

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація:** Впровадження систем накопичення електричної енергії відкриває нові можливості для покращення управління електричними режимами та підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем. Сучасні технології використовують різні типи акумуляторів, такі як електрохімічні батареї, системи на стисненому повітрі, надпровідникові накопичувачі, суперконденсатори та гідроакумулявальні електричні станції для зберігання енергії. У роботі проведено огляд різних типів систем зберігання енергії, які знаходяться на різних стадіях розробки та впровадження. Представлено порівняння основних характеристик цих систем, що використовуються в електроенергетиці.

**Ключові слова:** системи накопичення енергії, акумулятори, енергосистема.

**Abstract.** Utilizing electrical energy storage systems presents fresh opportunities to enhance the efficiency of electrical operation management and optimize the performance of electrical power systems. In contemporary times, there is a growing utilization of novel energy storage technologies for various storage purposes. These include electrochemical energy storage, compressed-air storage, superconducting storage, supercapacitors, and pumped-storage power plants. A concise examination of diverse storage system types at different stages of development and implementation is conducted. The key characteristics of energy storage systems are outlined, facilitating a comparison of various technologies applicable to the power industry.

**Keywords:** energy storage systems, batteries, energy system.

### Вступ

Використання систем накопичення електричної енергії (СНЄЕ) відкриває нові можливості для покращення якості управління режимами та оптимізації функціонування електроенергетичних систем. У наш час, в рамках становлення нової промислової революції, технології зберігання енергії все частіше використовуються для регулювання як усталених, так і перехідних режимів в електроенергетичних системах, незважаючи на високі витрати на виробництво. Наприклад, у 2018 році Комісією з регулювання в енергетиці США було прийнято рішення допустити системи зберігання енергії до участі в ринках електроенергії та потужності, які розташовані в операційних зонах енергетичних компаній з ліцензією незалежного системного оператора або оператора системи передачі. Згідно з цим рішенням, існуючу модель ринку енергії, орієнтовану на традиційне виробництво, слід переглянути для впровадження систем зберігання енергії [1-3].

Обмеження на будівництво гідроакумулявальних електростанцій пов'язано з наявністю водних резервуарів або значними витратами при їх штучному створенні. Однак останнім часом активно реалізуються проекти з введення в експлуатацію нових типів накопичувачів, таких як електрохімічні акумуляторні батареї, надпровідникові накопичувачі, накопичувачі на стиснутому повітрі та суперконденсатори.

Вартість систем зберігання енергії може бути виправдана рядом переваг, таких як інтеграція відновлюваних джерел енергії в енергосистему, оптимізація потокорозподілу в електричних мережах для зменшення обсягу будівництва додаткових елементів в енергосистемі, отримання швидкодіючих засобів регулювання режиму та підвищення надійності електропостачання для споживачів. Попередні прогнози передбачають комерційно вигідне виробництво батарей для електромобілів приблизно до 2025-2030 років. Динаміка зниження вартості деяких типів накопичувачів вказана в [4].

### Результати дослідження

Системи накопичення електричної енергії відіграють ключову роль у функціонуванні будь-якої енергетичної системи. Головне їхнє завдання полягає в тому, щоб накопичувати електроенергію в періоди низького попиту, особливо в базові періоди графіка навантаження, і відпускати її під час максимального споживання (в пікові періоди графіка навантаження). В сучасному світі основними завданнями використання СНЄЕ у електроенергетичних системах є:

- покриття пікових навантажень;

- регулювання частоти і напруги;
- заміщення обертового резерву;
- зменшення завантаженості ліній електропередавання;
- підвищення надійності та якісних показників електропостачання;
- забезпечення інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистему.

Існують різні методи накопичення енергії, такі як механічний, термічний, хімічний, електрохімічний і електричний. Класифікація основних типів СНЕЕ, заснована на різних методах накопичення, представлена на рис. 1, враховуючи принципи класифікації, які представлені в джерелі [5].

