

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Т.Л. Кацадзе *, канд. техн. наук, Д.В. Щербина **

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: teymuraz@ukr.net, djdimas75@gmail.com

У статті здійснено комплексний огляд і аналіз сучасних систем накопичення енергії (СНЕ), які відіграють ключову роль у стабілізації електроенергетичних мереж в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії. Розглянуто основні технології зберігання: механічні (гідроаккумуляційні, маховики, гравітаційні), хімічні (водень, аміак, синтетичні палива), електрохімічні (літій-іонні, натрій-іонні, редокс-флоу батареї), електромагнітні (суперконденсатори, SMES), теплові та кріогенні (LAES). Для кожної групи систем проаналізовано техніко-економічні характеристики: коефіцієнт корисної дії, енергетичну щільність, тривалість циклу, термін служби, питому вартість, екологічну безпеку та особливості утилізації. Особливу увагу приділено прикладам впровадження та перспективам розвитку технологій. Визначено оптимальні сфери застосування різних типів СНЕ: механічні та кріогенні системи – для довгострокового та масштабного зберігання, електрохімічні – для середньострокового балансування та мобільних застосувань; електромагнітні – для миттєвого регулювання; теплові – для централізованого теплопостачання. Показано, що майбутній розвиток енергосистем пов'язаний з інтеграцією гібридних рішень, стандартизацією технічних вимог та економічним стимулюванням інноваційних технологій. Отримані результати можуть бути використані для формування стратегій впровадження ефективних СНЕ у національних та локальних енергетичних системах. Бібл. 34, табл. 2.

Ключові слова: системи накопичення енергії, відновлювані джерела енергії, електрохімічні батареї, гідроаккумуляція, кріогенні технології, суперконденсатори, теплове зберігання, гібридні системи.

Вступ. Одним із головних напрямів розвитку світової енергетики є глобальний перехід до розподіленої генерації, який базується на широкому впровадженні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). ВДЕ відносять до джерел негарантованої потужності, виробіток електричної енергії яких визначається часом доби, погодними умовами та низкою інших факторів. За умов зростання частки ВДЕ в енергетичному балансі електроенергетичних систем актуальним стає питання впровадження ефективних систем накопичення енергії (СНЕ), призначених для балансування режиму енергосистеми. Сучасні СНЕ є не тільки ключовим елементом інтелектуальних енергетичних систем, але й сприяють підвищенню надійності енергопостачання, зменшенню залежності від вугільно-орієнтованих типів палива та оптимізації роботи генеруючих потенціалів. СНЕ набуває вагомого значення як у централізованих енергетичних мережах, так і у локальних мікромережах, промисловому виробництві, транспортній інфраструктурі та побутовому модулі.

Технологічний прогрес у галузі накопичувальної сфери охоплює широкий діапазон технічних рішень – від традиційного механічного і гідроакмулювання до сучасних електрохімічних, кріогенних та гібридних технологій. Кожен із типів СНЕ має свої технологічні переваги, обмеження та область оптимального використання, тому обрання конкретного виду СНЕ вимагає детального техніко-економічного аналізу.

Метою дослідження є комплексний аналіз відомих технічних рішень реалізації СНЕ.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано огляд відомих технологій СНЕ, проаналізовано їхні техніко-економічні показники, визначено сильні та слабкі сторони у типових алгоритмах експлуатації та визначено перспективи їхньої інтеграції в сучасні електроенергетичні системи.

Матеріали та результати досліджень.

Сучасні СНЕ охоплюють широкий спектр пристроїв та комплексів, які реалізують найрізноманітніші способи перетворення надлишкової електричної енергії на іншу форму. Відповідно до принципу перетворення можна виділити такі види СНЕ:

- механічні (гідроакмулюючі, гравітаційні, маховики);

- хімічні (водень, аміак, синтетичні палива);
- електрохімічні (літій-іонні, натрій-іонні, редокс-флюо батареї);
- електромагнітні (суперконденсатори, SMES);
- теплові;
- криогенні (LAES).

Огляд технологій систем накопичення енергії. Розглянемо детальніше характеристики кожного з типів СНЕ, зокрема проаналізуємо такі показники експлуатаційної ефективності: коефіцієнт корисної дії (ККД), щільність енергії, тривалість циклу та терміну служби, питома вартість одиниці збереженої енергії, екологічна безпека та утилізація.

Механічні накопичувачі енергії. Механічні системи накопичення енергії реалізують комбіноване перетворення електричної енергії в потенційну або кінетичну форму, забезпечуючи зберігання надлишкової енергії та балансування режиму електроенергетичної системи. До ключових технологій механічних СНЕ належать підймальна гідроакумуляція, технології стискування повітря, використання обертових мас маховиків та гравітаційні накопичувачі [1].

