотні, сірчано-натрієві, натрій-іонні, натрій-нікель-хлоридні, залізо-хромові і т.д.

Найбільш перспективними сьогодні серед електрохімічних накопичувачів енергії для ВДЕ, є:

- літій-залізо-фосфатні (LFP) – вже стають стандартом для використання в домашніх/комерційних системах ВДЕ.
- літій-титан-оксидні (LTO) – поки що через високу вартість та низьку щільність енергії використовують в критичних або довготривалих/циклічних системах.
- ванадієві проточні (ванадієвий редокс) (VRFB) – перспективні для великих промислових накопичувачів, де важлива довговічність і незалежне масштабування (при якому потужність залежить від розміру комірок, електродів та мембран), а ємність (обсяг збереженої енергії) залежить від об'єму ванадієвого електроліту в резервуарах), але висока вартість і складність систем є перешкодою для їх широкого впровадження.
- натрій-іонні (Na-ion) – сьогодні активно розвиваються, як альтернатива літійовим накопичувачів, потенційно більш дешеві і здатні зменшити залежність від літію. Поки що це ще досить молода технологія, але вже пілотні проекти з їх використання для ВДЕ впроваджуються у Китаї та плануються у США.

Характеристики найперспективніших електрохімічних накопичувачів енергії, їх переваги та недоліки на підставі даних, наведених у [20, 22,23,25] приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики найперспективніших електрохімічних накопичувачів енергії.

Тип акумулятора	Щільність енергії, Вт·год/кг	Питома потужність, (Вт/кг)	Ресурс (циклів)	Температурний діапазон роботи	ККД, %	Вартість, \$/кВт·год	Переваги	Недоліки
LFP (літій-залізо-фосфатний)	90 ... 120	300 ... 1500	3000 ... 5000	-20 ... +75 °C	90 ... 95	200–350	Стабільність; Довговічність; Безпечність	Нижча енергетична щільність; Посередня продуктивність при низьких температурах
LTO (літій-титан-оксидний)	70 ... 100	200 ... 1000	5000 ... 7000	-30 ... +55 °C	92 ... 96	400–600	Надзвичайна довговічність; Дуже швидка зарядка;	Висока вартість; Низька енергетична щільність
Na-ion (натрій-іонний)	80 ... 150	200 ... 500	2000 ... 4000	-20 ... +60 °C	85 ... 90	150–400	Дешевизна матеріалів; Безпечність	Менш зрілий ринок; Нижча щільність,
VRFB (ванадієвий редокс)	20 ... 40	100 ... 200	>12000	+10 ... +40°C	68 ... 75	300–800	Тривалий термін служби (>20р.); Незалежне масштабування	Велика маса; Висока вартість ванадію

Гібридні системи зберігання енергії (мультинакопичувачі, Hybrid Energy Storage Systems (HESS)) об'єднують кілька технологій, щоб забезпечити більш комплексне та гнучке рішення для систем відновлюваної енергії. Якщо поєднувати різні технології, то утворені гібридні системи можуть максимізувати переваги кожної технології, мінімізуючи їхні недоліки. Вибрана система буде залежати від таких факторів, як конкретні вимоги системи до накопичення енергії з використанням ВДЕ, наявні ресурси та інфраструктура.

Одним із яскравих прикладів такого поєднання є удосконалений НЕСП (ACAES), де поєднані технології НЕСП та перенесення і накопичення тепла з метою збільшення ККД [15]. Іншим цікавим приладом є поєднання акумуляторів та суперконденсаторів для вирівнювання коливань потужності в системах відновлюваної енергетики або систем з акумуляторами (для щоденних коливань) та воднем (для сезонних коливань). У [20] розглядаються різні комбінації для реалізації гібридних систем. Створення гібридних систем накопичення має і свої недоліки, а саме: висока складність управління, складні алгоритми керування енергією та вища вартість початкової інтеграції.

