

УДК 621.3.031

**Володимир Дерій**, к.т.н., ст. наук. співр., <http://orcid.org/0000-0002-5689-4897>  
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ,  
03150, Україна;  
e-mail: [derii.volodymyr@gmail.com](mailto:derii.volodymyr@gmail.com)

## НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** У статті зроблено аналітичний огляд накопичувачів електричної енергії зворотної дії, які можуть бути використані для вирішення системних проблем Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Потреби у використанні накопичувачів електричної енергії обумовлені існуючим дефіцитом маневрених потужностей ОЕС та будівництвом сонячних і вітрових електростанцій, які через стохастичний режим роботи стають суттєвим дестабілізуючим фактором. Через відсутність ринкових механізмів ціноутворення, можливості корегування ставок «зеленого» тарифу та зменшення вартості технологій сонячних та вітрових електростанцій в останні роки спостерігається стрімке зростання їх кількості та потужності. На початок 2021 р. встановлена потужність сонячних електростанцій становила 6,87 ГВт, вітрових – 1,31 ГВт, а до 2030 р. планується зростання до 10,5 ГВт та 5,0 ГВт відповідно. Без забезпечення достатнього обсягу регулюючих потужностей це може призвести до катастрофічних наслідків, як це сталося, наприклад, у Південній Австралії. Проведений огляд та аналіз показав, що домінуючою у світі технологією акумулювання електричної енергії є гідроакумулюючі електростанції, витрати на впровадження яких становлять близько 260 дол. США/кВт·год. Накопичувачі енергії стиснутого повітря є найдешевшою технологією, але потребують наявності поблизу енергетичних систем природних печер. Акумуляторні системи накопичення енергії розвиваються швидкими темпами, витрати на їх впровадження становлять 311–520 дол. США/кВт·год з тенденцією до зменшення до 2030 р. на близько 25%. Такі накопичувачі є найбільш перспективними для роботи в енергетичних системах: можуть бути використані для регулювання частоти та потужності, зменшення перетоків електроенергії, зменшення коливань напруги в електричних мережах, ущільнення добових графіків електричних навантажень, запобігання перевантажень електричних мереж та трансформаторів, підвищення надійності електропостачання, підвищення стабільності роботи сонячних та вітрових електростанцій, а також для комерційних цілей в різних сегментах ринку електроенергії України.

**Ключові слова:** енергетична система, накопичувач електроенергії, потужність, ємність.

### 1. Вступ

Стохастичний режим роботи сонячних та вітрових електростанцій є суттєвим дестабілізуючим фактором для роботи будь-якої енергетичної системи, в тому числі і для ОЕС України, де наявний значний дефіцит маневрених потужностей. Особливо відчутним для енергосистеми є дефіцит маневреної (регулюючої) потужності в години нічного «провалу» (2300–700) добового графіка електричних навантажень. В цей часовий період для регулювання співвідношення виробництво-споживання електроенергії відбуваються вимушені зупинки вугільних енергоблоків одиничною електричною потужністю 150 МВт, 200 МВт та 300 МВт теплових електростанцій (ТЕС). За даними звіту НЕК «Укренерго» з оцінки відповідності генеруючих потужностей [1], щодоби відключаються від 7 до 10 енергоблоків вугільних ТЕС, що призводить до прискореного вичерпання їх ресурсу, перевитрат палива, збільшення витрат на експлуатаційне та ремонтне обслуговування.

Згідно з законодавством України гарантується викуп всього обсягу електроенергії від сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій, що обумовлює їх експлуатацію на базовому рівні. У весняно-літні денні періоди, коли обсяги генерації від СЕС та ВЕС великі та всі наявні пропозиції виробників ТЕС та ГЕС на розвантаження в межах балансуючого ринку використані, системний оператор для збереження стійкості ОЕС України змушений переводити гідроакумуляційні електростанції (ГАЕС) в насосний режим експлуатації, що зменшує їх можливості для роботи під час

нічного «провалу» графіків електричних навантажень. Якщо наведених заходів не вистачає, застосовуються обмеження потужності СЕС та ВЕС [2].

Максимальне сумарне обмеження у 2020 р. становило 2178,86 МВт (07.06.2020 р.) внаслідок суттєвого приросту нових потужностей електрогенерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Перше обмеження електрогенерації з ВДЕ у 2021 році було вже 11 березня о 12:30, коли поточна потужність електрогенерації з відновлюваних джерел енергії досягла 4,46 ГВт. В умовах профіциту потужності в ОЕС та вичерпаних резервів на розвантаження для забезпечення меж операційної безпеки енергосистеми це обумовило необхідність розвантаження СЕС та ВЕС сумарною потужністю 400 МВт. Обмеження електрогенерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ у 2021 р. також відбувались 28 березня, 1, 3, 10 та 11 квітня (два останні дні за сумарною потужністю близько 1,5 ГВт (кожного дня) [2].

Через відсутність ринкових механізмів ціноутворення, можливості корегування ставок «зеленого» тарифу та зменшення вартості технологій СЕС та ВЕС в останні роки спостерігається стрімке зростання їх кількості та встановленої потужності. На початок 2021 р. встановлена потужність СЕС становила 6,87 ГВт, ВЕС – 1,31 ГВт, а до 2030 р. планується зростання їх встановленої потужності до 10,5 ГВт та 5,0 ГВт відповідно [3].

Стрімке зростання потужностей ВДЕ без забезпечення достатнього обсягу регулюючих потужностей може призвести до катастрофічних наслідків. Прикладом може бути Південна Австралія, де вітрова та сонячна енергетика забезпечували близько 40% виробництва електричної енергії. Блекаут, що стався в країні нещодавно [4], показав, що для забезпечення стійкості енергосистем при значному рівні в їх структурі відновлюваних джерел різко зростають вимоги до метеорологічних прогнозів та засобів балансування відповідності генерованої потужності та навантаження.

Одним із можливих варіантів вирішення вищезгаданої проблеми є широке використання накопичувачів енергії, основним завданням яких є забезпечення балансу потужності електростанцій на ВДЕ та навантаження. Використання накопичувачів енергії дозволяє відмовитися від великих резервних генеруючих електростанцій при збереженні надійності енергетичних систем та може призвести до зниження вартості електроенергії. В період з 1997 р. по 2017 р. встановлена потужність систем зберігання енергії у світі збільшилася на 70% і досягла 170 ГВт [5]. Спеціалісти Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики вважають, що основними драйверами подальшого зростання потужності накопичувачів енергії є широке впровадження вітрових та сонячних електростанцій [6]. При цьому глобальні потужності накопичувачів в залежності від темпів зростання відновлюваних джерел енергії згідно з прогнозами зростуть у 2030 р. в порівнянні з 2017 р. на 42–68% (при помірному зростанні) та на 155–227% (при швидкому) [5].

