

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ
ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Черняк І. О. _____

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Остра Н. В. _____
« 06 » 06 2025 р.

Рецензент: _____
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)
_____ О.А. _____
« 06 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.

« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» 03 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Черняку Іллі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії»

Керівник роботи: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Остра Наталя Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025р. № 97

2. Термін подання студентом роботи 3 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: 1. Малогулко Ю. В., Шаргородський Д. М., Щербатий Д. В. Дослідження доцільності використання гібридних систем накопичення енергії. 2. Лежнюк П., Комар В., Рубаненко О. Критеріальне моделювання процесу резервування нестабільності генерації відновлюваних джерел енергії електрохімічними накопичувачами. 3. Посилання на періодичні видання.

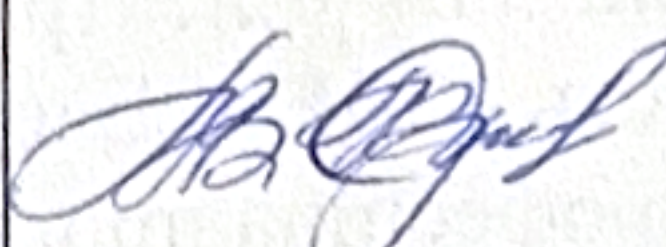
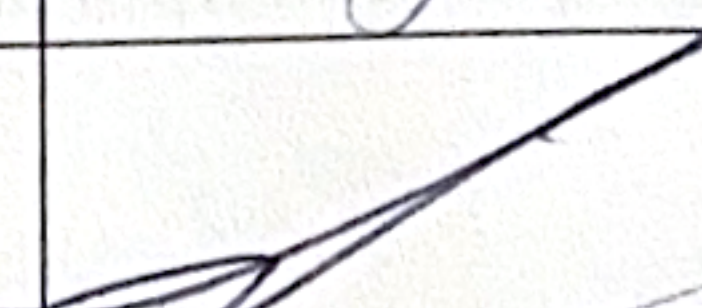
Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: Номінальна напруга: $U_{ном} = 3,7 \text{ В}$; Тривалість заряджання: $t_{ар} = 2,5 \text{ год}$;

Тривалість розряджання: $t_{розр} = 2,3 \text{ год}$; Середній струм заряджання: $I_{зар} = 2 \text{ А}$; Середня напруга під час заряджання: $U_{зар} = 4,1 \text{ В}$; Середня напруга під час розряджання: $U_{розр} = 3,6 \text{ В}$.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Теоретичні основи електрохімічних систем накопичення енергії. 2. Практичні аспекти застосування електрохімічних систем накопичення енергії. 3. Перспективи розвитку електрохімічних накопичувачів. 4. Практичне дослідження особливостей електрохімічних систем накопичення енергії. 5. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Мета роботи та основні задачі. Технічні параметри електрохімічних систем. Прогноз зростання світового ринку електрохімічних накопичувачів енергії. Застосування електрохімічних накопичувачів енергію. Схема електрохімічної системи акумулятора.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Остра Н. В., к.т.н., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.т.н., проф., завідувач кафедри БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження завдання БКР	20.03.25	21.03.25	викон.
2	Вступ. Огляд літературних джерел	22.03.25	28.03.25	викон.
3	Теоретичні основи електрохімічних систем накопичення енергії	29.03.25	05.04.25	викон.
4	Практичні аспекти застосування електрохімічних систем накопичення енергії	06.04.25	11.04.25	викон.
5	Перспективи розвитку електрохімічних накопичувачів	12.04.25	19.04.25	викон.
6	Практичне дослідження особливостей електрохімічних систем накопичення енергії	20.04.25	25.04.25	викон.
7	Охорона праці	26.04.25	04.05.25	викон.
8	Формування висновків по роботі	05.05.25	10.05.25	викон.
9	Оформлення пояснювальної записки	11.05.25	19.05.25	викон.
10	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	20.05.25	28.05.25	викон.
11	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	29.05.25	03.06.25	викон.
12	Рецензування БДР	03.06.25	06.06.24	викон.
13	Захист БДР	За графіком		

Студент

(підпис)

Черняк І. О.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Остра Н.В.

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Черняк Ілля Олександрович «Дослідження особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 67 с. Бібліогр.: 25. Рис.: 12. Табл.: 3.

У бакалаврській роботі проаналізовано особливості електрохімічних систем накопичення енергії

В першому розділі проаналізовано теоретичні основи електрохімічних систем накопичення енергії. У другому розділі роботи досліджені практичні аспекти застосування електрохімічних систем накопичення енергії. Третій розділ присвячено перспективам розвитку електрохімічних накопичувачів. У четвертому розділі проаналізоване практичне дослідження особливостей електрохімічних систем накопичення енергії.

У розділі охорони праці розроблені заходи із охорони праці при обслуговуванні накопичувачів енергії.

Ключові слова: сонячна електрична станція, накопичувачі енергії, безпечна експлуатація, застосування, акумуляторні системи.

ABSTRACT

Chernyak Ilya Oleksandrovykh “Study of the features of electrochemical energy storage systems”. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 67 p. Bibliography: 25. Fig.: 12. Table: 3.

The bachelor's work analyzes the features of electrochemical energy storage systems.

The first section analyzes theoretical foundations of electrochemical energy storage systems. In the second section, practical aspects of the application of electrochemical energy storage systems. The third section is devoted to the prospects for the development of electrochemical accumulators. The fourth section analyzes the practical study of the features of electrochemical energy storage systems.

In the occupational safety section, occupational safety measures are developed when servicing energy accumulators.

Key words: energy accumulators, safe operation, application, battery systems, condition assessment.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ.....	8
1.1 Загальні принципи роботи електрохімічних систем.....	8
1.2 Класифікація, типи та технічні характеристики електрохімічних накопичувачів.....	12
2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ.....	16
2.1 Сфери застосування електрохімічних накопичувачів.....	16
2.2 Роль акумуляторних систем у забезпеченні енергонезалежності .	19
2.3 Екологічні аспекти використання та утилізації електрохімічних накопичувачів.....	23
3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ.....	28
3.1 Прогноз розвитку ринку електрохімічних накопичувачів.....	28
3.2 Потенціал інтеграції з відновлювальними джерелами енергії.....	34
3.3 Перспективи електрохімічних накопичувачів для України.....	39
4 ПРАКТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ.....	43
4.1 Постановка задачі дослідження та вибір методичного підходу....	43
4.2 Розрахунок енергетичної ефективності обраної системи.....	48
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	52
5.1 Аналіз ризиків та заходи забезпечення пожежної безпеки при експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії.....	52
5.2 Комплексна система охорони праці при проектуванні, монтажі та експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії.....	55
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ	67

ДОДАТОК А ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ	68
ДОДАТОК Б ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	69

ВСТУП

У сучасному світі, в умовах розвитку науки та техніки зростають потреби в ефективному зберіганні електроенергії, особливо у зв'язку з розвитком відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова. Особливого значення набувають системи накопичення енергії. Електрохімічні накопичувачі, зокрема акумулятори відіграють ключову роль у створенні гнучких і ефективних енергетичних систем, що дозволяють зберігати електроенергію для подальшого користування. Електрохімічні накопичувачі енергії - це так звані акумулятори, які використовують електричну енергію для здійснення хімічних реакцій, перетворюючи її в хімічну енергію (заряд) і повертають назад в електричну енергію (розряд). При цьому всьому змінюється склад речовин електродів і витрачається електроліт, найефективнішим накопиченням енергії вважається у літій-іонних акумуляторах. Популярність зумовлена зростаючою потребою у гнучкості, стабільності та передбачуваності систем для електростанцій, які працюють на відновлюваних джерелах енергії і поєднуються зі зниженням вартості акумуляторних технологій. Його переваги такі як [1]:

- висока енергетична щільність;
- високий коефіцієнт корисної дії;
- відсутність ефекту пам'яті;
- довгий термін служби;
- швидке заряджання.