Гідроакумуляуючі електростанції (Pumped-storage hydroelectricity, PHS) є найбільш поширеною технологією, на яку припадає близько 96 % загальної потужності зберігання енергії в електроенергетичних системах світу. Гідроакумуляуюча станція в окрузі Бат (Вірджинія, США) є найбільшою ГАЕС у світі з потужністю понад 3000 МВт і зберіганням енергії близько 24 000 МВт·год. ККД технології гідроакумуляування становить 75–85 %. Обладнання PHS характеризується високою надійністю, довговічністю (до 100 років), економічністю в обслуговуванні [1, 2].

Системи стиснутого повітря. (Compressed Air Energy Storage, CAES) зберігають енергію у формі стиснутого повітря в підземному сховищі. При надлишковій енергії повітря стискається компресорами, а за необхідності подача видається через велику турбіну для вироблення електричної енергії. Донедавна ККД такої технології становило близько 50–60 %, але новий спосіб з термодинамічною рекуперацією (ізотермічні-CAES) може досягати показників до 70–80 % [3].

Маховикові накопичувачі енергії (FES, Flywheel Energy Storage) працюють завдяки швидкому обертанню ротора у вакуумі з використанням магнітних підшипників. Вони відзначаються дуже коротким часом відгуку (долі секунди), високою потужністю, довговічністю (до мільйонів циклів) та екологічністю. Новітні моделі характеризуються ККД до 85–90 % завдяки легким композитним матеріалам та технологіям магнітної левітації, які знижують тертя [4].

Гравітаційні накопичувачі енергії (Gravity Energy Storage, GES) – одна з найновіших технологій, яка використовує підйом і опускання великих мас для зберігання потенційної енергії. Найбільш інноваційним рішенням є Tower based SGES: система Energy Vault піднімає 35-тонні блоки у башті висотою 120 м, що забезпечує ККД близько 75–80 % та розрядну потужність 4 МВт при збереженні енергії протягом 8–16 годин [5, 6].

Механічні СНЕ характеризуються такими показниками. Енергетична щільність механічних систем зазвичай низька. У класичних гідроакумуляуючих станціях вона складає близько 0,5–1,5 Вт·год/кг залежно від висоти сховища та об'єму води; гравітаційні системи типу Energy Vault можуть мати щільність 5–10 Вт·год/кг. Маховики мають щільність в межах від 20 до 80 Вт·год/кг, але зазвичай використовуються для накопичення електричної потужності на короткий час. Механічні накопичувачі мають надзвичайно довгий термін служби. Гідроакумуляуючі станції працюють понад 50 років із мінімальною деградацією. Гравітаційні системи розраховані приблизно на 25...30 років експлуатації. Маховики працюють навіть до 20–100 тисяч циклів без значної втрати ємності, що набагато краще електрохімічних аналогів. Вартість на одиницю збереженої енергії залежить від масштабу та інфраструктури. Для гідроакумуляуючих систем вона може залишатися у межах \$50–200/кВт·год. Гравітаційні системи (за проміжними оцінками пілотних проєктів) – орієнтовно \$100–250/кВт·год. Маховики – від \$400/кВт·год, якщо використовуються надпровідні підвіси або вакуумні камери, і тому їх

рідко використовують для масштабного зберігання. Механічні накопичувачі енергії в цілому вважаються екологічно безпечними, оскільки застосовують інертні матеріали – воду, бетон, сталь та не містять токсичних речовин. Гідроакумуляуючі станції впливають на водні екосистеми, але застосування закритих контурів суттєво зменшує цей вплив. Гравітаційні системи та маховики легко утилізують або перевикористовують, тому що вони не утворюють шкідливі відходи під час експлуатації [4, 5].

Хімічні накопичувачі енергії. Системи накопичення хімічної енергії (Chemical Energy Storage, CES) включають термохімічне накопичення, виробництво водню, синтетичного газу або аміаку через електроліз чи інші хімічні реакції з наступним використанням енергії у вигляді палива або хімічних носіїв. Паливні елементи на базі водню та синтетичного газу (SNG) передбачають виробництво, зберігання та використання водню, аміаку або метану. Збереження водню у металевих гідридах наприклад, MgH_2 чи хемосорбентах із високою енергетичною щільністю вимагає високої температури та складних матеріалів. Метанація CO_2 з воднем дають змогу інтегрувати хімічне накопичення з паралельними технологіями виробництва палива та хімічної сировини [7–10].