Як уже зазначалося, в Об'єднаній енергосистемі України існує значний дефіцит маневреної потужності. Єдиний тип накопичувачів енергії, що використовується в ній, це ГАЕС, ємності яких недостатньо для забезпечення її стійкості. У 2020 р. в місті Енергодар, на території Запорізької ТЕС, компанія ДТЕК запустила першу в Україні промислову літій-іонну систему накопичення енергії потужністю 1 МВт і ємністю 2,25 МВт·г. Це пілотний проєкт ДТЕК для пошуку оптимальних моделей роботи систем накопичення енергії на різних сегментах енергетичного ринку країни [7]. Але, на жаль, місто Енергодар знаходиться під окупацією Російської Федерації.

**Метою** даного огляду є пошук та аналіз технологій зберігання електричної енергії для їх можливого використання в ОЕС України.

## 2. Методи та матеріали

Класифікувати системи накопичення енергії можна за різними ознаками. В найбільш розповсюджених системах класифікація проводиться за видом енергії, яка зберігається, способах накопичення та вилучення [6, 8, 9, 10, 11, 12]. Виходячи з цього, всі відомі види накопичувачів електричної енергії можна розподілити за наступними основними групами: механічні, теплові, електричні та електрохімічні.

З механічних накопичувачів енергії розглянемо такі, технології яких відпрацьовані. Треба виділити наступні: гравітаційні – твердотільні та рідинні, кінетичні та з використанням сил пружності (газові).

Із гравітаційних найбільше розповсюдження отримали *гідроакumuлюючі накопичувачі*. На даний час у світових системах акумулювання енергії вони займають близько 96% від загального обсягу [5]. Згідно з [6] у 2030 р. їх доля становитиме від 45% до 83% в залежності від темпів розвитку відновлюваної енергетики та інших технологій накопичення енергії. Ці накопичувачі мають наступні переваги та недоліки [6].

Переваги:

– технологія ГАЕС дуже добре відпрацьована і при їх спорудженні, як правило, не виникає принципових проблем;

– дуже низький саморозряд (в основному за рахунок випаровування);

– велика глибина розряду – (80–100)%;

– порівняно висока ефективність циклу заряд-розряд, становить 75–80%;

– можливі великі ємності накопичення енергії та довготривале зберігання (роки);

– гнучкість по включенню та виключенню;

– тривалий термін експлуатації (30–100 років) та низькі витрати на зберігання енергії.

Недоліки:

– існують певні географічні обмеження при виборі місця розташування ГАЕС (потрібні значні земельні ділянки, наявність водойм та відповідний рельєф місцевості);

– низька щільність енергетичного потоку;

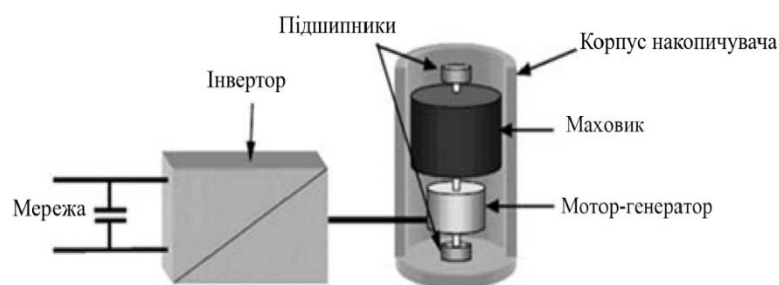
– високі початкові інвестиційні витрати, тривалість будівництва та період окупності;

– екологічні проблеми.

Питомі витрати на впровадження ГАЕС становлять близько 220-511 \$/кВт·год (2000–2200 \$/кВт) [6].

*Кінетичні накопичувачі енергії* (синоніми: роторний, гіроскопічний, маховик) запасують енергію за допомогою маховика, який швидко обертається. Тривалий час маховики використовувалися тільки для забезпечення плавної роботи різних машин, але в липні 2011 р. компанія Weason Power презентувала перший роторний накопичувач потужністю 20 МВт, призначений для регулювання частоти в операційній зоні незалежного Системного оператора Нью-Йорка [13].

В результаті проведених досліджень щодо цих накопичувачів були створені супермаховики – складні високотехнологічні пристрої для акумуляції енергії. Спрощена схема кінетичного накопичувача енергії показана на рис. 1 [14].



**Рис. 1.** Спрощена схема кінетичного накопичувача енергії

Накопичувач працює наступним чином: у режимі накопичення енергії електроенергія через двонаправлений інвертор підводиться до обмотки статора та збільшує обертовий момент, що призводить до збільшення швидкості обертання маховика. В режимі віддачі кінетична енергія обертання створює генераторний момент на валу, в результаті якого в обмотці статора генерується напруга, яка за допомогою інвертора перетворюється в змінний струм заданих параметрів. Для

зменшення втрат через тертя в корпусі накопичувача створюється вакуум, в якості підшипників використовується магнітне поле (працює без тертя) [15]. Переваги та недоліки кінетичних накопичувачів наведені нижче [6].

Переваги:

- можливість швидкої зарядки;
- тривалий життєвий цикл і відсутність деградації потужностей (кількість циклів заряд / розряд практично не впливає на тривалість життєвого циклу);
- висока щільність потужності, яка не залежить від рівня накопичення енергії;
- низькі витрати на обслуговування;
- рівень накопичення / розряду легко визначається через швидкість обертання маховика;
- широкий експлуатаційний досвід – завдяки використанню в різних двигунах.

Недоліки:

- нижча щільність енергії в порівнянні з акумуляторними системами накопичення;
  - високі втрати на холостому ходу;
  - потреба в технічному обслуговуванні підшипників або додаткове споживання електроенергії для живлення магнітних підшипників;
  - сторонні динамічні навантаження або зовнішні удари можуть призвести до відмови.
- Інформацію по деяких серійних кінетичних накопичувачах наведено в табл. 1 [15].

**Таблиця 1.** Серійні кінетичні накопичувачі енергії

Виробник	Країна	Характеристики
Satcon	USA	2200 кВА × 12 секунд
Hitec	Netherlands	2000 кВА × 10 секунд
Piller	Germany	1100 кВА × 15 секунд
Caterpillar	USA	240 кВт × 14 секунд
Pentadyne	USA	120 кВт × 20 секунд
Trinity	USA	100 кВт × 15 секунд
Beacon Power	USA	2 кВт × 3 години
		100 кВт × 15 хвилин
		250 кВт × 25 секунд
		250 кВт × 6 хвилин

Питомі інвестиційні витрати згідно з [14] для кінетичних накопичувачів потужністю від 15 кВт до 1670 кВт становлять \$ (2700–800)/кВт відповідно, а класу 10 МВт – \$ (3695–4315)/кВт.