З розвитком систем накопичення енергії вирішуються різні завдання. Одним із завдань забезпечення електричних навантажень під час відключення електроенергії.

Разом з тим, широке використання літій-іонних систем вимагає глибокого розуміння особливостей, фізико-хімічних процесів, що в них відбуваються, а також обмежень, які можуть впливати на ефективність і безпечність експлуатації. Також не менш важливо дослідження матеріалів, які

використовуються у виробництві акумуляторів. Ще кілька десятиліть тому назад електрохімічні джерела енергії використовувалися переважно в обмежених сферах наприклад, у годинниках або побутовій техніці. Однак з розвитком електроніки та потреб у мобільності виникла необхідність у створенні компактних, довговічних та ефективних джерел живлення. Це зумовило стрімкий розвиток технологій накопичення енергії, які здатні забезпечити автономну роботу різноманітних пристроїв від побутових електронних пристроїв до складних енергетичних систем. У сучасних умовах науково-технічного прогресу, коли важливе значення має не лише збереження енергії, а її раціональне використання, актуальність розвитку акумуляторних технологій зростає з кожним роком більше. Значна увага приділяється не лише покращенню ємності та тривалості роботи таких систем, але й екологічній безпеці, вартості матеріалів. Серед різних типів електрохімічних накопичувачів особливої популярності набули літій-іонні, натрій-іонні, твердотільні, а також системи на основі рідких електролітів. Кожен тип має свої переваги та обмеження, які визначають сферу їх застосування. Завдяки високій питомій енергії, тривалому терміну експлуатації та низькому рівню саморозряду, літій-іонні акумулятори знайшли широке використання у споживчій електроніці, електромобілях та системах резервного живлення. Водночас зростає інтерес до альтернативних рішень, зокрема натрій-іонних систем, що мають більшу доступність сировини [2].

З огляду на зазначене, виникає потреба в загальному дослідженні електрохімічних систем накопичення енергії з метою виявлення їх особливостей, технічних характеристик, умов ефективної експлуатації та можливостей застосування в сучасних умовах. Такий аналіз дасть змогу не лише оцінити переваги й недоліки різних типів акумуляторів, а й визначити напрями їхнього подальшого вдосконалення та практичного впровадження. Отже, дослідження особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії є **актуальною задачею** для забезпечення надійності та

стабільності роботи сонячних електричних станцій та енергосистеми країни в цілому.

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної **роботи** є дослідити особливості застосування електрохімічних систем накопичення енергії, а також проаналізувати особливості електрохімічних систем накопичення енергії, їх принципи дії, технічні характеристики та можливості впровадження у різних сферах.

У відповідності з поставленою метою у роботі розв'язуються наступні **основні задачі**:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку електрохімічних систем накопичення енергії та визначити їх значення в енергетичній інфраструктурі.
2. Ознайомитися з теоретичними основами, класифікацією основних типів акумуляторних систем та принципами їх роботи.
3. Вивчити матеріали, що використовуються для виготовлення елементів акумуляторів, та їхній вплив на ефективність і перспективи систем.
4. Розглянути сфери застосування електрохімічних накопичувачів енергії в різних галузях від побуту до промисловості та електротранспорту.
5. Дослідити технічні характеристики найбільш поширених електрохімічних накопичувачів, зокрема літій-іонних, свинцево-кислотних, натрій-іонних та інших видів накопичувачів.
6. Проаналізувати заходи з охорони праці та безпечної експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії.

Об'єктом дослідження даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є сонячні електричні станції країни, а **предметом дослідження** є електрохімічні накопичувачі енергії.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Загальні принципи роботи електрохімічних систем

Електрохімічні системи відіграють ключову роль у сучасній енергетиці та промисловості, на основі хімічних процесів дозволяють ефективно перетворювати, накопичувати та використовувати електричну енергію. Принцип їх дії базується на електрохімічних реакціях окиснення та відновлення, які відбуваються між двома електродами, зануреними в електроліт. Ці процеси забезпечують можливість як створення електричного струму, так і накопичення енергії для подальшого її використання. Основною структурною одиницею електрохімічної системи є електрохімічний елемент. У нього розміщено два електроди – анод і катод, які виконують функції джерела та приймача електронів. Анод зазвичай є джерелом електронів і віддає їх у зовнішній контур, тоді як катод приймає електрони. У ході окисновідновної реакції іони рухаються в електроліті, а електрони – у зовнішньому колі. В такому випадку виникає електричний струм, який можна використати для живлення різних систем або приладів. Принципова відмінність електрохімічних систем від інших джерел енергії полягає в можливості зворотного перетворення енергії. Під час заряджання електрохімічна система поглинає електричну енергію, яка зберігається у вигляді хімічної. Під час розряджання цей процес відбувається у зворотному напрямку – хімічна енергія перетворюється на електричну. Ця властивість робить електрохімічні системи основою для побудови акумуляторів і батарей.

Один із головних законів, що регулює роботу таких систем – це закон Фарадея. Він стверджує, що кількість речовини, беручи участь в електрохімічній реакції, пропорційна кількості переданого електричного заряду. Це дозволяє точно розраховувати параметри акумуляторів, зокрема їх

ємність, енергоємність та ефективність. Формула Фарадея дозволяє визначити масу речовини, яка виділяється або споживається в ході реакції [4]:

$$m = (Q \times M) / (n \times F), \quad (1.1)$$

де

Q – заряд,

M – молярна маса,

n – кількість електронів,

F – число Фарадея.

У різних типах електрохімічних систем використовуються різні електроліти та матеріали. Наприклад, у літій-іонних батареях використовуються графітові аноди та катоди на основі оксидів металів. Електролітом служить органічний розчинник з літієвими солями. У свинцево-кислотних акумуляторах анод і катод виготовляються з його оксидів та свинцю, а електролітом виступає розчин сірчаної кислоти. Кожен тип самої системи має свої особливості у будові, принципах дії, тривалості служби та безпеці експлуатації.