В табл. 2 приведено узагальнені характеристики різних систем накопичення енергії, отримані на підставі даних, наведених у [1, 13 – 15, 20, 22, 23, 25]

Таблиця 2

Характеристики накопичувачів енергії

Тип накопичувача	Щільність енергії (Вт·год/кг)	Потужність	Час розрядження	Термін зберігання	Термін експлуатації (років)	ККД (%)
Кінетичні накопичувачі (FES)	2,5-1200	0-250 кВт	1мс.-15хв.	1с. – 1 хв.	±15	85-95
ARES (GES)	-	100-3000 МВт	30с. - 1 год.	год.-місяць	40+	75-85
G-VAULT (GES)	1,06	40-150 МВт	30с. - 1 год.	год.-місяць	30+	75-80
ГАЕС (PHES)	0,5-2	100-5000МВт	1-24 год.	год.-місяць	40-60	66-75
Накопичувачі енергії на стисненому повітрі (CAES)	30-60	5-300 МВт	1-24 год.	год.-місяць	20-60	40-70
Удосконалений адіабатичний НЕСП (AA-CAES)	60–80	10-500 МВт	4–24 год	год – місяць	20-40	70–75 (80 у прототипах)
Накопичувач на зрідженому повітрі (LAES)	70–120	5–300 МВт	4–20 год	год – місяць	25–30	50–70
Теплові накопичувачі (TES)	10–200	10кВт-500 МВт	1–24 год	год-тиждень	20–30	35–50%
Магнітні напівпровідникові (SMES)	0,5-5	100кВт-10МВт	1мс.-8с.	1хв.-1год.	20+	95-98
Суперконденсаторні накопичувачі (SES)	2,5-15	0-300 кВт	1мс.-60хв.	1с. - 1год.	20+	90-95
Воденева (HES) (електроліз-пал. ел.)	800-10000	0-50 МВт	1с. - 24+ год.	год.-місяць	5-15	20-35
Проточні акумулятори (Flow Batteries)	20–40	10 кВт – 100 МВт	2–10 год	год – місяць	10–20	65–85
Акумуляторні (Li-ion)	100-180	0-100 кВт	1хв. - 1 год.	до 24 год	7-15	85-90
Акумуляторні (LiFePO ₄)	90–120	0–100 кВт	30 хв – 2 год	до 24 год	10–20	90–95
Акумуляторні (LTO)	70–100	0–100 кВт	6 хв – 1 год	до 24 год	15–25	92–96
Акумуляторні (Na-ion)	80–150	0–50 кВт	30 хв – 2 год	до 24 год	10–15	85–90

Розглянувши вищезгадані технології накопичення енергії, можна зробити висновок, що кожна з них має свої характеристики, функції та обмеження, які зі свого боку стають факторами, що визначають можливості до їх застосування для вирішення функціональних потреб в енергетичних системах з ВДЕ. Застосування відновлюваних джерел енергії потребує рішень для нівелювання щоденних та сезонних коливань потужності, найбільш перспективними серед яких (рішень) є відповідно застосування ГАЕС,

акумуляторних накопичувачів, проточних акумуляторів та НЕСП, водневих акумуляторів. Для підвищення миттєвої стабільності та якості електроенергії доцільним є застосування кінетичних та електричних накопичувачів. Технології ТНЕ більш придатні для акумуляування теплової енергії (поки без подальшого перетворення в електричну) або для підвищення ефективності інших систем.

У подальшому розглянемо практику впровадження СНЕ у світі та Україні, зосереджуючи увагу на акумуляторних накопичувачах як найбільш універсальному рішенні для енергетичних систем із значною часткою ВДЕ.

Країнами, у яких найбільш широко використовуються системи накопичення енергії є Китай та Сполучені Штати Америки. За даними BloombergNEF, у США та Китаї розпочинається десятиліття розвитку систем зберігання енергії [27]. Сполучені Штати Америки є одним із найбільших і динамічніших ринків систем накопичення енергії у світі, що характеризується стабільним темпом зростання, внаслідок активного впровадження відновлюваних джерел енергії та розвитку технологій акумуляування. За висновками Управління енергетичної інформації США (EIA), у 2023 році потужність систем зберігання сягала 16 ГВт. Планується, що протягом 2024 року вони зростуть до 30 ГВт. У США до 2030 року на кожні 25 ГВт сонячної енергії очікується 50 ГВт мережевих акумуляторних накопичувачів [28]. Велика кількість наявних і запланованих сонячних і вітрових потужностей в США, зокрема в штатах Каліфорнія та Техас, викликає зростаючу потребу в накопичувачах. Очікується, що в 2024 року в Техасі буде доступно близько 4,5 ГВт таких потужностей [28].