Хімічні СНЕ мають дуже високу питому щільність. Наприклад, водень, стиснений до 700 бар, має щільність приблизно 33,3 кВт·год/кг, а в формі аміаку щільність досягає 5,2 кВт·год/кг. Синтетичні палива можуть досягати щільності 10-12 кВт·год/кг, що робить їх зручними для зберігання та транспортування. Воднева енергетика має доволі низький ККД на повному циклі – електроліз, зберігання, транспорт, використання у паливних елементах – такий показник, зазвичай, не переходить межу 30–45 %. Якщо використовується синтетичне паливо, ККД ще нижчий – близько 25–35 %, особливо при конверсії енергії через ДВЗ або турбіни. Хімічні СНЕ накопичення не втрачають своїх властивостей після декількох тисяч циклів. Водень або аміак можуть зберігатися без витоків протягом місяців або навіть років. Самі хімічні речовини не втрачають енергію, хоча обладнання (електролізери, паливні елементи) має обмежений термін експлуатації, який становить приблизно 50–80 тисяч годин роботи [7].

На сьогодні вартість зберігання водню з урахуванням електролізу, стиснення та зберігання становить від 250 до 600 доларів за кВт·год. Зі введенням у широке використання очікується, що до 2030 року ця вартість знизиться до 100 доларів за кВт·год [8].

Поряд із воднем перспективними є аміак (NH_3) та синтетичне паливо (e-fuels). Аміак може зберігати енергію компактніше, ніж водень у газовій формі, і при його використанні у паливних елементах або спалюванні утворюється азот та вода, тобто немає викидів CO_2 . Основні виклики полягають у токсичності та контролі утворення NO_x при спалюванні [9].

Синтетичне паливо отримують шляхом метанації CO_2 з воднем і можуть застосовуватися як метан, метанол або синтетичний дизель. Таке паливо сумісне з наявною інфраструктурою та забезпечує довготривале зберігання, однак має нижчий ККД перетворення електроенергії у паливо та потребує додаткових капіталовкладень [10].

Електрохімічні накопичувачі енергії. Електрохімічні системи зберігання енергії (Electrochemical Energy Storage, EES) базуються на акумуляторних батареях та редокс-флоу системах, де електроенергія накопичується та вивільняється в результаті електрохімічних реакцій. Такі системи забезпечують високу ефективність перетворення та можливість гнучкого масштабування, що робить їх придатними для стабілізації роботи електричних мереж [11–16].

Залізо-повітряні батареї (iron-air) вважаються перспективним варіантом для доволі тривалого зберігання (більше 100 годин), з низькою вартістю сировини (Fe, O_2 з повітря) та високим терміном служби (до 10 тисяч циклів). Перспективними також можуть бути натрій-іонні батареї (Na-ion). Вони дешевші у виробництві, за збігом більш безпечні і створюються з доступної сировини. Один з найвідоміших прикладів проекту інтеграції електрохімічних СЗЕ – це Hornsdale Power Reserve в Південній Австралії, де літій-іонна батарея потужністю 150 МВт та ємністю 194 МВт·год підключена до вітрової генерації. Таким чином, потужність

СНЕ забезпечує регулювання частоти та аварійний резерв, економлячи мільйони доларів щороку, які потрібно витратити на балансуючі послуги [17].

Окислювально-відновні проточні батареї (Redox flow batteries, RFB), зокрема на основі заліза, характеризуються незалежним масштабуванням енергії об'єми електролітів та потужності, довгим терміном служби (тисячі циклів), низьким рівнем деградації та безпекою, оскільки використовують нетоксичні водні електроліти. Наприклад, залізо-хлоридні системи дають змогу уникнути незворотних втрат і мають високотемпературну стабільність без необхідності складності термоконтролю [18].

Слід зазначити, що літій-іонні батареї мають одну з найвищих щільностей серед накопичувачів – 150–250 Вт·год/кг, твердотільні – до 350 Вт·год/кг, натрій-іонні – до 160 Вт·год/кг, а свинцево-кислотні – лише 30–50 Вт·год/кг. Більшість літій-іонних систем демонструють ККД на рівні 90–95 %, свинцево-кислотні акумулятори – до 80 %, а ККД натрій-іонних батарей досягають 85–90 %. Високий ККД робить такі батареї ефективними для щоденного циклічного використання. Сучасні літій-іонні акумулятори витримують 500–1000 циклів заряд-розряд до зниження ємності на 20 %, свинцево-кислотні – до 1500 циклів. Твердотільні батареї демонструють перспективу понад 10 тисяч циклів без істотної деградації [12–15].

У 2024 році питома вартість літій-іонних акумуляторних пакунків досягла рівня 139 дол./кВт·год та продовжує знижуватися завдяки масштабуванню виробництва й технічним удосконаленням [19]. Свинцево-кислотні акумулятори залишаються більш доступними у виробництві, їхня питома вартість становить близько 200–220 дол./кВт·год, однак вони характеризуються нижчим циклічним ресурсом порівняно з літій-іонними [20]. Натрієві акумулятори демонструють потенціал до зниження витрат та здатні досягати собівартості у межах 120–150 дол./кВт·год, що робить їх перспективними конкурентами літій-іонних систем у середньостроковій перспективі [21]. Водночас твердотільні акумулятори все ще залишаються відносно дорогими, їхня питома вартість перевищує 300 дол./кВт·год, однак із розвитком технології спостерігається тенденція до поступового здешевлення [22].