Накопичувачі енергії стиснутого повітря (CAES) можна використовувати для великих енергетичних систем. Вони працюють наступним чином: надлишкова електроенергія від електростанцій живить потужні компресори, які закачують охолоджене повітря під високим тиском у резервуари, в якості яких використовують природні підземні порожнини. При виникненні дефіциту електричної енергії стиснуте повітря підігрівається та приводить у рух турбогенератор. Підігрів стиснутого повітря може бути з використанням спалювання природного газу в газовій турбіні, або з використанням теплоти, яка виділяється при стисканні повітря.

Найбільш потужний НЕСП побудований у 1978 р. в Ханторфі (Німеччина). Його потужність складає 290 МВт. У 1991 р. компанія Alabama Electric Co (США) побудувала НЕСП потужністю 110 МВт [13]. Основні характеристики цих накопичувачів наведені в табл. 2 [7].

**Таблиця 2.** Характеристики накопичувачів енергії стиснутого повітря

Місце розташування	Потужність, МВт	Ємність, МВт·год	Тиск, МПа	Джерело теплоти	Ефективність кругового перетворення, %
Huntorf, Німеччина	290	580	4,6-6,6	Природний газ	42
McIntosh, Alabama, США	110	2860	4,5-7,4	Природний газ	54

Згідно з інформацією, наведеною в [6], питомі інвестиційні витрати на впровадження становлять \$ (50–90)/МВт·год, життєвий цикл складає (50000–100000) циклів, глибина розряду – (35–50)%.

Поки у світі існують тільки два таких накопичувачі. Третій планується спорудити в Нортоні (штат Огайо) потужністю 2700 МВт в існуючій вапняковій шахті глибиною 610 м [15]. Широке тиражування НЕСП обмежене наявністю доступних надійних підземних сховищ для зберігання стиснутого повітря.

Теплові акумулятори енергії – це пристрої, в яких шляхом зміни температури або фазового стану змінюється енергія робочого тіла. Існує велике різноманіття теплових накопичувачів, але по темі нашого дослідження інтерес викликають тільки такі, що можуть накопичувати велику кількість електричної енергії. Використовують теплові акумулятори оборотного та тільки прямого типів.

В оборотних теплових акумуляторах електрична енергія (при її надлишку) за допомогою електричних теплогенераторів перетворюється в теплову та зберігається, наприклад, у вигляді пари. При виникненні дефіциту електроенергії в мережах пара з теплового акумулятора подається на парову турбіну, що приводить у рух електричний генератор, який виробляє електричну енергію. Згідно з [16] величина потужності може бути біля 500 МВт, а круговий коефіцієнт перетворення може сягати 37%.

В теплових акумуляторах прямої дії тепла енергія, вироблена електричними теплогенераторами, споживається у вигляді теплоти без подальшого перетворення в електричну. Ці технології будуть проаналізовані в іншому дослідженні.

Цікаву розробку теплового акумулятора представила Національна лабораторія відновлюваної енергії (NREL, США). NREL запропонувала використовувати недорогий кварцовий пісок як робочу речовину накопичувача, і хоча питома теплоємність піску (0,8 кДж/(кг·°C)) в 5 разів менша, ніж у води (4,187 кДж/(кг·°C)), проте він забезпечує в 10 разів більшу різницю температур ( $\Delta 900$  °C проти  $\Delta 90$ °C). В даній технології використовується надлишкова електроенергія від СЕС та ВЕС для нагрівання кварцового піску. Частинки проходять через низку електричних резистивних нагрівальних елементів, щоб нагріти їх до 1200°C. Потім ці частинки за допомогою сили гравітації подаються в ізольовані бетонні бункери для зберігання теплової енергії. Базовий варіант накопичувача має ємність 26 000 МВт·год теплової енергії. Модульна конструкція накопичувача дозволяє збільшити або зменшити його ємність. Запропонована технологія піщаного накопичувача забезпечує економічне довготривале зберігання електроенергії за допомогою недорогого накопичення теплової енергії та високоефективного енергетичного циклу. Піщаний накопичувач надійний та безпечний, його можна впроваджувати практично будь-де. Теплову енергію, яку зберігає цей накопичувач, можна використати як для централізованого теплопостачання, так і для генерації електричної енергії, де він складе гідну конкуренцію літій-іонним акумуляторам [17]. Перший у світі комерційний піщаний накопичувач побудований в місті Канкаанпя (Західна Фінляндія) у 2022 р. Він підключений до мережі централізованого теплопостачання [18].

Електричні накопичувачі енергії. На даний час існує два види електричних накопичувачів енергії – конденсаторні та індуктивні. Перші накопичують енергію у вигляді електричного заряду, другі – в магнітному полі.

Конденсаторні накопичувачі електричної енергії використовують спеціальні конденсатори – іоністори (суперконденсатори), розроблені в 70-х роках минулого сторіччя. Механізм їх зарядки проходить без хімічних реакцій, що робить цикл накопичення та розряду швидшим, ніж в акумуляторах. Ресурс роботи суперконденсаторів складає сотні тисяч циклів. Вони можуть працювати в широкому діапазоні температур (від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ ), ударів та вібрацій. Ефективність кругового перетворення енергії складає понад 97%. Суперконденсатори виготовляються серійно провідними виробниками США, Японії, Кореї, Франції, Німеччини, Австралії від десятків до тисяч фарад. Головним їх недоліком є низька щільність енергії [14], але дослідження в цьому напрямку продовжуються в тому числі в Україні [19]. В лабораторних зразках наносуперконденсаторів цей недолік вдалося подолати [9]. Через те, що конденсаторні накопичувачі мають високу щільність потужності та малу щільність енергії, їх доцільно застосовувати для миттєвої компенсації енергії (наприклад, в системах регулювання частоти). Відомі функціонуючі конденсаторні системи

накопичення енергії 10 МВА, коефіцієнт кругового перетворення яких становить 99%, а час дії 1 с [15]. Питомі інвестиційні витрати конденсаторних накопичувачів становлять \$ (1500–2500)/кВт.

Індуктивні накопичувачі енергії є одними з найскладніших та дорогих технологій зберігання енергії. Для створення надпровідності електромагнітної котушки її поміщають в криогенне середовище. При цьому практично виключаються втрати енергії в провідниках котушки. Енергія зберігається в магнітному полі котушки, а при необхідності може бути перетворена в постійний струм, який легко перетворюється в змінний струм з частотою електромережі. Ефективність кругового перетворення сягає 95–98% [14].

Перший випадок успішного застосування індуктивного накопичувача був зафіксований у США в енергосистемі Bonneville Power Authority у 1980-х роках. Для згладжування низькочастотних коливань у мережах там було встановлено індуктивний накопичувач потужністю 20 МВт та ємністю 2,4 МВт·год [12].