Сучасні дослідження спрямовані на покращення характеристик електрохімічних систем – збільшення питомої енергії, підвищення стабільності, зменшення втрат при розряджанні та заряджанні. Також актуальною проблемою є екологічності та вторинної переробки компонентів акумуляторів, що зумовлено широким використанням у побутовій техніці, транспорті та системах зберігання енергії в електромережах.

Історія розвитку електрохімічних систем накопичення енергії тісно пов'язана з прогресом у дослідженні хімічних реакцій, що супроводжуються переносом електронів, а також з прагненням людства ефективно зберігати та використовувати енергію. Вперше ідея перетворення хімічної енергії на

електричну виникла ще в ХІХ столітті, коли вчені, винайшли перші хімічні джерела струму — батареї. Ці первісні системи заклали основу для розвитку сучасних акумуляторів і паливних елементів, які сьогодні відіграють ключову роль у накопиченні енергії.

У порівнянні з тепловими та механічними способами накопичення енергії, електрохімічні системи характеризуються високою щільністю енергії, компактністю, простою конструкцією і можливістю багатократного циклічного використання. Поява літій-іонних акумуляторів у 1970-х роках стала революційним кроком у цій сфері, оскільки вони забезпечили значно більшу ємність і довговічність при знижених розмірах і вазі, що дозволило розвивати портативну електроніку, електромобілі та відновлювану енергетику.

Сьогодні електрохімічні системи накопичення енергії є важливою складовою інфраструктури, що підтримують баланс між споживанням енергії та виробництвом, особливо з урахуванням нестабільності відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. Вони сприяють підвищенню надійності та ефективності енергосистем, дозволяють зменшувати навантаження на традиційні енергетичні джерела та знижують негативний вплив на навколишнє середовище. рисунок 1.1.

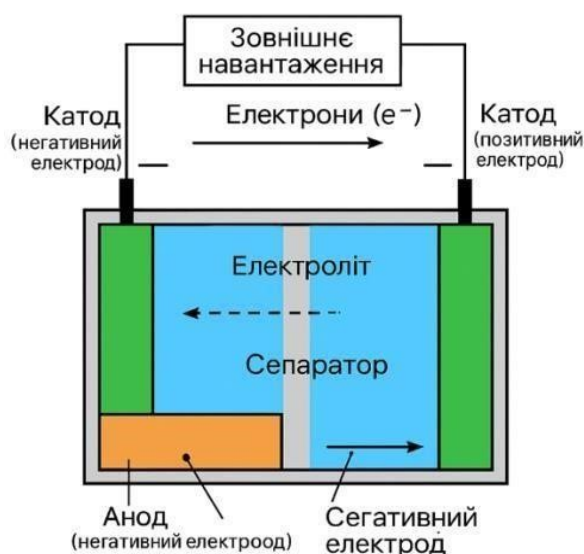


Рисунок 1.1 - Схема електрохімічної системи акумулятора

Важливим напрямком сучасних досліджень є підвищення ефективності, довговічності та безпеки електрохімічних систем, а також пошук нових матеріалів для електродів і електролітів. Інновації у сфері нанотехнологій, використання твердоелектролітів, розробка безпечних і екологічних акумуляторів — все це формує майбутнє електрохімічних систем накопичення енергії. Таким чином, електрохімічні системи накопичення енергії мають багатогранну історію розвитку, яка поєднує фундаментальні відкриття у фізиці та хімії з практичними потребами суспільства. Їх роль у сучасному світі постійно зростає, що обумовлено зростаючими вимогами до збереження енергії, підвищення енергоефективності та екологічності.

Електрохімічна система складається з основних частин:

1. Реагенти, іонізовані речовини, а також такі що сприяють іонізації — електроліт (провідник 2 роду);
2. Два електронопровідних тіла, які мають контакт з електролітом і забезпечують обмін зарядами між учасниками електрохімічної реакції — електроди;
3. Металевий провідник (провідник 1 роду), який сполучає електроди і забезпечує проходження струму між ними — зовнішнє коло.

Електрохімічні системи характеризуються здатністю існувати у двох основних станах — рівноважному та нерівноважному. Рівноважний стан визначається балансом між окисно-відновними реакціями, у якому потенціали електродів стабілізуються, а потоки іонів у системі врівноважуються, що забезпечує відсутність чистого електричного струму.

Натомість у нерівноважному стані відбувається активне перенесення електронів і іонів, що призводить до виникнення електричного струму та накопичення або розряду енергії. Перехід між цими станами є ключовим процесом для функціонування електрохімічних накопичувачів енергії, таких як акумулятори та суперконденсатори, де відсутність рівноваги забезпечує генерацію або споживання електричної енергії. Зрозуміння цих процесів є

важливим для оптимізації роботи електрохімічних систем і підвищення їх ефективності. Крім того, на ці процеси суттєво впливають різні чинники - температурний режим, матеріальний склад електродів, режим роботи системи. Сучасні наукові дослідження зосереджені на удосконаленні цих параметрів для підвищення ефективності, надійності та тривалості експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії.

1.2 Класифікація, типи та технічні характеристики електрохімічних накопичувачів

Електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) — це один з ключових напрямів розвитку сучасної енергетики, що забезпечує ефективне балансування попиту і пропозиції електроенергії, підвищення стабільності енергосистем та розширення можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії. Різноманітність електрохімічних технологій дозволяє оптимально підібрати тип накопичувача залежно від конкретних вимог до параметрів роботи: ємності, швидкості заряджання/розряджання, терміну служби, енергоефективності, безпеки

Усі електрохімічні накопичувачі енергії можна класифікувати за кількома ознаками.

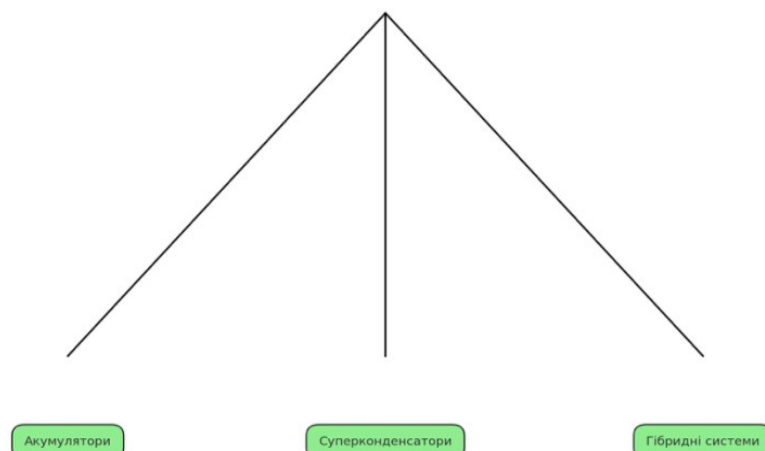


Рисунок 1.2 - Структурна схема класифікації електрохімічних накопичувачів енергії

1. за типом активних матеріалів;
2. за фізико-хімічним механізмом накопичення енергії;
3. за характеристиками енергетичної та потужної щільності;
4. за масштабом застосування (портативні, стаціонарні, транспортні тощо).

