

Щербина Д. В., аспірант, ORCID 0009-0000-2956-4385,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Т. Л. Кацадзе**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

МЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

MECHANICAL ENERGY STORAGE: TECHNOLOGY ANALYSIS AND APPLICATION IN POWER SYSTEMS

Анотація. У статті розглянуто сучасні механічні накопичувачі енергії, їхнє значення для стабілізації режимів енергетичних мереж та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Детально проаналізовано основні типи механічних накопичувачів: гравітаційні системи, маховикові накопичувачі та пневматичні системи зберігання енергії. Визначено переваги та недоліки кожної технології, а також окреслено перспективи їх застосування. Наведено приклади реалізації механічних накопичувальних систем у світовій практиці. Бібл. 13, табл. 1.

Ключові слова: механічні накопичувачі енергії, гравітаційні накопичувачі, маховики, пневматичні накопичувачі, енергосистеми.

Abstract. The article examines modern mechanical energy storage systems, their significance for stabilizing energy grids and integrating renewable energy sources. The main types of mechanical storage systems are analyzed in detail: gravity-based systems, flywheel storage, and compressed air energy storage (CAES). The advantages and disadvantages of each technology are identified, and prospects for their application are outlined. Examples of the implementation of mechanical energy storage systems in global practice are provided. Ref. 13, Tabl. 1.

Keywords: mechanical energy storage, gravity storage, flywheels, compressed air storage, energy systems.

Вступ. У зв'язку з активним розвитком відновлюваної енергетики та зростанням частки джерел енергії негарантованої потужності, питання ефективного накопичення енергії набуває дедалі більшої актуальності. Одним із перспективних напрямів є механічні накопичувачі енергії, які забезпечують високу надійність та ефективність. Сучасні механічні системи накопичення енергії включають гравітаційні, маховикові та пневматичні технології, що дозволяють накопичувати та вивільняти енергію в масштабах, необхідних для балансування режимів енергосистем.

Зростаючий попит на ефективні рішення у сфері накопичення енергії спонукає до дослідження та вдосконалення механічних накопичувачів. Важливим аспектом є їхня адаптація до сучасних умов експлуатації, зокрема інтеграція в енергосистеми.

Метою дослідження є проведення аналізу відомих видів систем накопичення енергії зокрема механічних накопичувачів енергії, визначення їхніх ключових переваг та недоліки, а також оцінка перспективи їх сфер

застосування для балансування режимів енергетичних систем із високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Матеріали та результати досліджень. Із самого початку використання енергії людство не лише намагалося ефективно її генерувати, а й знайти способи її збереження для подальшого використання. Ще в давні часи люди застосовували накопичувачі енергії у примітивних формах, наприклад, зберігаючи тепло в гарячому камінні або використовуючи водяні млини, що запасали потенційну енергію води для її подальшого перетворення на механічну роботу. З розвитком технологій та електрифікації суспільства проблема накопичення енергії стала ще актуальнішою.

У XIX та XX століттях із появою електричних мереж та перших електростанцій людство почало шукати ефективні методи накопичення енергії, щоб забезпечити стабільність постачання електроенергії. Було розроблено та впроваджено гідроакumuлювальні електростанції, що дозволяли запасати енергію у вигляді піднятої води, яка пізніше могла використовуватися для виробництва електроенергії. Також активно досліджувалися та впроваджувалися акумуляторні батареї, які відіграли ключову роль у розвитку електротранспорту та автономних енергетичних систем.

Сьогодні накопичення енергії є невід’ємною частиною енергетичних систем усього світу. Швидкий розвиток відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової, гідроенергії) призвів до необхідності створення ефективних систем збереження енергії, оскільки вироблення електроенергії цими джерелами є нерівномірним і залежить від погодних умов. Використання сучасних систем накопичення енергії дозволяє зменшити навантаження на енергомережі, підвищити їхню стабільність і забезпечити ефективне використання виробленої електроенергії. Зокрема, технології накопичення енергії, такі як рідке повітряне накопичення, набувають популярності завдяки своїй здатності зберігати великі обсяги енергії без географічних обмежень, характерних для гідроакumuлювальних станцій.