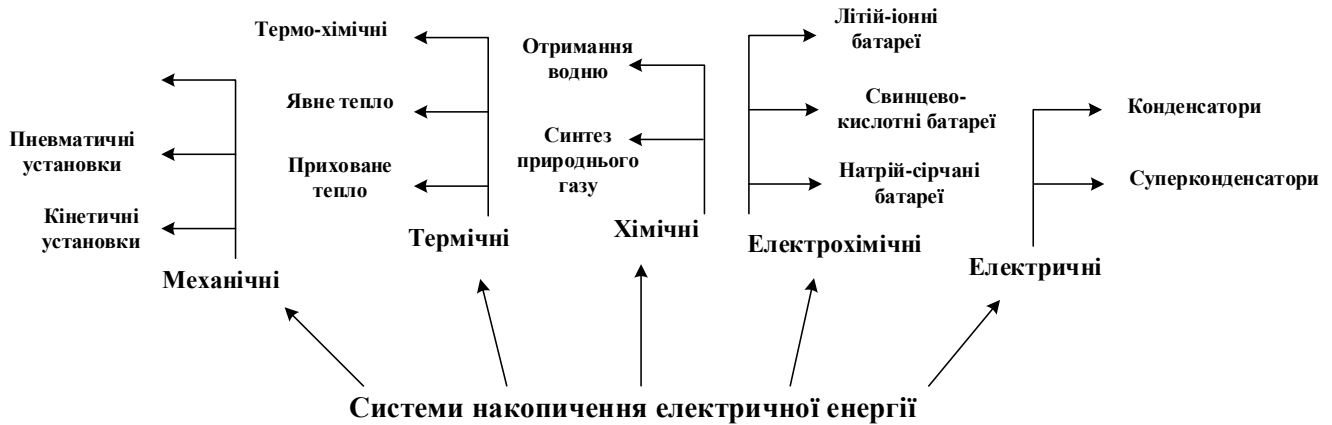


Рис. 1 – Класифікація систем накопичення електричної енергії

При впровадженні СНЕЕ важливо враховувати різні аспекти їхнього застосування, зокрема, технічні характеристики (ємність, термін служби, час заряду та розряду, час відгуку, кількість циклів заряду/розряду) та економічні аспекти (вартість, витрати на одиницю потужності та електроенергії, яка накопичується). Також важливо враховувати ступінь зрілості технологій з погляду комерціалізації, їх вплив на навколишнє середовище та запланований характер застосування.

Функціональні можливості та області використання технологій накопичення енергії залежать від їхніх характеристик. Одна з основних груп характеристик визначається номінальними значеннями потужності та енергії. Номінальна потужність визначає швидкість заряду/розряду, а номінальна енергія відображає тривалість розряду. Динамічні характеристики оцінюють час відгуку та швидкість лінійних змін параметрів накопичувача. Час відгуку представляє собою період, протягом якого накопичена енергія переходить від нульового рівня розряду до повного розряду, а швидкість зміни визначає темп, з яким може змінюватися вихідна потужність.

Габаритні характеристики, які мають значення при використанні систем накопичення енергії в розподільних системах, залежать від потужності накопичувача та густини енергії. Основні характеристики СНЕЕ, які визначають вибір у розподільних системах, показані в таблиці 1.

Розуміючи, що впровадження СНЕЕ, особливо великомасштабне, потребує значних інвестицій, вибір правильної стратегії на основі очікуваного економічного вигаду стає складним завданням. Враховуючи різні аспекти їхнього використання, такі як технічні і економічні особливості різних технологій акумулювання енергії, ступінь зрілості комерційної експлуатації, вплив на навколишнє середовище, а також завдання, які планується вирішувати за рахунок їх застосування, на разі наводження числових значень цих характеристик для різних СНЕЕ може бути непродуктивним, оскільки в літературі існують значні відхилення в цих показниках.

Використання СНЕЕ має широкий спектр можливих застосувань в електричних мережах, зокрема в розподільних системах. СНЕЕ може забезпечувати швидкі, негайні відгуки на виникнення різноманітних збурень, які можуть тривати від декількох секунд до тривалих періодів часу. Вони також можуть бути застосовані для компенсації падінь напруги та компенсації реактивної потужності, одночасно вирішуючи завдання усунення гармонійних спотворень. У розподільних мережах важливим аспектом є використання розподілених СНЕЕ для вирівнювання розподілу навантаження між фідерами, що сприяє більш ефективному використанню наявних засобів регулювання напруги.