Електрохімічні системи містять потенційно небезпечні речовини (літій, кобальт, свинець). Їхня утилізація вимагає спеціальних процесів переробки. Зокрема свинцеві акумулятори мають високий рівень переробки (понад 95 %), тоді як літій-іонні акумулятори – лише 5–10 % у глобальному масштабі, хоча ці показники поступово зростають.

Електромагнітні накопичувачі енергії. Електромагнітні накопичувачі енергії являють собою пристрої, які накопичують енергію в електричних або магнітних полях. У цей ряд входять суперконденсатори та суперпровідникові магнітні накопичувачі (SMES). Такі системи характеризуються високою потужністю, надшвидким зарядом та довгим ресурсом. Тому вони зручні для використання для швидкого реагування в електричних системах [11, 23].

Суперконденсатори мають велику потужність і короткий час зарядки та розрядки – секунди, разом із ресурсом понад мільйон циклів. Вони широко застосовуються для стабілізації мережі та рекуперації енергії в транспорті. Наприклад, місто Шеньчжень (Китай) використовує системи зберігання енергії в своїх електричних автобусах і трамваях для підвищення енергоефективності та зменшення споживання електроенергії [24]. Нові матеріали, такі як графен, підвищують їхню ефективність та надійність.

SMES зберігають енергію у вигляді постійного струму в охолоджених до надпровідного стану котушках. Вони забезпечують дуже швидкий відгук і ККД близько 95 %, застосовуються для стабілізації мережі, особливо при великій частці ВДЕ. На сьогодні системи використовують високотемпературні надпровідники, що підвищують щільність зберігання енергії [23, 25]. Наприклад, в Японії такі системи вбудовані в інфраструктуру дата-центрів і лікарень, щоб вони могли негайно переключитися на резервні джерела живлення [26].

Суперконденсатори мають низьку енергетичну щільність, приблизно 5–20 Вт·год/кг, що значно нижче, ніж у акумуляторів. Системи SMES мають ще нижчу щільність – до 5 Вт·год/кг, але компенсують цей недолік високою потужністю. Обидві технології демонструють високу ефективність. У суперконденсаторах вона досягає 95–98 %, а в SMES перевищує 95 %, оскільки енергія повертається практично без втрат, за винятком охолодження в

надпровідниках. Суперконденсатори можуть витримувати понад 1 мільйон циклів без помітного зносу. SMES також мають дуже високу циклічність, але вимагають складної криогенної інфраструктури, що обмежує їхнє використання [27]. Суперконденсатори дорогі, їхня питома вартість сягає 500–2000 доларів за кВт·год залежно від ємності та виробника. SMES ще дорожчі: понад 3000 доларів за кВт·год через необхідність охолодження та використання надпровідних матеріалів. Суперконденсатори зазвичай виготовляються з безпечних вуглецевих матеріалів і не містять токсичних металів, що полегшує їхню утилізацію. SMES містять мідь, алюміній і надпровідні матеріали, які можна переробляти. Головною екологічною проблемою є енергоємне криогенне охолодження [28].

Теплові накопичувачі енергії. Теплові СНЕ поділяються на сенсильні, латентні та термохімічні. Сенсильне накопичення полягає в зберіганні теплоти шляхом підвищення температури без фазового переходу, наприклад шляхом нагрівання води або піску, тоді як латентне використовує матеріали з фазовим переходом, які зберігають тепло при майже сталій температурі парафіну чи солей [29].

Прикладом виконання теплової СНЕ є використання розплавленої солі для зберігання теплової енергії в проєкті Crescent Dunes Solar Energy (Невада, США). Станція може утримувати тепло понад 560° С і приводити в дію органічний генератор Ренкіна до 10 годин після заходу сонця [30]. У централізованих мережах опалення Копенгагена використовуються великі акумулятори тепла об'ємом до 20 000 м³, здебільшого заповнені гарячою водою, яка служить теплоносієм. Ці резервуари дають змогу зберігати надлишкову теплоту, зокрема нічну, і використовувати її в пікові години споживання, що сприяє зниженню навантаження на основні джерела тепла та оптимізації витрат палива. Згідно з даними Датської асоціації централізованого теплопостачання (DBDH) у системі централізованого теплопостачання Копенгагена використовуються два резервуари об'ємом 20 000 м³ кожен, що забезпечує ефектвне зберігання тепла та балансування добових коливань теплового навантаження [31].