Систем накопичення енергії існує велика кількість, і кожна з них має свої особливості роботи та застосування. Для кращого розуміння принципів їхньої роботи, а також для уникнення плутанини, їх доцільно поділити на основні категорії за типом накопичення. Така класифікація дозволяє чітко визначити особливості кожного виду систем накопичення та їхню ефективність у різних сферах енергетики. Класифікацію типів накопичувачів представлено в табл. 1.

Механічні накопичувачі

Механічні накопичувачі енергії використовують механічні процеси для зберігання та вивільнення енергії. Основні типи таких систем включають гравітаційні накопичувачі енергії, маховикові системи та пневматичні системи.

Таблиця 1. Основні категорії накопичувачів енергії

Пор.№	Тип накопичення	Вид накопичувача
1	Механічні накопичувачі	Гравітаційні накопичувачі енергії (гідроакумулювальні електростанції, системи з підйомом вантажів)
		Маховикові системи накопичення енергії
		Пневматичні системи (накопичення енергії стисненого повітря)
2	Хімічні накопичувачі	Водневі системи (виробництво водню шляхом електролізу та його подальше використання)
		Синтетичні паливні системи (метанол, аміак тощо)
3	Електрохімічні накопичувачі	Свинцево-кислотні акумулятори
		Нікель-кадмієві акумулятори
		Лужні нікель-залізні акумулятори
		Нікель-металогідридні акумулятори
		Літій-іонні акумулятори
		Літій-полімерні акумулятори
		Літій-залізо-фосфатний акумулятор
		Натрій-сірчані акумулятори
		Цинко-повітряні акумулятори
		Натрій-іонні акумулятори
4	Теплові накопичувачі	Твердотільні акумулятори
		Системи з розплавленими солями
		Теплові акумулятори на основі фазових переходів
5	Електромагнітні накопичувачі	Накопичення теплової енергії в нагрітих твердих матеріалах (камінь, бетон)
		Суперконденсатори
6	Кріогенні накопичувачі	Системи на основі надпровідникових магнітних накопичувачів (SMES)
		Кріогенні системи зберігання енергії (LAES – <i>Liquid Air Energy Storage</i>)

Гравітаційні накопичувачі енергії

Принцип роботи. Гравітаційні накопичувачі працюють за рахунок переміщення маси (води або твердого вантажу) на певну висоту під час надлишкового вироблення енергії. При необхідності енергія вивільняється, коли маса опускається, обертаючи генератор. Основні технології включають: гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) – підйом води в резервуар і її спуск для вироблення енергії; системи з підйомом вантажів – використання електродвигунів для підняття маси та генераторів для зворотного процесу (як правило один і той же агрегат виконує обидві функції по чергові) [1].

До переваг даного типу накопичення слід віднести: високу надійність і довговічність (до 50 років експлуатації); високий ККД (до 80 % для ГАЕС, 70–85 % для твердих вантажів); можливість зберігання великої кількості енергії (до 10 ГВт·год) [2]. Крім того, такі системи відзначаються екологічною безпекою — в процесі роботи вони не продукують шкідливих викидів, не потребують використання рідкісноземельних або токсичних матеріалів, що сприяє їхній інтеграції у «зелену» енергетику.

Звісно, присутні і негативні моменти в даного типу систем: великі капітальні витрати; високі вимоги до місцевості (наявність водойм або відповідних геологічних умов). Однак сучасні інженерні рішення поступово долають ці обмеження — зокрема, впроваджуються вертикальні шахтні конструкції або модульні системи, здатні працювати у складних умовах або в урбанізованому середовищі. Окрему увагу приділяють питанням повторного використання існуючої інфраструктури (наприклад, старих шахт), що знижує витрати на будівництво і мінімізує екологічний вплив.

Слід зазначити, що подібні системи накопичення вже не один рік використовуються в великій кількості країн, для прикладу ГАЕС “Bath County” у штаті Вірджинія (США) 1985 рік – 3 ГВт потужності [3] або Київська ГАЕС розташована в Київській області, 1970 ті роки і зазначеною потужністю 235,5 МВт [4]. Окремо можна відзначити системи Швейцарської компанії Energy Vault, що побудувала вже кілька гравітаційних систем накопичення на основі підняття вантажу в США та Китаї. Проєкт в Китаї введений в експлуатацію ще в вересні 2023 року з максимальною потужністю 25 МВт та має назву EVx [5].