Таблиця 1 - Основні характеристики СНЕЕ

Характеристика	Опис
<b>Час саморозряду</b>	Визначає період, протягом якого зберігається заряд у накопичувачі. Електрохімічні накопичувачі більше схильні до саморозряду через взаємодію хімічних реакцій у їхньому внутрішньому середовищі. Ця характеристика стає менш визначальною у випадку регулярного використання накопичувача. Однак для ситуацій, де накопичувачі використовуються нечасто (зокрема, перебуваючи в режимі очікування), час саморозряду може стати важливим критерієм.
<b>Життєвий цикл накопичувача</b>	Визначається його здатністю працювати протягом часу, і, зазвичай, більшість накопичувачів енергії піддаються деградації з кожним циклом заряду-розряду, а також залежать від глибини розрядки. Швидкість деградації залежить від технології зберігання енергії, умов експлуатації та інших факторів. Цей аспект набуває особливого значення для електрохімічних батарей, оскільки неглибокий розряд менше впливає на їхню деградацію порівняно з глибоким розрядом.
<b>Щільність потужності</b>	Визначається поділом номінальної вихідної потужності на об'єм акумуляційного пристрою. З свого боку, щільність енергії розраховується як відношення накопиченої енергії до об'єму. Тут об'єм накопичувача включає в себе загальний об'єм системи накопичувача, що охоплює сам накопичувальний елемент, аксесуари, відповідні конструкції та перетворювальну систему. Ці критерії стають ключовими в умовах обмеженого простору або в ситуаціях, де вага накопичувача має велике значення, особливо у розподільних системах.
<b>Тривалість розряду</b>	Визначає час, протягом якого накопичувач може видалятися при номінальній вихідній потужності без необхідності підзарядки. Деякі типи систем зберігання можуть втрачати енергію з високою швидкістю протягом короткого періоду часу, але їхня ефективність у таких випадках може бути нижчою. Наприклад, накопичувач може функціонувати при номінальній потужності 1 МВт протягом трьох годин з ККД 80%; та ж сама система може надавати 1,5 МВт протягом 10 хвилин з ККД 65%.
<b>Швидкість лінійної зміни розряду</b>	Це темп, з яким може змінюватися вихідна потужність накопичувача. Зазвичай швидкість збільшення потужності накопичувача дуже висока, варіюючись від мілісекунд до декількох секунд для переходу від нуля до максимального значення, залежно від конкретної технології.
<b>Загальна ефективність системи зберігання</b>	Визначається відношенням виведеної з системи енергії до загальної накопиченої в ній енергії. У випадку частого використання накопичувачів, як це має місце в розподільних системах, важливо досягти ККД на рівні понад 80%, оскільки це враховує втрати енергії під час кожного циклу.
<b>Швидкість заряджання</b>	Це темп, з яким може відбуватися процес зарядки накопичувача. Якщо накопичувач не може швидко заряджатися, то йому може бракувати енергії для надання необхідної послуги. Наприклад, акумулятор, як правило, заряджається зі швидкістю, схожою на ту, з якою відбувається його розрядка.
<b>Час відгуку</b>	Визначається як період, необхідний для переходу від повної відсутності розряду до розряду при номінальній вихідній потужності. Зазвичай час відгуку накопичувача є коротким порівняно із деякими типами генерації, для яких може знадобитися кілька хвилин, щоб досягти повної потужності, наприклад, у турбін внутрішнього згорання. У ідеалі, накопичувач повинен працювати з максимальною

	ефективністю та номінальним часом відгуку при будь-якому рівні заряду.
--	--

Якість електроенергії великою мірою визначається підтримкою частоти та напруги в межах допустимого діапазону, забезпечуючи синусоїдальну форму. З огляду на введення в дію обладнання силової електроніки, яке може породжувати гармоніки, а також зростання нелінійних навантажень, СНЕЕ може бути важливим інструментом для компенсації цих спотворень.