Найпоширенішим є поділ за типом та принципом дії. У цьому випадку розрізняють такі основні групи:

5. Акумулятори (батареї вторинного використання): свинцево-кислотні, літій-іонні, нікель-металгідридні, натрій-сірчані тощо;
6. Суперконденсатори, електродвійні конденсатори, псевдоконденсатори;
7. Гібридні системи: комбінації акумуляторів і суперконденсаторів, системи з інтегрованими енергетичними компонентами.

Розглянемо типи електрохімічних накопичувачів енергії

Свинцево-кислотні акумулятори - це одна з найстаріших та найдоступніших технологій накопичення енергії. Принцип роботи ґрунтується на оборотних хімічних реакціях між свинцевими електродами та сірчаною кислотою.

Основні переваги:

- низька вартість;
- відпрацьована технологія виробництва;
- простота експлуатації.

Недоліки:

- обмежена циклічна стабільність;
- висока маса;
- токсичність та екологічні ризики.

Літій-іонні акумулятори на сьогодні - найпопулярніший тип накопичувачів для портативної електроніки, електротранспорту та стаціонарних систем.

Переваги:

- висока енергетична щільність (до 250–300 Вт·год/кг);

- висока ефективність (до 95 %);
- тривалий термін служби (1000–5000 циклів).

Недоліки:

- складність утилізації;
- потреба в складній системі керування для запобігання перегріванню;
- висока вартість.

Натрій-сірчані акумулятори ці акумулятори працюють при високих температурах ($\sim 300^\circ\text{C}$), що забезпечує високу іонну провідність.

Переваги:

- висока енергетична щільність;
- тривалий термін служби;
- придатність для стаціонарних систем великої потужності.

Недоліки:

- необхідність постійного підігріву;
- підвищені вимоги до безпеки.

Суперконденсатори поєднують в собі властивості конденсаторів та акумуляторів: вони забезпечують високу щільність потужності при відносно низькій щільності енергії.

Переваги:

- надзвичайно висока швидкість заряджання/розряджання (секунди - хвилини);
- мільйони циклів без втрати ємності;
- висока ефективність.

Недоліки:

- відносно низька енергетична щільність (5–10 Вт·год /кг);
- необхідність комбінації з іншими джерелами для забезпечення тривалого живлення.

Гібридні системи їхнє використання комбінованих рішень (акумулятори + суперконденсатори) дозволяє оптимізувати системи за показниками як

енергії, так і потужності. Такі системи широко застосовуються у транспорті (електробуси, трамваї) та у стабілізації електромереж.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики електрохімічних накопичувачів енергії

Параметр	Свинцево-кислотні	Li-ion	NaS	Суперконденсатори
Енергетична щільність, Вт·год/кг	30–50	150–300	100–150	5–10
Потужнісна щільність, Вт/кг	~300	500–2000	~150	до 10 000
Кількість циклів	500–1000	1000–5000	>3000	>1 млн
ККД, %	75–85	90–95	~85	~95
Діапазон робочих температур, °C	-20...+50	-20...+60	+300	-40...+70
Переваги	Дешевизна, простота	Висока щільність енергії	Велика ємність	Висока швидкодія
Недоліки	Мала циклічність, токсичність	Вартість, чутливість	Висока температура	Мала ємність

Дані таблиці 1.1 дозволяють зробити кілька важливих висновків. Літій-іонні акумулятори демонструють найкраще співвідношення енергетичної щільності та ефективності, що зумовлює їх домінування у сферах, де критично важлива компактність і маса. Натомість суперконденсатори, хоча й мають суттєво нижчу енергетичну щільність, відзначаються надзвичайно високою питомою потужністю та довговічністю, що робить їх ідеальними для короткочасної компенсації пікових навантажень. Свинцево-кислотні акумулятори зберігають актуальність завдяки низькій вартості, хоча поступаються за всіма ключовими характеристиками. Високотемпературні натрій-сірчані системи залишаються для стаціонарних об'єктів із високими вимогами до обсягів зберігання енергії [5].

Таким чином, вибір оптимального типу накопичувача завжди має ґрунтуватися на балансі між технічними вимогами проекту та економічними міркуваннями.

2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

2.1 Сфери застосування електрохімічних накопичувачів

Електрохімічні накопичувачі енергії (ЕНЕ) можуть виконувати широкий спектр функцій, залежно від особливостей конкретної енергетичної системи та вимог користувачів. Узагальнено такі функції можна поділити на кілька категорій [7]:

- Буферизація енергії. У більшості випадків генерація та споживання електроенергії не збігаються за часом. Електрохімічні накопичувачі енергії (ЕНЕ) дозволяють акумулювати надлишкову енергію у періоди її профіциту та повертати в мережу у години пікового споживання. Це особливо важливо для систем з Відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), де генерація є змінною та складно прогнозованою.
- Покращення якості електроенергії. Завдяки здатності швидко реагувати на динамічні зміни у мережі, накопичувачі можуть згладжувати коливання напруги та частоти, компенсувати реактивну потужність і фільтрувати гармоніки.
- Аварійне резервне живлення. ЕНЕ забезпечують безперебійне живлення критичних споживачів під час короткочасних чи тривалих відключень електропостачання.
- Підвищення ефективності генерації. В умовах змінного попиту генератори часто працюють у неповному чи неефективному режимі.

Використання ЕНЕ дозволяє згладити профіль навантаження, що сприяє оптимізації роботи генераційного обладнання.

- Комерційні можливості. У ринкових умовах ЕНЕ використовуються для надання допоміжних послуг на енергоринку — зокрема, для регулювання частоти, компенсації пікових навантажень та участі у торгівлі електроенергією.

Електрохімічні накопичувачі енергії демонструють високу гнучкість у застосуванні завдяки своїм технічним характеристикам та можливості масштабування. На сьогодні їх інтеграція охоплює чотири ключові напрями:

забезпечення стабільності енергопостачання відновлюваних джерел, промислові комплекси, транспортний сектор і побутові споживачі.

Використання у системах з ВДЕ. Однією з головних рушійних сил розвитку технологій накопичення є стрімке зростання долі ВДЕ в енергетичному балансі багатьох країн. Сонячна та вітрова генерація характеризуються високою варіативністю виробітку — залежно від погодних умов, часу доби чи пори року. Це створює серйозні виклики для енергосистем, орієнтованих на стабільне споживання.

Інтеграція ЕНЕ дозволяє вирішити цю проблему кількома способами:

- згладжування короточасних коливань потужності ВДЕ;
- акумуляція надлишкової енергії у періоди профіциту генерації;
- забезпечення гарантійної подачі енергії споживачам у години дефіциту.

У доповіді BloombergNEF (Energy Storage Outlook 2024) зазначено, що до 2030 року понад 60 % нових проектів енергетичних сховищ будуть реалізовуватись саме для інтеграції ВДЕ [9].