До сфер застосування подібних гравітаційних систем відносяться переважно балансування енергосистем із ВДЕ та довгострокове накопичення енергії для пікових навантажень. З огляду на глобальну декарбонізацію та активне зростання частки ВДЕ, очікується подальше розширення використання гравітаційних накопичувачів у енергетичних системах нового покоління. Окрім того, даний тип технології може бути інтегрований в мікромережі, забезпечуючи локальну енергетичну автономію для окремих об’єктів або населених пунктів.

Маховикові системи накопичення енергії

Принцип роботи. Маховикові системи накопичення енергії працюють на основі збереження кінетичної енергії у швидкообертовому роторі (маховику). Під час надлишкового вироблення енергії електродвигун розкручує маховик, накопичуючи енергію. При необхідності зворотний процес дозволяє використовувати кінетичну енергію маховика для генерації електроенергії через генератор. Основні технології включають: вакуумні маховики – розміщення маховика у вакуумній камері для мінімізації втрат через аеродинамічний опір; надпровідні підшипники – використання магнітної левітації для зменшення тертя; композиційні матеріали – застосування карбонових волокон і легких сплавів для підвищення міцності та зниження маси [6].

До переваг даного типу накопичення слід віднести: висока швидкість зарядки та розрядки (від секунд до хвилин); довговічність (понад 20 років експлуатації без значного зносу); висока ефективність (ККД до 90 %); екологічність – відсутність токсичних або рідкісноземельних матеріалів; компактність – можливість встановлення у міських умовах. Сучасні розробки також зосереджуються на інтеграції маховикових систем у модулі для мікромереж та розумних енергосистем (smart grid), де вони виконують роль буфера енергії при коливаннях навантаження або генерації. У промислових і

комерційних умовах маховики застосовуються як UPS-системи (джерела безперебійного живлення), що забезпечують миттєве покриття енергоспоживання при аварійному відключенні основного джерела живлення [7].

Що стосується недоліків то основними з них є: обмежена ємність – зазвичай використовується для короткочасного накопичення енергії; високі оберти потребують складної інженерної реалізації (контроль стабільності при швидкостях до 50 000 об/хв); чутливість до механічних пошкоджень – можливість руйнування при сильному ударі. Проте, впровадження удосконалених корпусів з високою енергоємністю та багаторівневих систем безпеки значно знижує ризики та підвищує надійність таких систем. Додатково, сучасні системи моніторингу й управління забезпечують постійний контроль температури, обертів та вібрацій, що дає змогу вчасно виявляти несправності та запобігати аваріям.

Яскравим прикладом використання маховиків в енергетичній сфері є Китай, де в місті Чанчжі (провінція Шаньсі) в 2024 році було введено в експлуатацію та підключено до електромережі найпотужнішу маховикову систему накопичення в світі. Вихідна потужність станції сягає 30 МВт, така цифра досягається завдяки 120 високошвидкісним маховикам з магнітною левітацією[8]. Попередній рекорд тримала маховикова станція в штаті Нью-Йорк “Beacon Power” загальною потужністю 20 МВт, яка була введена в експлуатацію ще в 2011 році [9].

З розглянутих механічних типів накопичувачів саме маховикові охоплюють досить різноманітні сфери застосування, а саме: балансування енергосистем (регулювання частоти електромережі); транспорт (електричні та гібридні транспортні засоби); космічна галузь (системи стабілізації супутників і космічних станцій). Також перспективним напрямом є використання маховиків у швидкісних залізничних системах для рекуперації енергії при гальмуванні поїздів. Їх гнучкість, швидкодія та екологічність роблять маховики перспективним компонентом майбутньої енергетичної інфраструктури, зокрема в умовах децентралізованого енергопостачання та переходу до цифрових енергетичних систем.

Пневматичні системи накопичення енергії

Принцип роботи. Пневматичні системи накопичення енергії (CAES – *Compressed Air Energy Storage*) зберігають енергію шляхом стиснення повітря у підземних резервуарах або спеціальних балонах. При необхідності енергія вивільняється шляхом розширення стисненого повітря через турбіну, що обертає генератор. Основні технології включають: ізотермічні CAES – використання технологій охолодження та нагрівання повітря для підвищення ефективності; адіабатичні CAES – збереження тепла, що утворюється при стисненні, для подальшого використання під час розширення; гібридні CAES – комбіновані системи з використанням відновлюваних джерел енергії [10].