Крім того, стохастичні зміни в навантаженні, використання електроприймачів з великим споживанням реактивної потужності та перехід від роботи в паралель з енергосистемою до ізолюваної роботи є додатковими факторами, які можуть призводити до проблем з якістю електроенергії. Такі проблеми включають в себе коливання потужності та, відповідно, напруги, провали та стрибки напруги, а також низький коефіцієнт потужності. Таким чином, різке підняття чи зниження (у разі зворотного потоку потужності) напруги у споживачів може розглядатися як проблема якості електроенергії. Поряд із коливаннями напруги, які виникають, ці фактори можуть спричинити відключення або неправильну роботу мережевого електрообладнання.

У таких сценаріях використання традиційних пристроїв регулювання під навантаженням та інших регуляторів напруги може бути неефективним. Тому необхідний інший механізм підтримки для управління відхиленнями напруги в припустимому діапазоні для забезпечення стабільної роботи системи розподільчих енергоресурсів.

Слід відзначити, що у мікросистемі відношення активного опору лінії до її реактивного опору, на відміну від системи передачі електроенергії, є значним, тому вплив активної та реактивної потужностей на частоту та напругу не взаємопов'язаний. У режимі підключення до мережі мікросистема поглиблює енергію з енергосистеми при дефіциті потужності від її джерел, і надсилає її назад в мережу при надлишковому виробництві енергії. Отже, основною проблемою у режимі підключення до мережі є не стійкість частоти, але і стійкість напруги. У зв'язку з цим аналіз малих та великих порушень (перехідних процесів) зазвичай виконується для режиму напруги.

В ізолюваному режимі, оскільки мікросистема електророзподілу незалежна від основної мережі, вона відповідає за підтримання стійкості як напруги, так і частоти. Додатково, у розподільних системах часто присутній великий обсяг як однофазних навантажень, так і однофазних джерел генерації. Тому для безпечної та ефективної роботи таких систем необхідно додатково балансувати навантаження та генерацію між окремими фазами. Однофазні системи зберігання енергії можуть допомогти у вирішенні дисбалансу у фазах, якщо вони інтегровані в кожен фазу окремо та обмінюються активною та реактивною потужностями.

## Висновки

Розвиток технологій накопичення енергії прогресує швидкими темпами, що призводить до все більшого застосування систем накопичення енергії в практиці керування режимами електроенергетичних систем. Аналіз у контексті глобального розвитку технологій, суспільства та економіки, а також впливу на кінцеву конфігурацію енергосистеми підкреслив, що незалежно від прогнозних сценаріїв, ключовими стратегічними завданнями для держави та енергетичних компаній у сфері розвитку електроенергетики є:

- Набуття нових компетенцій, знань та технологій у сфері акумуляції енергії.
- Розробка та впровадження передових технологій в галузі енергозбереження.
- Дослідження невирішених проблем використання систем накопичення енергії.

Наприклад, централізоване розподілення резерву для первинного та вторинного регулювання, розташованого в системах зберігання енергії в різних енергетичних вузлах, сприятиме зниженню аварійних перетоків у разі дефіциту активної потужності, що в свою чергу підвищить максимально допустимі перетоки в контрольованих мережевих точках. Короткий час відгуку, значні потужності та енергоємності відкривають перспективи для використання систем накопичення енергії як ефективного інструмента для управління як усталеними, так і перехідними режимами роботи електроенергетичних систем.

На відміну від енергосистем, де використання потужних систем накопичення енергії спрямоване переважно на реалізацію обмеженого набору завдань, у розподільних мережах постає багато різнопланових цілей. Ефективне вирішення цих цілей за допомогою єдиної технології є практично неможливим. Таким чином, виникає проблема визначення оптимальних параметрів окремих компонентів гібридних систем накопичення енергії. Ця задача ускладнюється тим, що параметри окремих компонентів гібридних систем взаємозалежні, і необхідно враховувати їх взаємодію у вирішенні оптимізаційних завдань, що характерні для систем розподільчих енергоресурсів.