Застосування у промислових об'єктах. Промислові підприємства є значними споживачами електроенергії, причому профіль споживання часто характеризується різкими змінами у навантаженні.

ЕНЕ у цьому контексті виконують такі функції:

- компенсація пікових навантажень, що дозволяє знизити витрати на електроенергію за рахунок оптимізації тарифної політики;
- забезпечення стабільної роботи чутливого до якості електроживлення обладнання;
- резервне живлення у випадку аварійних ситуацій.

У високотехнологічних галузях, таких як виробництво напівпровідників чи фармацевтики, навіть короточасне просідання напруги може призвести до

значних фінансових збитків, тому застосування ЕНЕ є економічно обґрунтованим.

Використання у транспорті. У секторі транспорту електрохімічні накопичувачі застосовуються як для тягових систем, так і для допоміжних функцій. Основні напрями:

- електромобілі (легкові, вантажні, громадський транспорт) - накопичувачі є головним джерелом енергії;
- залізничний транспорт - використання для зниження пікових навантажень у контактній мережі;
- морський транспорт — інтеграція гібридних енергетичних систем з накопичувачами.

За даними Міжнародної енергетичної агенції (IEA, Global EV Outlook +2025), до кінця 2025 року у світі експлуатується понад 85 мільйонів електромобілів, що підкреслює значущість ЕНЕ у транспорті [7].

Побутові системи накопичення. Зростання кількості домогосподарств, які встановлюють власні сонячні електростанції, стимулює попит на побутові системи зберігання енергії. У таких схемах ЕНЕ дозволяють:

- зменшити залежність від централізованої мережі;
- забезпечити аварійне резервне живлення.

Особливо популярними такі рішення є у Німеччині, Японії та США, де діють стимулюючі державні програми.

2.2 Роль акумуляторних систем у забезпеченні енергонезалежності країни

Від часу відкриття електрики людство постійно шукало дієві способи зберігати енергію для її подальшого використання у моменти підвищеної потреби. Протягом останнього століття технології акумулювання енергії безперервно розвивалися, відповідаючи на зміну вимог до енергозабезпечення. Як промислові підприємства, так і побутові споживачі

демонстрували зацікавленість у можливостях накопичення електроенергії - це допомагає зменшити навантаження на мережу та згладжувати коливання потужності, що виникають незалежно від рівня вироблення енергії з відновлюваних джерел. Нині спостерігається стрімке зростання потужностей генерації, що, у свою чергу, стимулює розвиток систем накопичення енергії для забезпечення електропостачання у великих масштабах. Існує широкий спектр технологій зберігання енергії, однак важливо визначити, які саме з них здатні найкраще відповідати як сучасним, так і перспективним вимогам. Далі розглянемо більш докладно промислові та побутові системи накопичення енергії Energy Storage System (ESS).

Глобальна енергетична система поступово рухається у напрямку зменшення викидів вуглецю. З кожним роком частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зростає, а витрати на технології зберігання енергії постійно знижуються. За оцінками дослідників, темпи здешевлення систем накопичення енергії та зростання використання нестабільних джерел енергії випереджають попередні прогнози, що може зумовити підвищення глобальної потреби у системах ESS до понад 400 ГВт·год вже до 2030 року.

Сучасні системи накопичення енергії пропонують широкий набір технологічних рішень для ефективного управління енергопостачанням. Далі розглянемо ключові напрями у цій сфері [8].

1. Твердотільні акумулятори – ряд електрохімічних накопичувачів, у тому числі сучасні хімічні акумулятори та конденсатори рисунок 2.1.

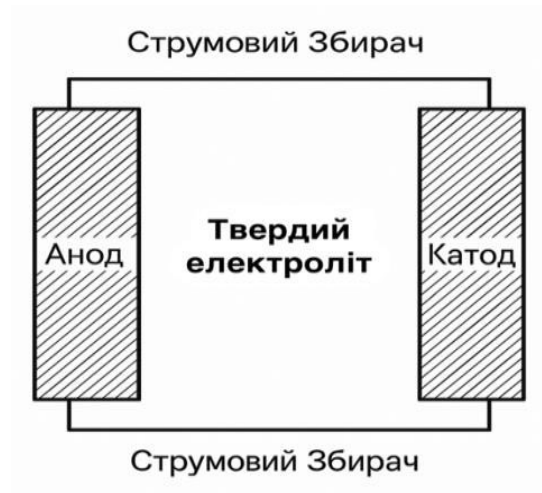


Рисунок 2.1 - Будова твердотілого акумулятора

2. Проточні акумулятори – акумулятори, в яких енергія накопичується безпосередньо в розчині електроліту для збільшення терміну служби і миттєвого спрацювання рисунок 2.2

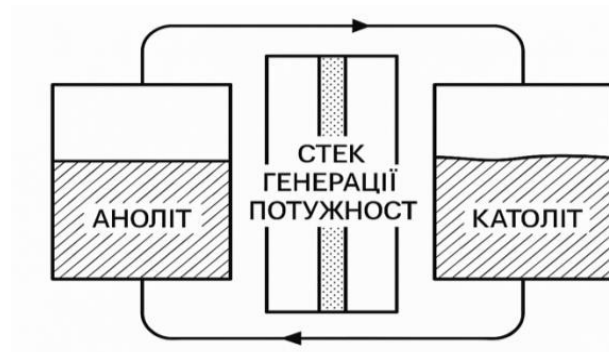


Рисунок 2.2 - Схема роботи проточного акумулятора

3. Маховики – механічні пристрої, що використовують енергію обертання для миттєвої подачі електричного струму рисунок 2.3.

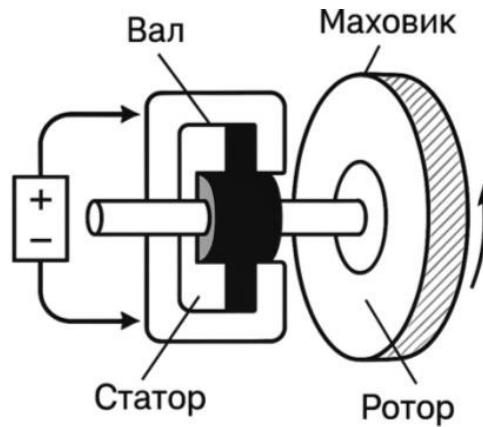


Рисунок 2.3 - Схема роботи маховикової системи накопичення енергії

На сьогоднішній день більшість систем накопичення енергії (ESS) зосереджена в регіонах Європи, Північної Америки, Східної та Центральної Азії, а також у країнах Тихоокеанського регіону. Лідерами у цій галузі виступають Сполучені Штати Америки, Південна Корея, Японія, а також низка європейських держав, серед яких Німеччина, Велика Британія та Італія. Загалом, приблизно 96% усіх реалізованих проектів розташовані саме у цих країнах. Інші 4% систем встановлені у Китаї та країнах Південної Америки, переважно в Чилі. Регіони Близького Сходу, Північної Африки, Південної Азії та африканські території.