Яскравими перевагами даного типу є можливість зберігання великих обсягів енергії (до 300 МВт·год); висока довговічність (до 40 років експлуатації); відносно низька вартість у порівнянні з акумуляторними

технологіями; сумісність з відновлюваними джерелами енергії (наприклад, вітроенергетикою) [11]. Крім того, такі системи можуть працювати у широкому діапазоні температур і мають низький рівень деградації з часом, що робить їх перспективними для довгострокового зберігання енергії. Інтеграція з цифровими системами керування дозволяє оптимізувати процес стиснення і розширення повітря для підвищення загальної ефективності. Крім того, такі системи можуть працювати у широкому діапазоні температур і мають низький рівень деградації з часом, що робить їх перспективними для довгострокового зберігання енергії. Інтеграція з цифровими системами керування дозволяє оптимізувати процес стиснення і розширення повітря для підвищення загальної ефективності.

Але є і деякі суттєві недоліки, до яких належить низький ККД (40-70 % залежно від технології); необхідність спеціальних геологічних умов (соляні каверни, підземні сховища); витрати енергії на стиснення та нагрівання повітря [11]. Водночас, активні дослідження спрямовані на створення наземних модульних CAES, які можуть працювати без геологічної прив'язки, що відкриває нові можливості для використання цієї технології у регіонах з обмеженим підземним простором. Водночас, активні дослідження спрямовані на створення наземних модульних CAES, які можуть працювати без геологічної прив'язки, що відкриває нові можливості для використання цієї технології у регіонах з обмеженим підземним простором.

Звісно на практиці існують вдалі реалізації пневматичних систем накопичення. До таких систем відноситься Huntorf CAES (Німеччина), що вважається першою великою комерційною установкою запущеною в 1978 році з потужністю 290 МВт, на даний час ця система має потужність 321 МВт, через модернізацію та розвиток технологій, що позитивно впливає і на ККД [12]. Іншим прикладом є проєкт McIntosh CAES у США, що продовжує працювати з початку 1990-х, демонструючи стабільність і життєздатність технології. У 2020-х роках також з'явилися нові інноваційні проєкти у Китаї та Канаді, які демонструють здатність CAES-технологій працювати в умовах змінного клімату та високої енергетичної нестабільності. Ці проєкти передбачають використання штучних резервуарів замість природних, що значно розширює можливості масштабування [13].

Найбільш поширеними сферами застосування для пневматичних систем стали: регулювання енергосистем (балансування попиту та пропозиції електроенергії); інтеграція з ВДЕ (накопичення надлишкової енергії вітро- та сонячних електростанцій); промислові застосування (резервне живлення великих споживачів) [14]. Дедалі більше уваги приділяється також застосуванню CAES у транспортній галузі, зокрема як джерело енергії для магістральних електровозів та автономного електротранспорту, що відкриває нові горизонти розвитку галузі накопичення енергії [15].

Висновки. Проведений аналіз механічних накопичувачів енергії свідчить про їхню ключову роль у підвищенні стабільності та надійності сучасних енергосистем, особливо в умовах зростаючої частки відновлюваних джерел енергії. Гравітаційні накопичувачі демонструють високу

ефективність у довготривалому зберіганні енергії, маховикові системи забезпечують оперативне регулювання потужності, а пневматичні технології відкривають можливості для масштабного накопичення з оптимальними витратами.

Попри значний потенціал цих технологій, їх широкомасштабне впровадження стримується низкою технічних, екологічних та економічних обмежень, включаючи високі капітальні витрати та необхідність адаптації до конкретних умов енергосистеми. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення ефективності процесів накопичення і віддачі енергії, розробку нових матеріалів і технологічних рішень, що сприятимуть розширенню сфер застосування механічних накопичувачів та і інших систем у сучасній енергетиці.

Крім того, особливої актуальності набуває інтеграція механічних накопичувачів з інтелектуальними системами керування, що дозволяє підвищити гнучкість та швидкодію енергетичних мереж. Перспективним напрямом є створення гібридних рішень, які поєднують механічне накопичення з іншими видами зберігання енергії, зокрема хімічними та тепловими. Це дозволить не лише оптимізувати витрати, а й забезпечити вищий рівень адаптивності до мінливих умов споживання та генерації електроенергії.