Згідно з рекомендаціями, наведеними в [15], індуктивні накопичувачі ємністю:

- кілька МВт·год рекомендується застосовувати для регулювання частоти та як компенсатор потужності для стабілізації електромережі. Такі системи будуть ефективними для зменшення коливання потужності від 30 с до декількох хвилин, що може бути використано для відновлюваних джерел енергії;

- порядку 100 МВт·год можуть застосовуватися для регулювання потужності від 30 хв до 1 год;

- порядку ГВт·год – для щоденного вирівнювання навантаження протягом (5–10) год.

Питомі інвестиційні витрати на впровадження індуктивних накопичувачів потужністю порядку 1 МВт на 2009 р. оцінювалися як \$(380–490)/кВт [15].

Електрохімічні накопичувачі енергії. Одним із напрямів зберігання енергії, який дуже швидко розвивається, є акумуляторні системи накопичення енергії (battery energy storage system – BESS). Це складні системи, що складаються з різного роду електронних перетворювачів (випрямлячі, інвертори), систем захисту й управління та, власне, накопичувача енергії – акумуляторної батареї, яка становить біля 50% всієї її вартості. За прогнозами спеціалістів Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) та Міжнародного енергетичного агентства (IEA), вартість BESS може зменшитися на 50–70% до 2030 року, а термін використання та кількість циклів заряд / розряд суттєво збільшиться, що може значно змінити структуру ринку зберігання енергії у світі [5].

**Таблиця 3.** Якісні характеристики деяких акумуляторів

Тип акумулятора	Переваги	Недоліки
Свинцево-кислотні	Недорогий та простий у виготовленні. Низька вартість зберігання електроенергії. Висока питома потужність, здатна до високих струмів розряду. Хороші показники при низьких і високих температурах.	Низька питома енергія. Повільна зарядка – 14–16 годин. Необхідність зберігання в зарядженому стані для запобігання сульфатації. Спеціальні вимоги при зберіганні та транспортуванні. Обмежена кількість циклів. Вплив на навколишнє середовище.
Нікель-кадмієві	Велика кількість циклів при належному обслуговуванні. Хороші показники навантаження. Тривалий термін зберігання навіть у розрядженому стані. Немає особливих вимог по зберіганню та транспортуванню. Здатність працювати при низьких температурах. Невисока вартість зберігання енергії.	Відносно низька питома енергія. Ефект пам'яті, потребує періодичного повного розряду. Кадмій – токсичний метал, який не можна утилізувати на сміттєзвалищах. Високий саморозряд. Низька напруга в одиночній комірці 1,20.
Нікель-металгідридні	Висока щільність енергії. Немає обмежень, пов'язаних із виробництвом, використанням та утилізацією акумуляторів. Можуть працювати при низькій температурі (–20 <sup>0</sup> С).	Обмежений термін служби – 200–300 циклів. Малі глибини розряду. Обмежений струм розряду. Складний алгоритм заряду, який потрібно ретельно контролювати. Високий саморозряд.

Тип акумулятора	Переваги	Недоліки
Натрій-сірчані	Низька вартість. Велика кількість циклів. Висока щільність енергії та потужності. Широкий діапазон температур роботи, швидкостей та глибин розряду. Висока ефективність циклічного перетворення. Малочутливість до умов навколишнього середовища.	Експлуатація при температурах вище 300 <sup>0</sup> С. Суворі вимоги до експлуатації та обслуговування.
Проточні	Тривалий термін експлуатації – 20 років. Необмежена кількість циклів заряду та розряду. Універсальність щодо ємності акумулятора. Гнучка конструкція. Висока безпека.	Складність системи: потрібні насоси, датчики, управління потоком та потужністю і спеціальні трубопроводи та ємності. Низька щільність енергії.
Літій-іонні	Висока щільність енергії та потужності. Велика кількість циклів. Тривалий термін зберігання, не потребує обслуговування. Висока ємність та коефіцієнт перетворення. Низький внутрішній опір. Простий алгоритм та досить короткий час зарядки.	Необхідність у захисному контурі для захисту від перегріву. Деградація при високій температурі при роботі та зберіганні. Неможливість швидкого заряду при температурах нижче 0 <sup>0</sup> С. Спеціальні правила транспортування та зберігання (при великій кількості).

Найважливішим елементом, який визначає основні техніко-економічні показники BESS, є акумуляторна батарея. Найбільше застосування у світі знайшли свинцево-кислотні (PbA), нікель-кадмієві (Ni-Cd), натрій-сірчані (Na-S), нікель-металгідридні (Ni-MH), літій-іонні (Li-ion), проточні (RFB) акумулятори. Основні переваги та недоліки згаданих акумуляторів наведені в табл. 3, яка складена по матеріалах, наведених у [10].

В акумуляторних накопичувачах енергії останнім часом найчастіше застосовують літій-іонні акумулятори, вперше розроблені корпорацією Sony на початку 1990-х років [6]. Вони стали широко використовуватися в побутовій електроніці. На даний час у світі існує широкий спектр акумуляторів на основі літію. Зазвичай вони класифікуються за матеріалом катода та типу електроліту. Глибина розряду літійових акумуляторів становить 80–100%, круговий коефіцієнт перетворення – 92–96%, а життєвий цикл до 20 років [6]. Фахівцями Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії (США) створена база даних по накопичувачах електричної енергії [20, 21]. Питома вартість різних технологій накопичення енергії станом на 2021 р. наведена на рис. 2. [20, 21].

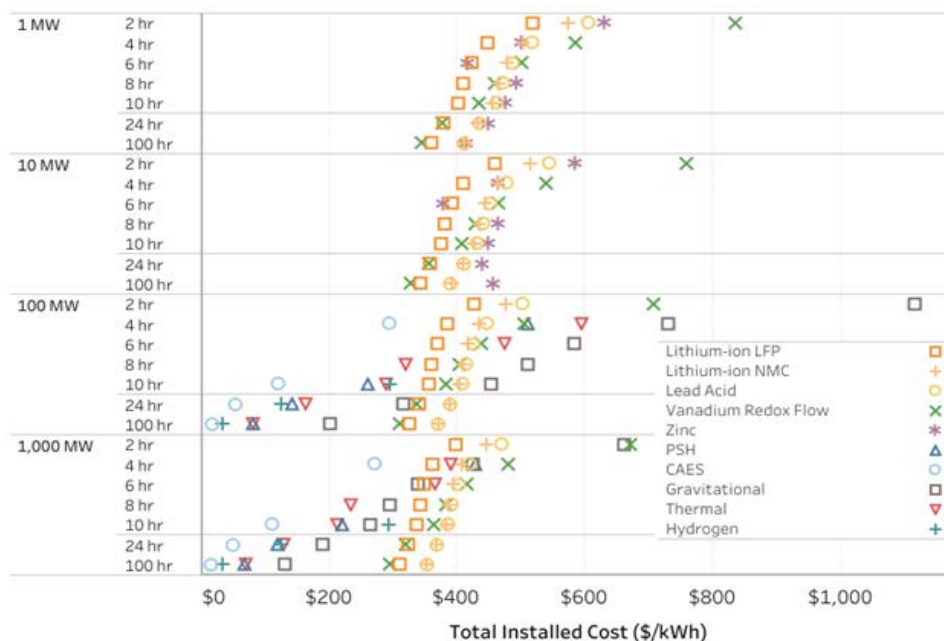


Рис. 2. Питомі витрати на акумуляційні системи накопичення енергії

Використовуючи інформацію, наведену у [20, 21], були побудовані графіки залежності питомих витрат LI-іон акумуляторних систем накопичення енергії в залежності від їх ємності (рис. 3).