Згідно з інформацією Китайського альянсу зі зберігання енергії (CNESA) [29], за підсумками 2023 року встановлена потужність систем накопичення енергії (всі типи, включаючи ГАЕС та теплові сховища електроенергії) у КНР склала 86,5 ГВт, збільшившись на 45% порівняно з 2022 роком. При цьому, частка застосування нових технологій накопичення і зберігання енергії зросла з 21% у 2022 році, до майже 40 відсотків у 2023 році [29]. Так, на кінець 2023 року, сукупна встановлена потужність накопичувачів розроблених за новими технологіями (до яких відносяться батареї, пневмоакумулятори, тощо) у КНР становила 34,5 ГВт, ємністю 74,5 ГВт·год. Тільки за 2023 рік, Китай впровадив 21,5 ГВт потужності СНЕ, ємністю 46,36 ГВт·год, що втричі перевищує показники 2022 року. Найбільш популярними СНЕ, при цьому, стали створені на основі літій-іонних акумуляторів, частка яких у встановлені потужності за 2023 рік досягла 97,3 %. Всього, у 2023 році було розроблено 2500 нових проєктів із накопичення та зберігання енергії. Також, побудовано та введено в експлуатацію більше сотні об'єктів СНЕ, потужністю понад 100 МВт, кожна. Таким чином, безсумнівно є той факт, що КНР стала світовим лідером за встановленою потужністю та ємністю СНЕ. Впровадженням нових потужних систем накопичення, Китай намагається вирішити глобальну проблему нестабільності в енергетичних системах, де домінуюче положення займають відновлювальні джерела енергії, сприяючи переходу до зеленої енергетики. Для прикладу: в 2023 році в КНР було введено понад 200 ГВт потужностей, що використовують для виробництва електроенергії сонячну та вітрову енергію.

У країнах Європи, за даними профільного видання Energy-storage, тільки у 2022-му було побудовано та введено СНЕ сумарною потужністю 4,5 ГВт. Лідерами є такі країни як, Німеччина, Велика Британія, та Греція [30]. Європейська асоціація з накопичення енергії заявляє про необхідність збільшення темпів розгортання СНЕ щонайменше до 14 ГВт/рік, щоб досягти цільового показника приблизно 200 ГВт до 2030 року [31]. Згідно з планом Єврокомісії REPowerEU [32] саме такий результат дасть можливість досягти заявленої мети і відмовитися від викопного палива.

Українська енергетика потребує суттєво менших об'ємів систем накопичення енергії – 760 МВт, цей показник залишатиметься актуальним для нашої об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) протягом багатьох років. Компанія ДТЕК спільно з Fluence Energy B.V. планують побудувати в Україні 6 промислових установок зберігання енергії загальною потужністю 200 МВт вже у жовтні 2025 року, до початку зимового сезону 2025–2026 рр, для зміцнення української електромережі в період можливих відключень. Згідно з оприлюдненою інформацією, системи зберігання матимуть потужність від 20 МВт до 50 МВт та будуть розташовані в різних регіонах. Ці накопичувачі забезпечуватимуть можливість балансування частоти та потужності для стабілізації української енергосистеми на замовлення українського оператора системи передачі НЕК «Укренерго» [33].

Слід зазначити, що в електроенергетичній системі України відчувається високий дефіцит маневреної потужності. Для української ОЕС сьогодні основним типом накопичувачів залишаються гідроакумуляуючі електростанції. Проте їх наявні обсяги зберігання енергії є недостатніми для повноцінного забезпечення стійкості та гнучкості енергосистеми. СНЕ здатні розширити можливості для балансування енергосистеми за рахунок можливості швидкого прийому або віддачі електроенергії в мережу, що є їх основною перевагою. Мала тривалість відклику, значна потужність та енергоємність відкривають широкі перспективи для застосування накопичувачів в ОЕС.

У 2020 р. компанія ДТЕК першою в Україні запустила промислову літій-іонну СНЕ потужністю 1 МВт і ємністю 2.25 МВт·год. Це був пілотний проєкт ДТЕК для пошуку оптимальних моделей роботи СНЕ на різних сегментах енергетичного ринку країни [34]. Наприклад, час реакції СНЕ ДТЕК на Запорізькій ТЕС – близько 200 мілісекунд.

Акумуляторні системи накопичення енергії для управління електропостачанням або надання послуг для електромережі є новим рішенням, яке набуває все більшої популярності [35]. Їхня популярність викликана

зростаючими потребами у забезпеченні гнучкості, стабільності та передбачуваності електроенергетичних систем (ЕЕС), у складі яких є значна частка ВДЕ, яка, у поєднанні з тенденцією до зниження вартості впровадження акумуляторних технологій, тільки зростає.