Узагальнюючи, механічні накопичувачі є важливим елементом стратегії сталого енергетичного розвитку, і їхнє подальше вдосконалення є необхідною умовою для формування децентралізованої, ефективної та екологічно безпечної енергосистеми майбутнього.

Список використаних джерел

1. P. Denholm E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010, pp. 18–22.
2. A. Hunt, T. Byers, “Gravity Energy Storage: A Review”, Applied Energy, vol. 252, 2019, pp. 113–128.
3. Вікіпедія Вільна енциклопедія. Стаття – ГАЕС Bath County. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 03.03.2025).
4. Вікіпедія Вільна енциклопедія. Стаття – Київська ГАЕС. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 03.03.2025).
5. Ecotechnica. Енергетичні технології. Комерційний гравітаційний накопичувач. URL: <https://ecotechnica.com.ua> (дата звернення 03.03.2025).
6. J. E. Hittinger, T. C. Johnson, “Flywheel Energy Storage in Power Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, No. 2, 2019, pp. 345–356.
7. Beacon Power. “Flywheel Energy Storage Systems”. pp. 4, 11–12. URL: <https://beaconpower.com> (дата звернення 06.03.2025).
8. ENERGY THEORY. Dinglun Flywheel Energy Storage Power Station. URL: <https://energytheory.com> (дата звернення 06.03.2025).
9. NBC. Beacon Power Flywheel Plant. URL: <https://www.nbcnews.com> (дата звернення 07.03.2025).
10. P. C. Gibb, “Compressed Air Energy Storage Technologies”, Applied Energy, vol. 250, 2019, pp. 98–115.

11. Science Direct. Journal of Energy Storage. Physical design, techno-economic analysis and optimization of distributed compressed air energy storage for renewable energy integration. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 07.03.2025).
12. Habr. Compressed Air Energy Storage (CAES). URL: <https://habr.com> (дата звернення 08.03.2025).
13. Clean Power Professionals Group (Only CAES in the USA). URL: <https://energycentral.com/c/cp/only-caes-usa> (дата звернення 08.03.2025).
14. R. Kushnir, “Advanced CAES Systems for Renewable Integration”, Journal of Energy Storage, vol. 33, 2021, pp. 129–141.
15. Science Direct. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 08.03.2025).

References

1. P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010, pp. 18–22.
2. A. Hunt, T. Byers, “Gravity Energy Storage: A Review”, Applied Energy, vol. 252, 2019, pp. 113–128.
3. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Article – Bath County Pumped Storage Station. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
4. Wikipedia, the free encyclopedia. Article – Kyiv PSP. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
5. Ecotechnica. Energy Technologies. Commercial Gravity Storage. URL: <https://ecotechnica.com.ua> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
6. J. E. Hittinger, T. C. Johnson, “Flywheel Energy Storage in Power Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, No. 2, 2019, pp. 345–356.
7. Beacon Power. “Flywheel Energy Storage Systems”. pp. 4, 11–12. URL: <https://beaconpower.com> (accessed 06.03.2025).
8. ENERGY THEORY. Dinglun Flywheel Energy Storage Power Station. URL: <https://energytheory.com> (accessed 06.03.2025).
9. NBC. Beacon Power Flywheel Plant. URL: <https://www.nbcnews.com> (accessed 07.03.2025).
10. P. C. Gibb, “Compressed Air Energy Storage Technologies”, Applied Energy, vol. 250, 2019, pp. 98–115.
11. Science Direct. Journal of Energy Storage. Physical design, techno-economic analysis and optimization of distributed compressed air energy storage for renewable energy integration. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed 07.03.2025).
12. Habr. Compressed Air Energy Storage (CAES). URL: <https://habr.com> (accessed 08.03.2025).
13. Clean Power Professionals Group (Only CAES in the USA). URL: <https://energycentral.com/c/cp/only-caes-usa> (дата звернення 08.03.2025).
14. R. Kushnir, “Advanced CAES Systems for Renewable Integration”, Journal of Energy Storage, vol. 33, 2021, pp. 129–141.
15. Science Direct. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 08.03.2025).