Теплові СНЕ мають середню щільність 30–70 кВт·год/м³ для води, 100–250 кВт·год/м³ для солей і до 400 кВт·год/м³ у фазових матеріалах. Найвищу щільність демонструють термохімічні системи – до 1000 кВт·год/м³, хоча вони все ще перебувають у стадії розвитку. ККД при зберіганні та поверненні тепла може досягати 90–95 % у водяних або сольових системах. При перетворенні тепла назад у електроенергію (наприклад, в CSP-станціях) загальний ККД падає до 30–40 %. Теплові системи мають дуже довгий термін експлуатації. Наприклад, резервуари для накопичення води можуть працювати понад 30 років без погіршення якості. Фазові матеріали можуть витримувати до 10 000 циклів, а термохімічні матеріали – понад 20 000 циклів залежно від матеріалу. Вартість зберігання теплової енергії є однією з найнижчих та становить 10–50 доларів/кВт·год для води та солей, 60–100 доларів/кВт·год для латентних та термохімічних систем. Це робить їх економічно привабливими для потреб опалення та зберігання надлишкової електроенергії в системах відновлюваної енергії. Більшість теплових накопичувачів використовують екологічно чисті матеріали: воду, пісок, каміння, солі. Вони не містять токсичних речовин і легко утилізуються. Термохімічні системи можуть вимагати контролю під час виробництва та поводження з реагентами, але при правильному проєктуванні вони також є безпечними [2, 29].

Криогенні накопичувачі енергії. Криогенні СНЕ (Liquid Air Energy Storage, LAES) працюють за схемою стиснення повітря і його подальшого охолодження до рідкого стану, температурою, близькою до –196 °С. За цією технологією збережена в рідкому повітрі енергія регенерується шляхом випаровування та розширення в турбіні [3, 32].

Прикладом криогенної СНЕ є комерційний проєкт Highview Power, що зараз реалізується у Великобританії – криогенне зберігання енергії потужністю 50 МВт з ємністю зберігання 250 МВт·год із використанням зрідженого повітря. Запис демонструє потенціал цієї нової технології для забезпечення гнучкості в широкому діапазоні застосувань і на великій географічній шкалі для безпечної утилізації в навколишньому середовищі [33].

Системи LAES характеризуються питомою енергетичною щільністю 100–200 Вт·год/кг і 250–350 кВт·год/м³ в об'ємному еквіваленті. Для порівняння, це в 3–5 разів більше, ніж у маховиків, але значно менше, ніж у літій-іонних акумуляторів. Однак ці показники

є прийнятними для стаціонарного зберігання, особливо в промислових масштабах. ККД систем LAES становить 50–60 %, але завдяки поєднанню з іншими джерелами тепла (наприклад, залишковим теплом від промислових підприємств) можна досягти ефективності 65–70 %. Використання зворотного теплового циклу та інтеграція з тепловими/вітровими електростанціями покращує рекуперацію енергії. Системи LAES не піддаються деградації активного середовища, тобто повітря. Механічні компоненти (компресори, теплообмінники, резервуари) мають тривалий термін експлуатації, що перевищує 25 років або 10–20 тисяч циклів залежно від режиму роботи. Обладнання широко використовується для скраплення природного газу, тому його надійність підтверджена промисловою практикою. У 2024 році середня вартість LAES становила 150–250 доларів за кВт·год. Згідно з прогнозами BloombergNEF, із збільшенням виробництва та впровадженням серійних рішень ціна може впасти до 100 доларів за кВт·год до 2030 року. Вартість значною мірою залежить від інфраструктури охолодження, джерел відпрацьованого тепла та місцевих умов електропостачання. Кріогенні системи не використовують небезпечні або токсичні речовини, а скраплене повітря є повністю нейтральним погляду екологічної безпеки. Немає викидів парникових газів, а основні екологічні проблеми пов'язані лише з енергоспоживанням для охолодження. Після закінчення терміну експлуатації обладнання підлягає повній переробці металу без токсичних залишків [32].

Зазначимо, що особливої ефективності застосування СНЕ можна досягти в гібридних системах, які поєднують у своєму складі накопичувачі різного типу. Так, автономні енергетичні системи з фотоелектричними панелями, батареями, тепловим зберіганням і дизельними генераторами були впроваджені в сільських районах Індії, Танзанії та Південної Америки. В Індії міні-мережі, що поєднують сонячну енергію, літєві батареї для балансування день/ніч і теплове зберігання, демонструють ефективність у забезпеченні енергетичної незалежності та зменшенні викидів CO₂ [34].