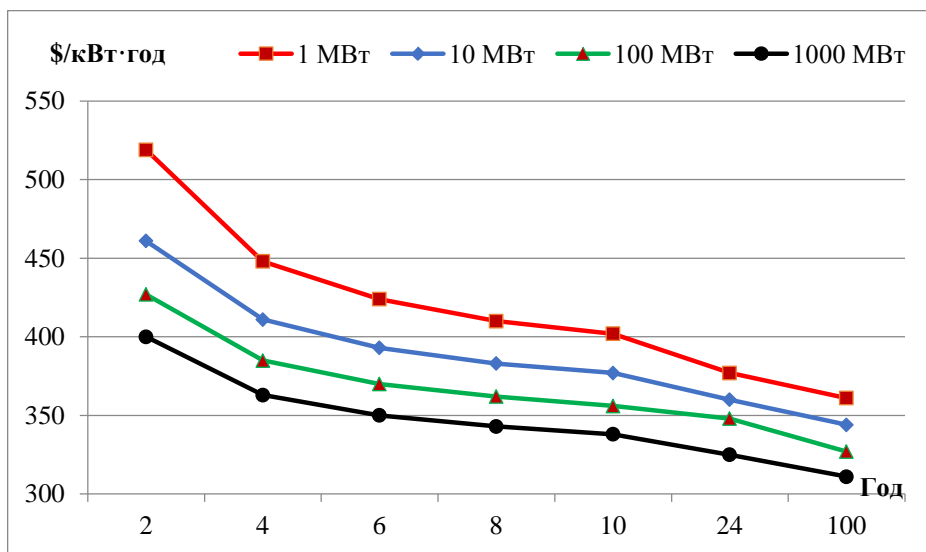


Рис. 3. Питомі витрати на LI-іон BESS

Розподіл витрат по складових BESS показано на рис. 4 [22].

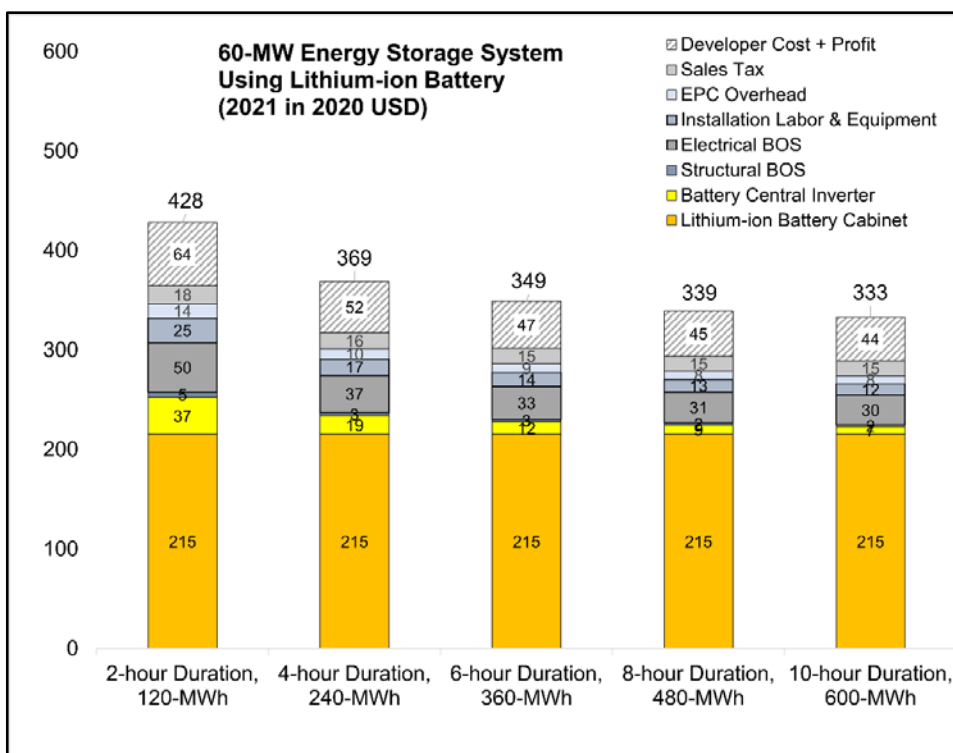


Рис. 4. Вартість складових BESS, \$/кВт·год

З рис. 4 видно, що в залежності від ємності BESS, LI-іон акумулятори становлять 50–65% від загальних інвестиційних витрат. За прогнозами, зробленими у [21], питома вартість LI-іон BESS у 2030 р. зменшиться на 23–25%. Приклади великих проєктів акумуляторних енергетичних накопичувачів наведено нижче.

Накопичувач енергії в Даляне, Китай. Проєкт є найбільшою у світі ванадієвою окислювально-відновлювальною акумуляуючою станцією для зберігання енергії потужністю 200 МВт та ємністю 800 МВт·год. Проєкт розроблено компаніями Rongke Power Co. Ltd. та UniEnergy



Technologies (UET) (Китай). Накопичувач призначений для зниження пікових навантажень [23]. У 2022 р. була введена в експлуатацію перша черга проєкту потужністю 100 МВт та ємністю 400 МВт-год [24].

Найбільша літій-іонна акумуляторна система Crimson Energy Storage була підключена до мережі у 2022 р. в Каліфорнії (США). Система має потужність 350 МВт та ємність 1400 МВт-год [25].

За інформацією, наведеною у [21], приведена середньозважена собівартість зберігання електроенергії (LCOS) в BESS потужністю 1–10 МВт та тривалістю до 10 годин (10–100) МВт-год становить 0,15–0,4 \$/кВт-год з тенденцією до подальшого її зменшення до 2030 р.