Сучасний світ стикається з викликами, пов'язаними із забезпеченням стабільного і надійного електропостачання, яке є основою для розвитку економіки, промисловості, інфраструктури та побуту. В умовах зростаючої потреби в енергії та водночас збільшення ролі відновлюваних джерел, які мають непостійний характер вироблення, питання енергонезалежності стає особливо актуальним. В цьому контексті акумуляторні системи накопичення енергії набувають критичного значення, оскільки вони забезпечують можливість ефективного зберігання і використання електроенергії, що сприяє підвищенню автономії енергосистем.

Значення енергонезалежності. Енергонезалежність передбачає здатність країни або окремого споживача задовольняти власні потреби в енергії без надмірної залежності від зовнішніх постачальників. Це особливо важливо в умовах геополітичної нестабільності, коливань світових цін на енергоресурси, а також при загрозах перебоїв у постачанні електроенергії. Втрата контролю над енергетичними ресурсами може призвести до серйозних соціально-економічних проблем, тому стратегічною метою є максимальне зниження таких ризиків.

Акумуляторні системи накопичення енергії є одним із найважливіших інструментів для досягнення енергонезалежності. Вони здатні акумулювати надлишкову електроенергію в періоди її великої генерації - наприклад, коли сонячні панелі або вітрові турбіни виробляють більше енергії, ніж потрібно - і віддавати її в моменти пікового споживання або при тимчасовому відключенні від основної мережі.

Завдяки цьому акумулятори допомагають збалансувати виробництво та споживання енергії, знижуючи потребу у використанні резервних потужностей, що часто працюють на викопному паливі. Це зменшує залежність від імпорту енергоносіїв, підвищує стабільність енергопостачання та сприяє розвитку локальних енергетичних систем.

Підвищення надійності енергопостачання. В умовах, коли централізовані електромережі можуть бути уразливими до аварій, природних катастроф або кібератак, акумуляторні системи забезпечують резервне живлення, що є життєво важливим для промислових об'єктів, медичних закладів, транспортної інфраструктури та інших критично важливих установ. Наявність автономних джерел енергії дозволяє підтримувати безперервну роботу навіть у разі відключення від основної мережі.

Економічні та екологічні аспекти. Впровадження акумуляторних систем дозволяє оптимізувати витрати на енергопостачання. Завдяки збереженню енергії в періоди низьких тарифів і використанню її в періоди пікових тарифів, споживачі можуть значно знизити свої витрати. Крім того, заміна традиційних

генераторів на акумулятори сприяє зменшенню викидів парникових газів і покращенню екологічної ситуації.

2.3 Екологічні аспекти використання та утилізації електрохімічних систем

Широке впровадження електрохімічних систем накопичення енергії (ЕСНЕ) відіграє важливу роль у глобальному переході до низьковуглецевої економіки. Водночас використання таких систем супроводжується певними екологічними викликами, що потребують ретельного аналізу та відповідального підходу на всіх етапах життєвого циклу: від виробництва до утилізації [6].

Вплив виробництва компонентів на довкілля. Процес виготовлення акумуляторів, зокрема літій-іонних, вимагає значної кількості природних ресурсів. Для виробництва електродів та електролітів використовуються метали, такі як літій, кобальт, нікель, марганець, а також графіт. Видобуток і переробка цих матеріалів супроводжуються викидами парникових газів, забрудненням ґрунтів і водних ресурсів, а також споживанням великих обсягів води, що особливо актуально у регіонах з обмеженими водними ресурсами.

Крім того, значна частина світового видобутку літію та кобальту здійснюється у країнах, де екологічні норми недостатньо жорсткі, що призводить до додаткових ризиків для місцевих екосистем.

Використання акумуляторних систем. У процесі експлуатації ЕСНЕ практично не створюють шкідливих викидів у навколишнє середовище, що робить їх екологічно привабливими у порівнянні з традиційними генераторами на ископному паливі. Проте слід враховувати потенційні ризики, пов'язані з аваріями — зокрема, загрозу займання або витoku токсичних речовин у разі пошкодження системи.

Особливу увагу слід приділяти питанням безпечної експлуатації систем на об'єктах з підвищеними вимогами до екологічної безпеки, таких як житлові будівлі, лікарні чи підприємства харчової промисловості.

Проблеми утилізації та повторного використання. Після завершення терміну служби акумуляторні батареї становлять суттєву екологічну проблему, оскільки містять низку токсичних і важких металів. Недостатньо організована утилізація або неконтрольоване захоронення таких відходів може призвести до тривалого забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Наразі розробляються різні стратегії для мінімізації негативного впливу:

- Рециклінг (переробка) акумуляторів із вилученням цінних компонентів;
- Вторинне використання акумуляторів у менш критичних застосуваннях (наприклад, для стаціонарних систем зберігання енергії);
- Вдосконалення дизайну акумуляторів для полегшення демонтажу і підвищення придатності до повторної переробки.

Світова практика показує, що створення ефективної системи збирання та переробки акумуляторних відходів вимагає законодавчої підтримки, економічних стимулів та розвитку відповідної інфраструктури.

Перспективи екологічно сталого розвитку. Для зниження екологічного навантаження у сфері накопичення енергії важливими напрямками розвитку є:

- використання більш екологічно безпечних матеріалів;
- підвищення енергоефективності виробничих процесів;
- зменшення залежності від рідкісних металів;
- розширення масштабів рециклінгу.

Загалом, хоча електрохімічні системи накопичення енергії сприяють зменшенню викидів вуглецю та розвитку відновлюваної енергетики, повний спектр їхнього екологічного впливу потребує уважного врахування. Ефективне управління усіма стадіями життєвого циклу акумуляторів є ключем до досягнення реальної екологічної користі від їх використання.

Останніми роками у світі активно впроваджуються програми утилізації акумуляторів з метою мінімізації їхнього негативного впливу на довкілля.

Наприклад, компанія Tesla у рамках своєї програми Battery Recycling забезпечує до 92 % повторного використання матеріалів зі старих акумуляторів, зокрема літію, нікелю та кобальту. Подібну практику застосовує і європейський консорціум Northvolt, де використання вторинної сировини дозволяє зменшити вуглецевий слід акумуляторів на 50 %.

У Китаї, який є світовим лідером за обсягами виробництва літій-іонних батарей, з 2021 року діє обов'язкова програма збору акумуляторів, яка охоплює понад 80 % міських регіонів [5].

Приклади вторинного використання акумуляторів В Європі й США активно розвиваються проєкти зі створення стаціонарних систем накопичення енергії на базі акумуляторів, які відслужили в електромобілях (такі як second life batteries).

Наприклад, у Німеччині компанія BMW спільно з енергетичним оператором Vattenfall реалізувала проєкт встановлення 2-мегаватної системи накопичення енергії на основі акумуляторів з використаних електромобілів BMW i3. Ця установка забезпечує балансування енергомережі та зменшує споживання пікової електроенергії.