Аналіз ефективності накопичувачів у типових сценаріях використання. Табл. 1 систематизує основні технічні та економічні показники для різних типів систем зберігання енергії. Ці дані дають змогу зробити обґрунтований вибір між технологіями відповідно до типових сценаріїв використання, зокрема для високошвидкісного маневрового балансування режиму електроенергетичної системи, довгострокового зберігання енергії та як промислові джерела живлення.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики систем накопичення енергії

Тип СНЕ	Питома щільність енергії (Вт·год/кг)	ККД (%)	Циклічність (тис.циклів)	Термін служби (років)	Вартість (\$/кВт·год)
Механічні	~1.5 (до 10 для маховиків)	75-85	до 30	до 50	100-200
Хімічні	4000-39000 (залежно від палива)	25–45 (електрика) / 70–80 (тепло)	1-5	10-30	500-1500
Електрохімічні	150-200	90-95	5-10	10-15	100-300
Електромагнітні	10-30	90-98	1000+	20-30	500-2000
Теплові	~0.05 (умовно для маси зберігача)	85–95 (тепло) / 30–40 (електрика)	до 10	до 30	10-50
Кріогенні	120-150	50-70	до 10	до 25	150-250

Механічні системи зберігання, зокрема гідроакумулюючі електричні системи (ГАЕС) та гравітаційні системи, краще підходять для великомасштабного стаціонарного використання із тривалим циклом зберігання – від декількох годин до кількох десятків годин. Вони мають стабільний ККД – у діапазоні 75–85 % та термін служби більше 25 років, що робить їх привабливими для впровадження у великі енергосистеми. Однак географічні обмеження та значні капітальні вкладення повністю нівелюють їхню гнучкість.

Хімічні накопичувачі енергії (водень, аміак, біопаливо) мають високу питому об'ємну щільність енергії (4000–39 000 Вт·год/л), що відкриває широкі перспективи для довгострокового і сезонного зберігання. Але їхній ККД перетворення на електроенергію низький (25–45 %), довговічність обмежена (1–5 тис. циклів), а ціна – висока. Такі системи є перспективними передусім у транспорті, промисловості, для зберігання палива, однак вони мало придатні для швидкозмінних балансувань.

Електрохімічні системи зберігання, зокрема, літій-іонні батареї, ідеально підходять для швидких циклів заряджання-розряджання та мобільних засобів, таких як електромобілі та локальне постачання електроенергії. Підвищена ККД (до 95 %) та щільність в межах 150–250 Вт·год/кг забезпечують ефективне збереження енергії, але висока вартість, зношення з часом та проблеми утилізації обмежують масштабування таких СНЕ для довгострокового стаціонарного збереження.

Електромагнітні системи, зокрема, суперконденсатори та надпровідні магнітні системи найкраще забезпечують стабільність мережі під час короткочасних пікових навантажень. Вони характеризуються винятковою швидкістю реагування та ККД понад 95 %. На жаль, через низьку енергетичну щільність і високу вартість (500–2000 \$/кВт·год) вони не є рентабельними для довгострокового зберігання енергії.

Теплові системи характеризуються високою ефективністю (до 90–95 % зберігання тепла) і надзвичайно низькою вартістю одиниці збереженої енергії (10–50 \$/кВт·год). Це робить їх ідеальними для організації центрального опалення та зберігання надлишкової електроенергії у вигляді тепла. Однак, коли теплову енергію потрібно перетворити на електричну, загальна ефективність значно знижується (до 30–40 %), що обмежує їхнє використання в суто електричних системах.

Кріогенні системи зберігання середньої енергетичної щільності, зокрема LAES, мають термін служби 25 років і більше, але все ще з відносно низькою ефективністю (50–70 %), оскільки процес відновлення тепла є складним. Відсутність географічних та екологічних обмежень безпеки є їхньою перевагою, що робить їх цікавими для великомасштабного зберігання в районах із дефіцитом гідроелектричних ресурсів.

Зрештою вибір типу зберігання в кожному конкретному випадку базується на поєднанні технічних властивостей, а також витрат/стійкості та екологічної безпеки. У табл. 2 представлено рекомендації щодо застосування різних типів СНЕ для промислового використання.

Таблиця 2

Рекомендації щодо промислового використання СНЕ

Область використання	Рекомендовані типи СНЕ
Довгострокове та великомасштабне зберігання енергії	Механічні СНЕ (гідроелектростанції, гравітаційні батареї); Кріогенні технології (LAES)
Середньострокове балансування	Електрохімічні накопичувачі (літій-іонні та натрій-іонні акумулятори)
Мобільні застосування	Електрохімічні накопичувачі (літій-іонні та твердотільні батареї) Електромагнітні (суперконденсатори)
Критична інфраструктура	Електромагнітні (надпровідні магнітні системи (SMES) та суперконденсатори)
Теплопостачання	Теплові накопичувачі з фазозмінними матеріалами (PCM), резервуарами з каменю або солі
Сезонне та паливне зберігання, транспорт і промисловість	Хімічні накопичувачі (водень, аміак, біопаливо)

Слід зазначити такі основні бар'єри для широкомасштабного впровадження СНЕ:

- технологічні: деградація матеріалів у літій-іонних батареях, низька енергетична щільність механічних та теплових систем, складність підтримання надпровідного стану для SMES;

- економічні: високі капіталовкладення (особливо для LAES, SMES, твердотільних батарей), тривалий термін окупності, до 7–15 років, залежність від ринку літію, кобальту, нікелю;
- регуляторні: ОЕС України потребує модернізації систем управління для ефективної роботи з двосторонніми потоками енергії від накопичувачів, існує недосконалість тарифікації послуг накопичення та відсутність стандартів технічного обслуговування.