З урахуванням високої вартості СНЕЕ необхідно чітко визначати та оцінювати всі потенційні переваги їх використання в розподільних мережах та мікросистемах. Важливо знизити вартість не лише технології накопичення енергії, але і допоміжного обладнання, монтажу, інтеграції та введення таких систем в експлуатацію, оскільки вони часто становлять значну частину вартості. Розробка комплексного стандарту може сприяти полегшенню впровадження накопичувачів енергії, дозволяючи оцінювати та порівнювати якість та продуктивність різних технологій. Стандарт також може допомагати користувачам вибирати оптимальний тип та параметри накопичувачів, а також оптимальне розміщення для максимізації вигоди.

Для сприяння впровадженню накопичувачів енергії у системи розподільних енергоресурсів і мікросистеми, необхідно розробити відповідні правила та стимули для інвесторів. Регулювальні органи повинні надавати чіткі ринкові моделі та адекватні стимули, у той час як обмеження, які утруднюють отримання доходу, повинні бути вилучені.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ю.В. Малогулко Дослідження генерування вітроелектроустановок з системами накопичення енергії / Малогулко Ю., Повстянко К., Затхей М. // «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. – 2022. (311) №1. - С. 9-13.
2. Malogulko Yu., Kovalchuk N., & Lastivka V. (2022). Analysis of the of smoothing methods power fluctuations of the photoelectric plant using BESS. Norwegian journal of development of the international science, 97, 56–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7377447>.
3. Малогулко Ю.В. Дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії / Малогулко Ю.В., Ластівка В.Б. // Znanstvena misel journal. №65/2022, pp. 65-68. ISSN 3124-1123.
4. М. П. Болотний Застосування систем накопичення енергії для задач керування режимами еес україни: стан та перспективи розвитку М. П. Болотний, Ю. Г. Лоєнко, О. О. Кармазін // Відновлювана енергетика. Комплексні проблеми енергетичних систем на основі. – 2022. №3. - С.28-35. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).28-35](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).28-35).
5. World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications. Available at: <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/01-E-storage.pdf>. (accessed: 08.01.2019).
6. О. М. Довгалюк Дослідження особливостей використання систем накопичення енергії при роботі трейдерів на енергоринку України // О. М. Довгалюк, Ш. Н. Саїдов, І. С. Яковенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, № 14 (1339) 2019. - С. 54 -60.
7. Goya T, Omine E, Kinjo Y, et al, «Frequency control in isolated island by using parallel operated battery systems applying  $H_{\infty}$  control theory based on droop characteristics» Renewable Power Generation Iet, 5(2), pp.160-166, 2011.
8. D. Ding, Z. Q. Liu, S. L. Yang, et al, “Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control,” Power System Protection and Control, 43(8), pp.81-87, 2015.
9. B. Dong, X. Y. Xu, S. Ma, et al, “Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation,” Power System Protection and Control, 42(12), pp.57-64, 2014.
10. X. S. Tian, W. S. Wang, Y. Li, et al, “Coordinative control strategy of virtual inertia and primary frequency of DFIGs based wind farms,” IEEE PES APPEEC, pp. 2169-2174, 2016.
13. Малогулко Ю. В. Аналіз впливу BESS на функціонування розподільних електричних мереж [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, В.Б. Ластівка // Матеріали молодіжної науково-практичної інтернет-конференції студентів аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)»: збірник матеріалів. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 180-184 с. - Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-mn/index/pages/view/zbirn2022>.

**Юлія Володимирівна Малогулко** — к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [Juliya\\_Malogulko@ukr.net](mailto:Juliya_Malogulko@ukr.net).

**Ластівка Вікторія Богданівна** — студентка групи ІЕСМ-21б, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [vlastivka19@gmail.com](mailto:vlastivka19@gmail.com).

**Juliya V. Malogulko** — Ph.D., Assistant Professor of electrical stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [Juliya\\_Malogulko@ukr.net](mailto:Juliya_Malogulko@ukr.net).

**Viktoriya B. Lastivka** - student of IESM-21b group, Department of Electricity, Electromechanics and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [vlastivka19@gmail.com](mailto:vlastivka19@gmail.com)