Перспективи сталого розвитку в галузі акумуляторних технологій. Значного потенціалу для зниження екологічного впливу ЕСНЕ очікується від:

- впровадження натрій-іонних батарей, які не потребують рідкісних металів;
- розвитку акумуляторів з твердим електролітом, що підвищує їх безпечність;
- автоматизації процесів рециклінгу для зниження витрат і підвищення ефективності.

Загалом, впровадження замкнутого циклу використання акумуляторів — від виробництва до утилізації — є одним із ключових завдань для досягнення екологічної стійкості сучасних енергетичних систем.

Варто зазначити, що глобальне зростання попиту на електрохімічні системи накопичення енергії вже зараз формує нові виклики для екологічної

політики багатьох країн. У зв'язку з цим все більше уваги приділяється концепції “зеленого” дизайну акумуляторів, яка передбачає мінімізацію шкідливих компонентів ще на етапі розробки технологій.

Зокрема, дедалі активніше ведуться дослідження з використання альтернативних катодних матеріалів, які дозволяють зменшити потребу в токсичних речовинах, таких як кобальт. Перспективними вважаються технології, орієнтовані на використання залізо-фосфатних та натрій-іонних хімічних систем, що відзначаються підвищеною екологічною безпечністю.

Використання енергоефективних процесів переробки. Окрім самого факту рециклінгу, важливо також враховувати енерговитрати на переробку акумуляторів. Традиційні методи пірометалургійної обробки супроводжуються значними викидами CO₂. Саме тому сучасні підходи орієнтуються на впровадження гідрометалургійних технологій, які дозволяють досягти високих показників вилучення металів при значно нижчих енергетичних витратах.

Дослідження показують, що гідрометалургійні процеси дозволяють утилізувати до 95 % літію та понад 98 % кобальту із відпрацьованих акумуляторів, що суттєво знижує потребу у первинному видобутку ресурсів.

Вплив на кліматичні цілі. Системи накопичення енергії також мають важливе значення для досягнення довгострокових кліматичних цілей, визначених Паризькою кліматичною угодою. За підрахунками аналітичної групи BloombergNEF, ефективне використання акумуляторних систем дозволить знизити глобальні викиди CO₂ на понад 30 % у енергетичному секторі до 2040 року, завдяки підвищенню гнучкості енергосистем та більшій інтеграції ВДЕ [6].

Однак такий прогрес можливий лише за умови сталого підходу до всього життєвого циклу батарей - від добування сировини до утилізації.

Важливість розвитку нормативної бази. Важливо підкреслити, що питання екологічної безпеки акумуляторних систем неможливо ефективно вирішити без чітко визначеної законодавчої бази. В ЄС у 2023 році було ухвалено новий Регламент щодо батарей (EU Battery Regulation), який передбачає:

- обов'язкове маркування компонентів для спрощення їх переробки;
- встановлення мінімальних вимог до вмісту перероблених матеріалів у нових батареях;
- посилення контролю за транскордонним переміщенням відпрацьованих акумуляторів.

Аналогічні стандарти в інших регіонах світу є необхідною умовою для зменшення негативного впливу цієї галузі на довкілля.

3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

3.1 Прогноз розвитку ринку електрохімічних накопичувачів

Ринок електрохімічних систем накопичення енергії (ЕСНЕ) перебуває у фазі стрімкого розширення, що зумовлено глобальними тенденціями декарбонізації енергетики та зростанням потреб у підвищенні гнучкості енергосистем. В умовах активного розвитку відновлюваної енергетики, електрифікації транспорту та цифровізації енергетичних ринків ЕСНЕ набувають стратегічного значення для забезпечення стабільності та надійності енергопостачання.

Аналітичні прогнози свідчать про те, що упродовж наступного десятиліття світовий ринок електрохімічних накопичувачів демонструватиме високі темпи зростання як за обсягами встановлених потужностей, так і за економічними показниками. Розвиток технологій, зниження вартості систем та підтримка з боку державної політики створюють сприятливі умови для широкого впровадження ЕСНЕ у різних секторах економіки.

На сьогодні світовий ринок електрохімічних систем накопичення енергії (ЕСНЕ) демонструє стійку тенденцію до зростання. Згідно з аналітичними прогнозами, у період з 2020 по 2030 роки спостерігається стрімке збільшення попиту на такі технології. Основними драйверами цього процесу є глобальна декарбонізація енергетики, активний розвиток відновлюваних джерел енергії та електрифікація транспорту.

Обсяг ринку електрохімічних накопичувачів енергії зросте від приблизно 10 млрд доларів США у 2020 році до понад 220 млрд доларів у 2030 році. Особливо динамічне зростання очікується у період після 2025 року, що пов'язано із зниженням вартості акумуляторних технологій та широким впровадженням інфраструктури для електротранспорту.

Таким чином, електрохімічні накопичувачі поступово переходять зі статусу технологічного рішення до важливого елементу глобальної енергетичної системи. Рисунок 3.1

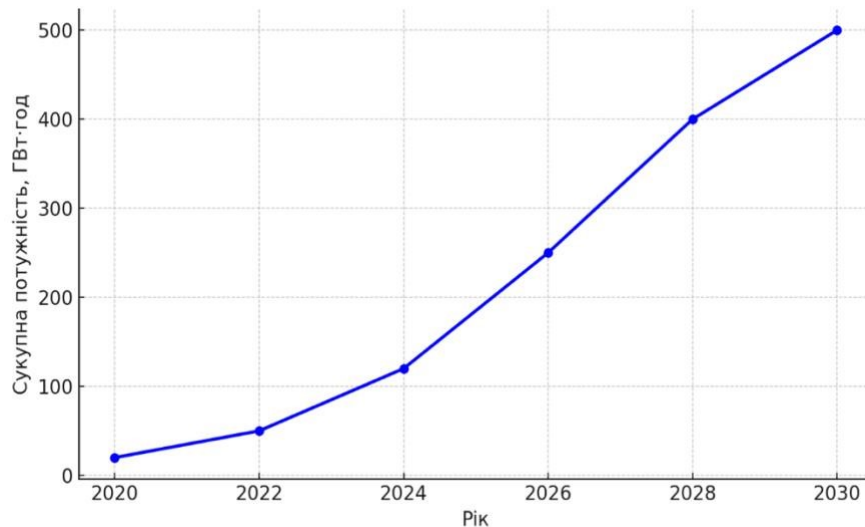


Рисунок 3.1 - Прогноз розвитку електрохімічних накопичувачів

Динаміка зростання світового ринку електрохімічних накопичувачів свідчить про фундаментальні зрушення у глобальній енергетичній політиці. Очікуване збільшення інвестицій та зростання попиту демонструють, що такі системи поступово стають невід'ємною частиною енергетичної інфраструктури. У перспективі це сприятиме не лише підвищенню гнучкості енергосистем, але й пришвидшенню переходу до низьковуглецевої економіки.