Подальше вдосконалення систем зберігання пов'язане з прогресом гібридних рішень (поєднання батарей і суперконденсаторів, теплових і електрохімічних акумуляторів), що дає змогу компенсувати слабкі сторони кожної технології. Важливим напрямком є стандартизація технічних вимог, створення тарифів і державних стимулів, які можуть сприяти комерціалізації передових технологій.

Висновки. У роботі проведено комплексний аналіз сучасних систем накопичення енергії, що дало змогу узагальнити їхні техніко-економічні характеристики та визначити сфери доцільного застосування. Показано, що кожна з технологій має власні переваги та обмеження, а ефективність їхнього використання залежить від конкретних умов експлуатації та потреб енергосистеми.

Механічні та кріогенні СНЕ довели доцільність застосування у великих централізованих мережах для довготривалого та масштабного зберігання енергії. Електрохімічні системи, зокрема літій- та натрій-іонні батареї, оптимальні для середньострокового балансування та мобільних застосувань завдяки високому ККД та енергетичній щільності. Електромагнітні накопичувачі (суперконденсатори, SMES) виявилися найбільш ефективними для забезпечення швидкого реагування та підтримки стабільності мережі, водночас теплові системи зберігання демонструють високу економічну ефективність у сфері централізованого теплопостачання.

Визначено ключові бар'єри впровадження СНЕ: технологічні (деградація матеріалів, низька енергетична щільність деяких рішень), економічні (висока собівартість та тривалий термін окупності), а також регуляторні (недосконалість стандартів і тарифікації послуг накопичення).

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція гібридних рішень, які поєднують різні типи накопичувачів для досягнення комплексного ефекту, а також гармонізація технічних стандартів та створення економічних стимулів для комерціалізації інноваційних технологій.

1. M. Mahmoud et al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 210. 112670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112670>
2. X. Luo et al Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*. 2015. Vol. 137. Pp. 511–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
3. M. Budt et al A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*. 2016. Vol. 170. Pp. 250–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>
4. P. Wang et al Design and Performance Analysis of Super Highspeed Flywheel Rotor for Electric Vehicle. *World Electric Vehicle Journal*. 2022. Vol. 13. No 8. Pp. 147. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj13080147>
5. Reynolds M. Gravity Could Solve Clean Energy's One Major Drawback. *WIRED*. URL: https://www.wired.com/story/energy-vault-gravity-storage/?utm_source=chatgpt.com (date of access: 20.09.2025).
6. R. Wang et al A Review of Gravity Energy Storage. *Energies*. 2025. Vol. 18. No 7. Pp. 1812. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071812>
7. Renewables 2024. Analysis and forecast to 2030. Paris: International Energy Agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651cdb6caa24/Renewables2024.pdf>
8. Global Hydrogen Review 2023. Paris: International Energy Agency, 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
9. Z. Zhang et al Green Ammonia: Revolutionizing Sustainable Energy for a Carbon-Free Future. *Journal of Materials Chemistry A*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4ta07339h>
10. S. T. Janaki et al. Beyond Fossil: The synthetic fuel surge for a green energy resurgence. *Clean Energy*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkae050>