Таким чином, можна вважати, що основною рушійною силою подальшого розвитку СНЕ є широке впровадження електростанцій з використанням альтернативних джерел енергії. Водночас прослідковується пряма залежність росту глобальних потреб у потужності накопичувачів від темпів зростання відновлюваних джерел енергії в загальному енергобалансі, які мають стійку тенденцію до збільшення частки в найближчі десятиріччя.

Висновки

1. Технології накопичення енергії демонструють динамічний розвиток, СНЕ знаходять широке застосування на практиці, використовуються при регулюванні функціональних режимів ЕЕС та керування ними. Системи накопичення енергії підвищують стабільність електромереж, збільшують можливості для інтеграції ВДЕ в енергосистему, підвищують ефективність використання обладнання електромереж та зменшують використання викопних енергоресурсів, що позитивно впливає на екологічні показники та сприяє сталому розвитку електроенергетики. Сьогодні розроблено і впроваджено багато рішень щодо накопичення енергії, але немає однієї універсальної технології для всіх можливих випадків.

2. Як показує проведений огляд і порівняльний аналіз, найбільш вживаною у світі технологією накопичення електричної енергії є ГАЕС, однак вони потребують великих площ під будівництво, великої тривалості впровадження та значних об'ємів для зберігання води.

3. Технологія накопичувачів енергії на стисненому повітрі є найбільш дешевою, але вимагає наявності поблизу енергетичних систем природних або штучних резервуарів.

4. Акумуляторні системи накопичення енергії (АСНЕ) відіграють важливу роль у забезпеченні гнучкості та надійності сучасних електроенергетичних систем. АСНЕ демонструють високу ефективність перетворення енергії (порівняно з іншими накопичувачами, наприклад, ГАЕС), високий ККД, швидкий відклик на зміну навантаження, що є критично важливим для здійснення регулювання частоти, балансування енергії та компенсації пікових навантажень. АСНЕ дозволяють вирішити проблему нестабільності генерації ВДЕ, а в поєднанні із засобами керування та діагностики забезпечать підвищення надійності та стійкості ЕЕС, а також інтегрування альтернативних джерел енергії в електричну мережу.

4. Впровадження систем накопичення енергії дозволяє відмовитися від спорудження великих маневрових генеруючих потужностей із збереженням надійності та довговічності електроенергетичних систем.

5. Сьогодні залишається актуальною розробка альтернативних та гібридних типів накопичувачів, що створить передумови для впровадження розгалуженої мережі систем накопичення, яка здатна максимально ефективно і швидко адаптуватись при можливих змінах технологічних параметрів в енергомережах, вирівнюючи процеси відхилення генерації та споживання.

Література

1. Мирутенко П., Лістовщик Л.К. Накопичувачі енергії. Основні типи та перспективи використання // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 4. – С. 107–116. – DOI: [10.20535/1813-5420.4.2022.273433](https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433).
2. Ould Amrouche S., Rekioua D., Rekioua T., Bacha S. Overview of energy storage in renewable energy systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41, No. 45. – P. 20914–20927. – ISSN 0360-3199. – DOI: [10.1016/j.ijhydene.2016.06.243](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243).
3. Why Solar Systems Shut Down During South Australian Blackouts [Електронний ресурс]. – SolarQuotes Blog, 27 березня 2024 р. – Режим доступу: <https://www.solarquotes.com.au/blog/sa-blackout-solar-disconnect-mb2713/> (дата звернення: 11.04.2025).
4. El sistema eléctrico español saltó por los aires por un exceso de confianza en la energía solar [Електронний ресурс] // El Confidencial. – 29.04.2025. – Режим доступу: https://www.elconfidencial.com/economia/2025-04-29/el-sistema-electrico-espanol-salto-por-los-aires-por-un-exceso-de-confianza-en-la-energia-solar_4118613/ (дата звернення: 04.05.2025).
5. Nkomo N.Z., Alugongo A.A. Flywheel Energy Storage Systems and their Applications: A Review // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2024. – Vol. 72, No. 4. – P. 209–215. – DOI: [10.14445/22315381/IJETT-V72I4P122](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I4P122).
6. Sough M.I., Depernet D., Dubas F., Gaultier G., Belaidi B., Espanet C. High Frequency PMSM and Inverter Losses Analysis – Application to Flywheel System on Real Cycle Operation [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/323322811_High_Frequency_PMSM_and_Inverter_Losses_Analysis-Application_to_Flywheel_System_on_Real_Cycle_operation (дата звернення: 10.04.2025).
7. Гравітаційні поїзди ARES вирішують проблему накопичення енергії [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://www.railway.supply/uk/gravitaczijni-po%97zdi-ares-virishat-problemu-nakopichennya-energi%97/> (дата звернення: 10.04.2025).