Застосування накопичувачів енергії. Накопичувачі енергії можуть стати важливим елементом електроенергетики в недалекому майбутньому. Вони суттєво змінять структуру енергетичних систем, замістивши собою частину теплових електростанцій, які надають допоміжні послуги, і тим самим обумовлять зменшення попиту на викопне паливо [5]. В роботах [8, 10, 13] наведені можливі варіанти застосування накопичувачів енергії в енергетиці, які були використані при написанні цього розділу.

Швидкодіючі накопичувачі енергії (наприклад, акумуляторні системи) можуть бути використані для регулювання частоти та потужності. Вони замінять або доповнять існуючі первинні та вторинні резерви регулювання. Усунення дисбалансу енергетичної системи відбудеться за декілька секунд, що значно покращить якість регулювання.

Іншим застосуванням накопичувачів може бути зменшення перетоків електроенергії як всередині енергосистеми, так і між енергосистемами. Надлишок електроенергії на джерелах виникає, коли системи первинного, вторинного та третинного регулювання вичерпали свій резерв. У такій ситуації для забезпечення балансу між потужністю та навантаженням диспетчер енергосистеми змушений перерозподіляти енергетичні потоки між енергосистемами, а за необхідності відключати ряд енергоблоків. Аналогічна ситуація відбувається і при виникненні дефіциту електроенергії (тільки енергоблоки не відключаються, а вводяться в роботу нові). Перетоки електроенергії обумовлюють виникнення додаткових втрат у мережах. При використанні накопичувачів надлишок електричної енергії акумулюється ними, а при виникненні дефіциту накопичувачі віддають її в мережу. Найкращим місцем розташування накопичувачів, безумовно, будуть джерела, де виникають надлишки електроенергії. Але все вирішується в конкретній ситуації.

Накопичувачі енергії також можна використовувати для зменшення коливань напруги в електричних мережах. Ці коливання виникають при включенні, виключенні та циклічній роботі потужних електричних приводів великих підприємств та потужних споживачів [26]. Вони збільшують втрати в мережах та трансформаторах, а також через електричні мережі впливають на інших споживачів. Використання накопичувачів енергії на території споживачів дозволить суттєво зменшити коливання напруги в мережах [26, 27] і, відповідно, втрати. При збільшенні споживання електроенергії приводами підприємства заряджений накопичувач включається в роботу як додаткове джерело генерації, запобігаючи тим самим зменшенню напруги в мережі. При зменшенні споживання електроенергії накопичувач заряджається, тим самим навантажуючи мережі і не даючи можливості для зростання напруги в них. Фактично відбувається стабілізація напруги в мережах.

Дуже ефективним заходом буде використання накопичувачів енергії для ущільнення добових графіків електричних навантажень енергосистем. Під час нічних провалів графіків електричних навантажень надлишок електричної енергії акумулюється в накопичувачах, що дасть змогу не відключати енергоблоки. Під час ранкового підйому навантаження накопичувачі віддають енергію, тим самим приймають участь у балансуванні енергосистеми. Використання накопичувачів дасть змогу вивести частину теплових електростанцій з роботи та підвищити потужність атомних станцій на базовому рівні навантаження.

Накопичувачі можна використати для запобігання перевантажень електричних мереж та трансформаторів. Споживання електроенергії промисловими підприємствами впродовж робочого часу нерівномірне. Існують моменти часу, коли навантаження на електричні мережі та трансформатори дуже високе, що викликає збільшення втрат електроенергії та прискорює їх старіння. Особливо ця ситуація може бути небезпечною (виникнення аварій), коли вказана інфраструктура зношена. Для запобігання виникнення аварійних ситуацій та зменшення втрат на території таких споживачів доцільно встановити накопичувачі енергії. При низькому споживанні

електричної енергії накопичувачі заряджаються, а при високому віддають акумульовану енергію як додаткове джерело. Тим самим вони згладжують коливання навантаження на мережі та трансформатори.

Накопичувачі енергії широко використовуються для підвищення надійності електропостачання як малих споживачів (джерела безперебійного живлення), так і великих. Прикладом може також слугувати один з найбільших у світі накопичувачів, встановлений компанією Tesla у 2017 р. в Австралії, потужністю 100 МВт та ємністю 129 МВт·год [28], який може понад годину забезпечувати електроенергією біля 30 тис. осель.

Використання накопичувачів енергії разом із сонячними та вітровими електростанціями зробить їх потужності більш прогнозованими, що значно полегшить їх імплементацію в ОЕС України.

Накопичувачі енергії також можна використовувати для комерційних цілей. Для цього необхідно купити дешеву електроенергію, коли її профіцит, та акумулювати в накопичувачах, потім під час пікових навантажень, коли електроенергія дорога, продати її. Це може бути однією із форм бізнесу для власників накопичувачів.

При впровадженні накопичувачів енергії може спостерігатися синергетичний ефект. Тобто, крім цільової функції, наприклад, підвищення надійності електропостачання, одночасно може спостерігатися покращення якості електроенергії: зменшення коливань напруги та частоти, збільшення коефіцієнту потужності, зменшення гармонійних складових та інше.

### 3. Висновки

1. Проведений огляд та порівняльний аналіз показали, що домінуючою у світі технологією акумулювання електричної енергії є гідроакумулюючі електростанції, витрати на впровадження яких становлять близько 220-511 \$/кВт·год (2000–2200 \$/кВт).

2. Накопичувачі енергії стиснутого повітря є найдешевшою технологією, але потребують наявності поблизу енергетичних систем природних або штучних печер.

3. Акумуляторні системи накопичення енергії розвиваються швидкими темпами, витрати на їх впровадження становлять 311–520 \$/кВт·год з тенденцією до зменшення до 2030 р. на близько 25%. У порівнянні з гідроакумулюючими електростанціями вони є більш перспективними для роботи в енергетичних системах, особливо для регулювання частоти та потужності, тому що їх швидкодія набагато більша. Крім того, ці накопичувачі можуть бути використані для зменшення перетоків електроенергії, зменшення коливань напруги в електричних мережах, ущільнення добових графіків електричних навантажень, запобігання перевантажень електричних мереж та трансформаторів, підвищення надійності електропостачання, підвищення стабільності роботи ВЕС та СЕС, а також для комерційних цілей в різних сегментах ринку електроенергії України. Використання накопичувачів енергії дозволяє відмовитися від великих резервних генеруючих електростанцій при збереженні надійності енергетичних систем та може призвести до зниження вартості електроенергії.

### Посилання

1. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. НЕК «Укренерго». URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyhpotuzhnostej-2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaU-bcSgozEmp5WPwCKtgz\\_xuvxuuQZLJ2wM](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyhpotuzhnostej-2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaU-bcSgozEmp5WPwCKtgz_xuvxuuQZLJ2wM) (дата звернення: 03.06.2020).
2. Інтеграція ВДЕ в енергосистему України. Укренерго. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/> (дата звернення: 03.06.2020).
3. Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. Проект. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> (дата звернення: 27.01.2021).
4. Блэкаут в Австралии: виноваты ВИЭ? URL: <http://renen.ru/australia-blackout-and-renewables/> (дата звернення: 27.01.2021).
5. Накопители в электроэнергетике. *Энергетический бюллетень*. 2018. № 60. С.14—18. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf> (дата звернення: 03.06.2020).

6. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. IRENA, 2017. URL: [https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf) (дата звернення: 09.03.2023).
7. ДТЕК запустив першу в Україні промислову систему накопичення енергії. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-enerгии/> (дата звернення: 09.03.2023).
8. Handbook on battery energy storage system. ADB, 2018. 92 p. <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>
9. Akhil A., Huff G., Currier A., Kaun B., Rastler D., Bingqing Chen S., Cotter A., Bradshaw D., Gauntlett W. DOE/EPR1 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. Sandia National Laboratories, 2013. 340 p. URL: <https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2021/09/SAND2013-5131.pdf> (дата звернення: 09.03.2023).
10. Обзор типов накопителей энергии. URL: <http://khd2.narod.ru/gratis/accumul.htm> (дата звернення: 27.01.2021).
11. RENEWABLES 2017. *Global Status Report*. 2017. 302 p. URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf) (дата звернення: 09.03.2023).
12. Фіалко Н.М., Тимченко М.П. Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення. *Промышленная теплотехника*. 2017. т. 39. № 4. С. 44—54. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/142376/07-Fialko.pdf?sequence=1> (дата звернення: 28.03.2021).
13. Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии – эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем. URL: [http://fondsmena.ru/media/EGM\\_publicationfiles\\_Article/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2\\_%D0%AE%D0%90.pdf](http://fondsmena.ru/media/EGM_publicationfiles_Article/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2_%D0%AE%D0%90.pdf) (дата звернення: 27.01.2021).
14. Соколов М.А., Томасов В.С., Jastrzębski R.P. Сравнительный анализ систем запасаения энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 4(92). С. 149—155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-sistem-zapasaniya-enerгии-i-opredelenie-optimalnyh-oblastey-primeneniya-sovremennyh-supermahovikov> (дата звернення: 27.01.2021).
15. Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids. International Energy Agency, 2009. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bb67be5-0b74-403f-ac02-395c3f3a0762/energy\\_storage.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bb67be5-0b74-403f-ac02-395c3f3a0762/energy_storage.pdf) (дата звернення: 09.03.2023).
16. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. *Учебное пособие для электроэнергетических специальностей вузов*. Москва: Высшая школа, 1989. URL: <https://forca.ru/knigi/arhiv/napokpiteli-enerгии-v-elektricheskikh-sistemah.html> (дата звернення: 09.03.2023).
17. Using Hot Sand To Store Energy. *Сайт Національна лабораторія відновлюваної енергії*. URL: <https://cleantechnica.com/2021/08/31/using-hot-sand-to-store-energy/> (дата звернення 27.03.2023).
18. What Is a «Sand Battery»? *Polar night energy company*. URL: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery> (дата звернення 16.03.2023).
19. Як українці створили найкращі накопичувачі енергії в світі. *Економічна правда*. 23.04.2018. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2018/04/23/636238/> (дата звернення: 09.03.2023).
20. Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, 2022. 174 p. URL: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf> (дата звернення: 09.03.2023).
21. Сайт Pacific Northwest National Laboratory. URL: <https://www.pnnl.gov/ESGC-cost-performance> (дата звернення: 09.03.2023).
22. Utility-Scale Battery Storage. *Сайт National Renewable Energy Laboratory*. URL: [https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale_battery_storage) (дата звернення: 09.03.2023).
23. ТОП-5 самых больших energy storage проектов 2020 года. *Сайт GETMARKET*. URL: <https://getmarket.com.ua/ua/news/top-5-najbil-shih-energy-storage-proektiv-2020-roku> (дата звернення: 09.03.2023).
24. Белоусова К. Названо ТОП-5 найбільших проєктів зі зберігання енергії у 2022 році. *Сайт Екополітика*. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/nazvano-top-5-najbilshih-proektiv-zi-zberigannya-enerгии-u-2022-roci/> (дата звернення: 09.03.2023).
25. Murray C. Biggest projects, financing and offtake deals in the energy storage sector in 2022 (so far). *Сайт Energy storage*. URL: <https://www.energy-storage.news/biggest-projects-financing-and-offtake-deals-in-the-energy-storage-sector-in-2022-so-far/> (дата звернення: 09.03.2023).
26. Стисло Б.О. Особливості застосування накопичувачів електричної енергії в системах електропостачання залізниці. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2018. № 9. С. 76—82. URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/36288/1/vestnik\\_KhPI\\_2018\\_9\\_Styslo\\_Osoblyvosti\\_zastosuvannia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/36288/1/vestnik_KhPI_2018_9_Styslo_Osoblyvosti_zastosuvannia.pdf) (дата звернення: 28.03.2023).
27. Хоменко О.В., Наконечний В.О. Застосування накопичувачів електроенергії для регулювання напруги в електричній мережі. *Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики*. 2020. С. 67—71. <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/231125> (дата звернення: 28.03.2023).

28. South Australia's big battery. Hornsdale Power Reserve. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au> (дата звернення: 09.03.2023).

## ELECTRIC ENERGY STORAGE

**Volodymyr Derii**, PhD (Engin.), Senior Researcher, <http://orcid.org/0000-0002-5689-4897>  
General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;  
e-mail: [derii.volodymyr@gmail.com](mailto:derii.volodymyr@gmail.com)

**Abstract.** *The article provides an analytical review of reverse-acting electric energy storage devices that can be used to solve systemic problems of the United Energy System of Ukraine. The need for the use of electric energy storage is due to the existing shortage of maneuverable capacities of the United Energy System and the construction of solar and wind power plants, which, due to the stochastic mode of operation, are a significant destabilizing factor. Due to the lack of market pricing mechanisms, the possibility of adjusting the rates of the "green" tariff, and the decrease in the cost of solar and wind power plant technologies, a rapid increase in their number and capacity has been observed in recent years. At the beginning of 2021, the installed capacity of solar power plants was 6.87 GW, and wind power plants – was 1.31 GW, and by 2030, their growth is planned to be 10.5 GW and 5.0 GW, respectively. Without adequate regulatory capacity, this can lead to catastrophic consequences, as happened in South Australia. The conducted review and analysis showed that the dominant technology of electric energy storage in the world is hydro-storage power plants, the implementation costs of which are about 260 USD/kWh. Compressed air energy storage is the cheapest technology but needs to be located near the energy systems of natural caves. Accumulator systems of energy storage are developing at a fast pace, the costs of their implementation are 311-520 USD/kWh with a tendency to decrease by 2030 by about 25%. They are the most promising for work in energy systems. These storage devices can be used to regulate frequency and power, reduce electricity flows, reduce voltage fluctuations in electrical networks, consolidate daily schedules of electrical loads, prevent overloads of electrical networks and transformers, increase the reliability of electricity supply, increase the stability of the operation of solar and wind power plants, as well as for commercial purposes in various segments of the electricity market of Ukraine.*