11. H. Li et al. Exploring the Flow and Mass Transfer Characteristics of an All-Iron Semi-Solid Redox Flow Battery. *Batteries*. 2025. Vol. 11. No 4. Pp. 166. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11040166>
12. S. S. Madani et al. A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. *Batteries*. 2025. Vol. 11. No 4. Pp. 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11040127>
13. Machin A., Morant C., Márquez F. Advancements and Challenges in Solid-State Battery Technology: An In-Depth Review of Solid Electrolytes and Anode Innovations. *Batteries*. 2024. Vol. 10. No 1. Pp. 29. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries10010029>
14. R. Carter et al. First Look at Safety and Performance Evaluation of Commercial Sodium-Ion Batteries. *Energies*. 2025. Vol. 18. No 3. Pp. 661. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18030661>
15. Q. Zhang et al A Concise Review of Power Batteries and Battery Management Systems for Electric and Hybrid Vehicles. *Energies*. 2025. Vol. 18. No 14. Pp. 3750. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143750>
16. H. Chen et al Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009. Vol. 19. No 3. Pp. 291–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
17. Hornsdale Power Reserve - South Australia's Big Battery. *Hornsdale Power Reserve*. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au> (date of access: 20.09.2025).
18. S. Zhang et al. All-Soluble All-Iron Aqueous Redox Flow Batteries: Towards Sustainable Energy Storage. *Energy Storage Materials*. 2025. P. 104004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2025.104004>
19. Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh | BloombergNEF. *BloombergNEF*. URL: https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/?utm_source=chatgpt.com (date of access: 20.09.2025).
20. Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment / K. Mongird et al. Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment, 2020. URL: https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/LeadAcid_Methodology.pdf
21. Mauger A., Julien C. M. State-of-the-Art Electrode Materials for Sodium-Ion Batteries. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 16. pP. 3453. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13163453>
22. Qian. How much does a solid state battery cost? A Deep Dive into Pricing & Future Trends - ViBMS Battery. *ViBMS Battery*. URL: <https://vibms.com/how-much-does-a-solid-state-battery-cost> (date of access: 20.09.2025).
23. Conway B. E. Electrochemical Supercapacitors. Boston, MA: Springer US, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
24. Berlin A., Zhang X., Chen Y. Case Study: Electric buses in Shenzhen, China. International Energy Agency, 2018.
25. A. Gil et al State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1–Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. No. 1. Pp. 31–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>
26. Honda Motor Co.,Ltd. Honda, Tokuyama, and Mitsubishi Corporation to Conduct Joint Demonstration of Decarbonizing Data Center Using By-product Hydrogen and Stationary Fuel Cell Power Station designed to Reuse Fuel Cell Systems from FCEVs. Honda Global Corporate Website. *Honda Global*. URL: <https://global.honda/en/newsroom/news/2023/c231225eng.html> (date of access: 20.09.2025).
27. H. Pan et al. Supercapacitor with Ultra-High power and energy density enabled by Nitrogen/Oxygen-Doped interconnected hollow carbon Nano-Onions. *Chemical Engineering Journal*. 2024. P. 149663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149663>
28. Nid A., Sayah S., Zebar A. An effective SMES system control for enhancing the reliability of hybrid power generation systems. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2023. Vol. 613. P. 1354322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354322> (date of access: 20.09.2025).
29. L. Vallese et al A comprehensive review of thermal energy storage technologies and their applications: Creation of a database. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026. Vol. 225. P. 116133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116133>
30. What happened with Crescent Dunes?. *SolarPACES*. URL: https://www.solarpaces.org/what-happened-with-crescent-dunes/?utm_source=chatgpt.com (date of access: 20.09.2025).
31. District Heating in Denmark, Efficient & Clean Energy | DBDH. *DBDH - The District Energy Go-to-Partner*. URL: https://dbdh.org/all-about-district-energy/district-heating-in-denmark/?utm_source=chatgpt.com (date of access: 20.09.2025).
32. A. Vecchi et al. Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 3. P. 100047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100047>
33. Highview Power Breaks Ground on 250MWh CRYOBattery Long Duration Energy Storage Facility - Highview Power. *Highview Power*. URL: https://highviewpower.com/news_announcement/highview-power-breaks-ground-on-250mwh-cryobattery-long-duration-energy-storage-facility (date of access: 20.09.2025).
34. Energy Storage for Mini Grids. Status and Projections of Battery Deployment. World Bank Group. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099121323112040367/pdf/P1710100aea43a0ae0a038034d730b04087.pdf>

REVIEW AND ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF MODERN ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES**T. Katsadze, D. Sherbina**National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
Beresteyskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukrainee-mail: teymuraz@ukr.net, djdimas75@gmail.com

The article presents a comprehensive review and analysis of modern energy storage systems (ESS), which play a crucial role in stabilizing power grids under the growing share of renewable energy sources. The study covers the main storage technologies: mechanical (pumped hydro storage, flywheels, gravity-based systems), chemical (hydrogen, ammonia, synthetic fuels), electrochemical (lithium-ion, sodium-ion, redox-flow batteries), electromagnetic (supercapacitors, SMES), thermal, and cryogenic (LAES). For each group, technical and economic parameters are analyzed, including round-trip efficiency, energy density, cycle life, service life, specific cost, environmental safety, and recycling aspects. Special attention is given to real-world implementation cases and future development prospects. The research identifies optimal application areas: mechanical and cryogenic systems for long-term, large-scale storage; electrochemical systems for medium-term balancing and mobile use; electromagnetic systems for instantaneous regulation; and thermal storage for centralized heating networks. It is emphasized that the future of energy systems lies in hybrid storage solutions, harmonized technical standards, and economic incentives for innovative technologies. The results can be applied to national and local energy strategies to ensure efficiency, reliability, and sustainability of modern power systems. Ref. 34, tables 2.

Keywords: energy storage systems, renewable energy, electrochemical batteries, pumped hydro storage, cryogenic technologies, supercapacitors, thermal storage, hybrid systems.

Надійшла: 25.08.2025

Прийнята: 24.09.2025

Submitted: 25.08.2025

Accepted: 24.09.2025