8. ARES Nevada Project [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aresnorthamerica.com/nevada-project/> (дата звернення: 10.04.2025).
9. Energy Vault Gallery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energyvault.com/photo-gallery> (дата звернення: 10.04.2025).
10. У Китаї збудували перший у світі великомасштабний гравітаційний акумулятор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-energy.in.ua/novyny/u-kytavi-zbuduvaly-pershyj-u-sviti-velykomasshtabnyj-gravitacijnyj-akumulyator.html> (дата звернення: 10.04.2025).
11. 2024 World Hydropower Outlook [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook> (дата звернення: 10.04.2025).
12. Гідроакумулююча електростанція [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Гідроакумулююча_електростанція (дата звернення: 10.04.2025).
13. Wang R., Zhang L., Shi C., Zhao C. A Review of Gravity Energy Storage // *Energies*. – 2025. – Vol. 18. – Art. 1812. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071812>.
14. Guo J., Ma R., Zou H. Compressed Air Energy Storage and Future Development // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2108. – 012037. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2108/1/012037>.
15. Zhang X., Gao Z., Zhou B., Guo H., Xu Y., Ding Y., Chen H. Advanced Compressed Air Energy Storage Systems: Fundamentals and Applications // *Engineering*. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 246–269. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.12.008>.
16. The Rondo Heat Battery [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://www.rondo.com/products> (дата звернення: 10.04.2025).
17. Quantum-inspired design boosts efficiency of heat-to-electricity conversion [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://news.rice.edu/news/2024/quantum-inspired-design-boosts-efficiency-heat-electricity-conversion> (дата звернення: 10.04.2025).
18. Adetokun B.B., Oghorada O., Abubakar S.J. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 55, Part C. – Art. 105663. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105663>.
19. Zhang J., Gu M., Chen X. Supercapacitors for renewable energy applications: A review // *Micro and Nano Engineering*. – 2023. – Vol. 21. – Art. 100229. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229>.
20. Rekioua D. Energy Storage Systems for Photovoltaic and Wind Systems: A Review // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 9. – Art. 3893. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093893>.
21. Бойко С., Котов О., Вишневецький С., Мельник О., Подгорних Н. Аналіз перспектив впровадження водневої енергетики в енергетичний баланс підприємств авіаційної галузі // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2022. – № 6 (315). – С. 282–286. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-282-286>.
22. Doetsch C., Burfeind J. Vanadium Redox Flow Batteries // *Storing Energy* / ред. Trevor M. Letcher. – Elsevier, 2016. – С. 227–246. – ISBN 9780128034408. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00012-9>.
23. Taabodi M.H., Niknam T., Sharifhosseini S.M., Asadi Aghajari H., Shojaeiyan S. Electrochemical storage systems for renewable energy integration: A comprehensive review of battery technologies and grid-scale applications // *Journal of Power Sources*. – 2025. – Vol. 641. – Art. 236832. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236832>.
24. Amount of energy storage systems or battery container units with solar and turbine farm | Premium Photo [Електронний ресурс] // Freepik. – Режим доступу: https://www.freepik.com/premium-photo/amount-energy-storage-systems-battery-container-units-with-solar-turbine-farm_37255718.htm (дата звернення: 01.05.2025).
25. Bai H. Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems [Електронний ресурс] / Hanyu Bai, Ziyu Song // *Journal of Power Sources*. – 2023. – Т. 580. – С. 233426. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>.
26. Elalfy D.A., Gouda E., Kotb M.F., Bureš V., Sedhom B.E. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends // *Energy Strategy Reviews*. – 2024. – Vol. 54. – Article 101482. – ISSN 2211-467X. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
27. У США та Китаї розпочинається ера зберігання енергії – інфографіка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-ssha-ta-kitai-rozpochinaetsya-era-zberigannya-energiyi-infografika/> (дата звернення: 12.04.2025).
28. У США потужності зберігання енергії можуть зрости на 89% у 2024 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-ssha-potuzhnosti-zberigannya-energiyi-mozhut-zrosti-na-89-u-2024-roci/> (дата звернення: 12.04.2025).
29. У Китаї відзначається експоненційне зростання систем накопичення енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-energy.in.ua/novyny/u-kitavi-vidznachayetsya-eksponenciijne-zrostannya-sistem-nakopichennya-energiyi.html> (дата звернення: 09.03.2025).
30. Europe reached 4.5GW of battery storage installed in 2022, could hit 95GW by 2050 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.energy-storage.news/europe-reached-4-5gw-of-battery-storage-installed-in-2022-could-hit-95gw-by-2050/> (дата звернення: 10.04.2025).