**Keywords:** energy system, electricity storage, power, capacity.

### References

1. Report on assessment of compliance (sufficiency) of generating capacities. NEC "Ukrenergo". URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyhpotuzhnostej-2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaU-bcSgozEmp5WPwCKtgz\\_xyvxuqQZLJ2wM](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/03/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyhpotuzhnostej-2019.pdf?fbclid=IwAR2dQAbmI14EsQ1pkcvQKXPBaU-bcSgozEmp5WPwCKtgz_xyvxuqQZLJ2wM) (last accessed: 06/03/2020).
2. Integration of RES into the energy system of Ukraine. Ukrenergo. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/> (last accessed: 03.06.2020).
3. National action plan for the development of renewable energy until 2030. Project. URL: <https://sae.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> (last accessed: 27.01.2021).
4. Blackout in Australia: RES are to blame? URL: <http://renen.ru/australia-blackout-and-renewables/> (last accessed: 27.01.2021).
5. Accumulators in the electric power industry. (2018). *Energy bulletin*, 60, 14–18. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf>. (last accessed: 03.06.2020).
6. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. (2017). IRENA. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf) (last accessed: 09.03.2023).
7. DTEK launched the first industrial energy storage system in Ukraine. URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-zapustil-pervuyu-v-ukraine-promyshlennuyu-sistemu-nakopleniya-energii/> (last accessed: 09.03.2023).
8. Handbook on battery energy storage system. (2018). 92 p. URL: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>
9. Akhil, A., Huff, G., Currier, A., Kaun, B., Rastler, D., Bingqing Chen, S., Cotter, A., Bradshaw, D., & Gauntlett, W. (2013). DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. Sandia National Laboratories, 340 p. <https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2021/09/SAND2013-5131.pdf> (last accessed: 09.03.2023).
10. Overview of energy storage types. URL: <http://khd2.narod.ru/gratis/accumul.htm> (last accessed: 27.01.2021).

11. RENEWABLES (2017). *Global Status Report*, 302 p. URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf) (last accessed: 09.03.2023).
12. Fialko, N.M., & Timchenko, M.P. (2017). Energy storage technologies within the intellectual energy supply systems. *Industrial heat engineering*, 39(4), 44–54. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/142376/07-Fialko.pdf?sequence=1> (last accessed: 28.03.2023).
13. Kulikov, Yu.A. Accumulators of electric energy – an effective tool for controlling the modes of electric power systems. URL: [http://fondsmena.ru/media/EGM\\_publicationfiles\\_Article/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2\\_%D0%AE%D0%90.pdf](http://fondsmena.ru/media/EGM_publicationfiles_Article/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2_%D0%AE%D0%90.pdf) (last accessed: 27.01.2021).
14. Sokolov, M.A., Tomasov, R.P., & Jastrzębski, V.S. (2014). Comparative analysis of energy storage systems and determination of optimal areas of application of modern superflywheels. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 4(92), 149–155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-sistem-zapasaniya-energii-i-opredelenie-optimalnyh-oblastey-primeneniya-sovremennyh-supermahovikov> [in Russian] (last accessed: 27.01.2021).
15. Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids. (2009). International Energy Agency. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bb67be5-0b74-403f-ac02-395c3f3a0762/energy\\_storage.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bb67be5-0b74-403f-ac02-395c3f3a0762/energy_storage.pdf) (last accessed: 09.03.2023).
16. Astakhov, Y.N., Venikov, V.A., & Ter-Gazaryan, A.G. (1989). Thermal energy storage. *Study guide for electrical engineering majors in higher education institutions*, Moscow: Higher school. URL: <https://forca.ru/knigi/arhivny/nakopiteli-energii-v-elektricheskikh-sistemah-9.html> (last accessed: 09.03.2023) [in Russian].
17. Using Hot Sand To Store Energy. *Website of the National Laboratory of Renewable Energy*. URL: <https://cleantechnica.com/2021/08/31/using-hot-sand-to-store-energy/> (last accessed: 27.03.2023).
18. What Is a «Sand Battery»? *Polar night energy company*. URL: <https://polarnightenergy.fi/sand-battery> (last accessed: 16.03.2023).
19. How Ukrainians created the best energy storage devices in the world. (23.04.2018). *Economic truth*. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2018/04/23/636238/> (last accessed: 28.03.2023).
20. Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. (2022). 174 p. URL: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf> (last accessed: 09.03.2023).
21. Website of the Pacific Northwest National Laboratory. URL: <https://www.pnnl.gov/ESGC-cost-performance> (last accessed: 09.03.2023).
22. Utility-Scale Battery Storage. *National Renewable Energy Laboratory*. URL: [https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2022/utility-scale_battery_storage) (last accessed: 09.03.2023).
23. TOP-5 largest energy storage projects of 2020. *GETMARKET*. URL: <https://getmarket.com.ua/ua/news/top-5-najbil-shih-energy-storage-proektiv-2020-roku> (last accessed: 09.03.2023).
24. Belousova, K. The TOP-5 largest energy storage projects in 2022 have been named. *Ecopolitics website*. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/nazvano-top-5-najbilshih-proiektiv-zi-zberigannya-energii-u-2022-roci/> (last accessed: 09.03.2023).
25. Murray, C. Biggest projects, financing and offtake deals in the energy storage sector in 2022 (so far). *Energy storage website*. URL: <https://www.energy-storage.news/biggest-projects-financing-and-offtake-deals-in-the-energy-storage-sector-in-2022-so-far/> (last accessed: 09.03.2023).
26. Styslo, B.O. (2018). The features of the use of energy storage devices in the Railway power supply system. *Bulletins of the Scieof theand Technical University "KhPI"*, 9, 76–82. URL: [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/36288/1/vestnik\\_KhPI\\_2018\\_9\\_Styslo\\_Osoblyvosti\\_zastosuvannia.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/36288/1/vestnik_KhPI_2018_9_Styslo_Osoblyvosti_zastosuvannia.pdf) (last accessed: 28.03.2023).
27. Khomenko, O.V., & Konecny, V.O. (2020). The use of electricity storage devices to regulate the voltage in the electrical network. *Modern Problems of Power Engineering and Automation*, 67–71. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/231125> (last accessed: 28.03.2023).
28. South Australia's big battery. Hornsdale Power Reserve. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au> (last accessed: 09.03.2023).

Надійшла до редколегії: 14.03.2023