31. Energy Storage Targets 2030 and 2050 // EASE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ease-storage.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/> (дата звернення: 10.04.2025).
32. REPowerEU – affordable, secure and sustainable energy for Europe [Електронний ресурс]. – European Commission. – Режим доступу: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en (дата звернення: 10.04.2025).
33. В Україні побудують систему накопичення енергії на 200 МВт [Електронний ресурс] // Укрінформ. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3948078-v-ukraini-pobuduut-sistemu-nakopichennja-energi-na-200-mvt.html> (дата звернення: 09.04.2025)
34. ДТЕК запустив першу в Україні промислову систему накопичення енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-energi/> (дата звернення: 10.04.2025).
35. Комерційні системи накопичення енергії [Електронний ресурс]. – Solarity. – Режим доступу: <https://solarity.eu/ua/blog/kommercijni-sistemy-nakopycennja-enerhiji/> (дата звернення: 10.04.2025).

References

1. Myrutenko, P., & Listovshchik, L. K. (2022). Nakopychuvači energiyi. Osnovni typy ta perspektyvy vykorystannya. Energetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya, (4), 107–116. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433>
2. Ould Amrouche, S., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. International Journal of Hydrogen Energy, 41(45), 20914–20927. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>
3. Why solar systems shut down during South Australian blackouts [Electronic resource]. (2024, March 27). SolarQuotes Blog. <https://www.solarquotes.com.au/blog/sa-blackout-solar-disconnect-mb2713/>
4. El sistema eléctrico español saltó por los aires por un exceso de confianza en la energía solar [Electronic resource]. (2025, April 29). El Confidencial. https://www.elconfidencial.com/economia/2025-04-29/el-sistema-electrico-espanol-salto-por-los-aires-por-un-exceso-de-confianza-en-la-energia-solar_4118613/
5. Nkomo, N. Z., & Alugongo, A. A. (2024). Flywheel energy storage systems and their applications: A review. International Journal of Engineering Trends and Technology, 72(4), 209–215. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I4P122>
6. Sough, M. I., Depernet, D., Dubas, F., Gaultier, G., Belaidi, B., & Espanet, C. (2018). High Frequency PMSM and Inverter Losses Analysis – Application to Flywheel System on Real Cycle Operation [Electronic resource]. https://www.researchgate.net/publication/323322811_High_Frequency_PMSM_and_Inverter_Losses_Analysis-Application_to_Flywheel_System_on_Real_Cycle_operation
7. Hravitatsiyni poizdy ARES vyrishtat problemy nakopychennya energiyi [Electronic resource]. (2025). <https://www.railway.supply/uk/gravitaczijni-poizdy-ares-virishat-problemu-nakopichennya-energiya-d1%97/>
8. ARES Nevada Project [Electronic resource]. <https://aresnorthamerica.com/nevada-project/>
9. Energy Vault Gallery [Electronic resource]. <https://www.energyvault.com/photo-gallery>
10. U Kytayi zbuduvaly pershyi u sviti velykomasshtabnyi hravitatsiynyi akumuliyator [Electronic resource]. <https://e-energy.in.ua/novyny/u-kytayi-zbuduvaly-pershyj-u-sviti-velykomasshtabnyj-gravitacijnyj-akumulyator.html>
11. 2024 World Hydropower Outlook [Electronic resource]. <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook>
12. Hidroakumulyuyucha elektrostantsiya [Electronic resource]. (2025). https://uk.wikipedia.org/wiki/Гідроакумуюча_електростанція
13. Wang, R., Zhang, L., Shi, C., & Zhao, C. (2025). A review of gravity energy storage. Energies, 18, 1812. <https://doi.org/10.3390/en18071812>
14. Guo, J., Ma, R., & Zou, H. (2021). Compressed air energy storage and future development. Journal of Physics: Conference Series, 2108, 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2108/1/012037>
15. Zhang, X., Gao, Z., Zhou, B., Guo, H., Xu, Y., Ding, Y., & Chen, H. (2024). Advanced compressed air energy storage systems: Fundamentals and applications. Engineering, 34(3), 246–269. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.12.008>
16. The Rondo Heat Battery [Electronic resource]. (2025). <https://www.rondo.com/products>
17. Quantum-inspired design boosts efficiency of heat-to-electricity conversion [Electronic resource]. (2024). <https://news.rice.edu/news/2024/quantum-inspired-design-boosts-efficiency-heat-electricity-conversion>
18. Adetokun, B. B., Oghorada, O., & Abubakar, S. J. (2022). Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. Journal of Energy Storage, 55(Part C), 105663. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105663>
19. Zhang, J., Gu, M., & Chen, X. (2023). Supercapacitors for renewable energy applications: A review. Micro and Nano Engineering, 21, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229>
20. Rekioua, D. (2023). Energy storage systems for photovoltaic and wind systems: A review. Energies, 16(9), 3893. <https://doi.org/10.3390/en16093893>
21. Boiko, S., Kotov, O., Vyshnevskiy, S., Melnyk, O., & Podhomnykh, N. (2022). Analiz perspektyv vprovadzhennya vodneyoyi enerhetyky v enerhetychnyi balans pidpryemstv aviatsiynoyi haluzi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6) 315, 282–286. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-282-286>
22. Doetsch, C., & Burfeind, J. (2016). Vanadium redox flow batteries. In T. M. Letcher (Ed.), Storing energy (pp. 227–246). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00012-9>
23. Taabodi, M. H., Niknam, T., Sharifhosseini, S. M., Aghajari, H. A., & Shojaeiyan, S. (2025). Electrochemical storage systems for renewable energy integration: A comprehensive review of battery technologies and grid-scale applications. Journal of Power Sources, 641, 236832. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236832>
24. Amount of energy storage systems or battery container units with solar and turbine farm [Electronic resource]. Freepik. https://www.freepik.com/premium-photo/amount-energy-storage-systems-battery-container-units-with-solar-turbine-farm_37255718.htm
25. Bai, H., & Song, Z. (2023). Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems. Journal of Power Sources, 580, 233426. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>
26. Elalfy, D. A., Gouda, E., Kotb, M. F., Bureš, V., & Sedhom, B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. Energy Strategy Reviews, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>
27. U SSHa ta Kytayi rozpochynayetsya era zberihannya energiyi – infografika [Electronic resource]. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-ssha-ta-kitai-rozpochynayetsya-era-zberigannya-energiya-infografika/>
28. U SSHa potuzhnosti zberihannya energiyi mozhut zrosti na 89% u 2024 rotsi [Electronic resource]. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-ssha-potuzhnosti-zberigannya-energiya-mozhut-zrosti-na-89-u-2024-roci/>

29. U Kytayi vidznachayetsya eksponentsiine zrostantnya system nakopychennya energiyi [Electronic resource]. <https://energy.in.ua/novyny/u-kitayi-vidznachayetsya-eksponencijne-zrostantnya-sistem-nakopichennya-energiyi.html>
30. Europe reached 4.5GW of battery storage installed in 2022, could hit 95GW by 2050 [Electronic resource]. <https://www.energy-storage.news/europe-reached-4-5gw-of-battery-storage-installed-in-2022-could-hit-95gw-by-2050/>
31. Energy Storage Targets 2030 and 2050 [Electronic resource]. EASE. <https://ease-storage.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/>
32. REPowerEU – affordable, secure and sustainable energy for Europe [Electronic resource]. European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
33. V Ukraini pobuduyut systemu nakopychennya energiyi na 200 MWt [Electronic resource]. Ukrinform. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3948078-v-ukraini-pobuduut-sistemu-nakopicenna-energii-na-200-mvt.html>
34. DTEK zapustyv pershu v Ukraini promyslovu systemu nakopychennya energiyi [Electronic resource]. <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-energii/>
35. Komertsiyni systemy nakopychennya energiyi [Electronic resource]. Solarity. <https://solarity.eu/ua/blog/komercijni-systemy-nakopycennja-enerhiji/>