Ринок електрохімічних накопичувачів є доволі різноманітним за типами використовуваних технологій.

Провідні позиції, з часткою близько 65 %, займають літій-іонні акумулятори. Їх популярність зумовлена високою питомою енергоємністю, тривалим терміном служби та стабільною вартістю виробництва. Вони активно використовуються як у стаціонарних енергетичних проєктах, так і у сфері електромобільності.

Натрієві акумулятори, що набирають популярності завдяки дешевизні сировини, посідають другу позицію з часткою 15 %. Традиційні свинцево-

кислотні системи, хоча і мають довгу історію застосування, поступово витісняються новішими технологіями та зберігають лише 10 % ринку. Ще 10 % припадає на інші перспективні технології (наприклад, твердоелектролітні акумулятори або системи на основі ванадієвих редокс-акумуляторів).

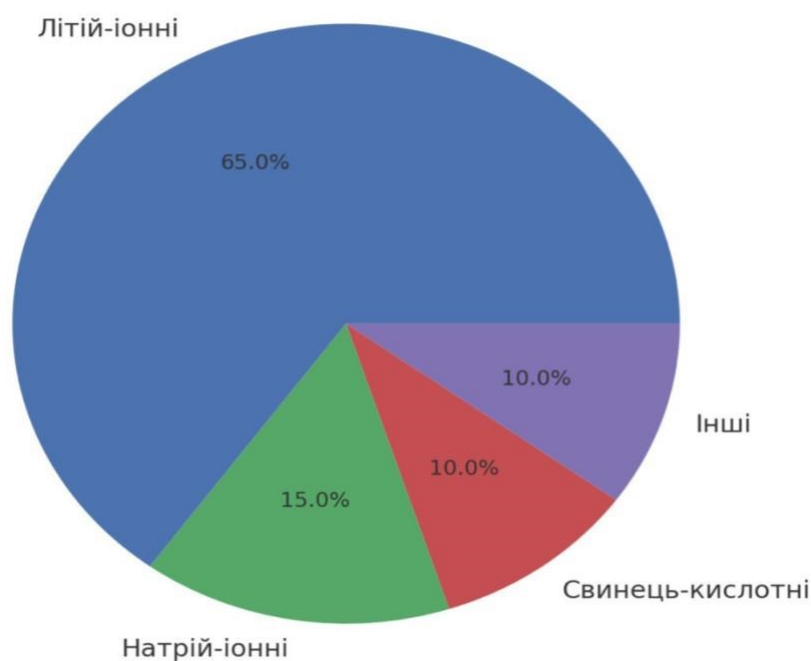


Рисунок 3.2 - Схема структури електрохімічних накопичувачів за 2025 рік

Динаміка зміни структури ринку вказує на те, що у найближчі роки очікується подальше посилення позицій інноваційних рішень із підвищеними технічними характеристиками.

Найбільша частка (50 %) припадає на енергетичний сектор. Тут ЕСНЕ використовуються для балансування мережі, згладжування пікових навантажень та оптимізації інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Сфера транспорту (30 %) продовжує активно розвиватися завдяки зростанню парку електромобілів, електробусів та електровантажівок. Саме для цієї категорії потрібні акумулятори з високою питомою енергією та швидкою здатністю до заряджання.

Побутова енергетика (15 %) передбачає використання накопичувачів у приватних домогосподарствах для забезпечення автономності та резервного живлення. Нарешті, ще 15 % становлять промислові рішення, що орієнтовані на локальні мікромережі та підприємства з великим енергоспоживанням. На рисунку 3.3 показано перспективу застосування ЕСНЕ найближчим часом.



Рисунок 3.3 - Застосування ЕСНЕ у найближчі часи

Таким чином, сфери застосування ЕСНЕ демонструють високий рівень диверсифікації та зростання.

Одним із ключових чинників розвитку ринку електрохімічних накопичувачів енергії є постійне зниження вартості технологій. За період з 2010 по 2025 рік середня вартість виробництва літій-іонних акумуляторів знизилася майже у 12 разів — із понад 1200 доларів США за кВт·год до приблизно 100 доларів США за кВт·год. На рисунку 3.4 показано схему зниження вартості літій-іонних акумуляторів.

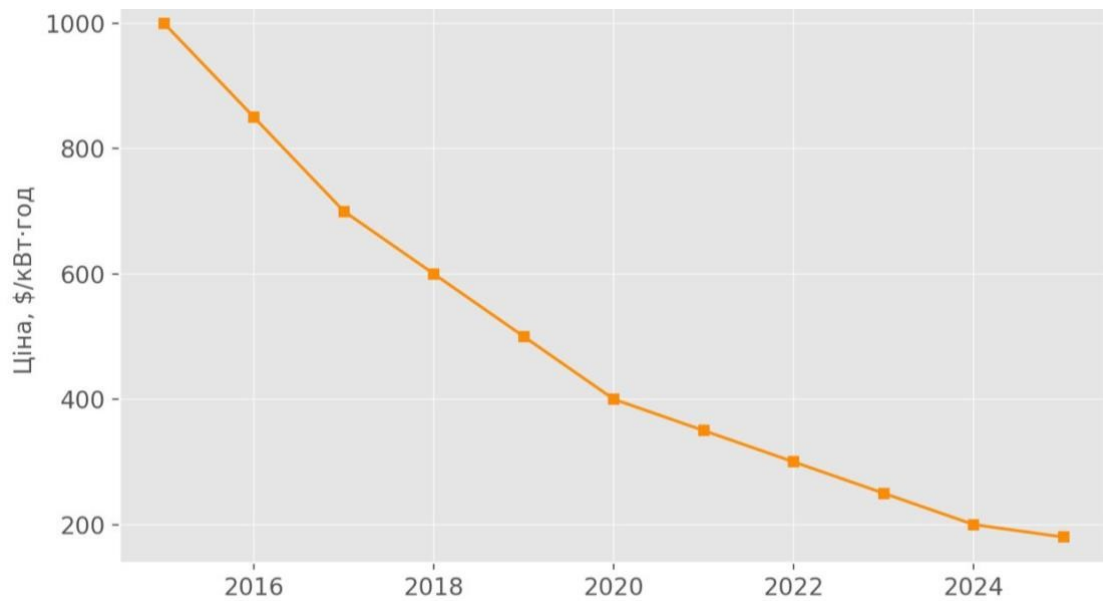


Рисунок 3.4 - Схема зниження вартості літій-іонних акумуляторів

Це робить літій-іонні системи доступнішими для широкого застосування, від побутових рішень до великих мережевих проектів.

Основними причинами такого стрімкого зниження вартості є:

- масштабування виробничих потужностей;
- удосконалення технологій виробництва та матеріалів;
- конкуренція серед виробників;
- розвиток нових хімічних складів акумуляторів.

Основні чинники, що стимулюють зростання ринку ВДЕ

- Зростання ролі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Збільшення частки енергії, виробленої за допомогою сонячних та вітрових електростанцій, супроводжується зростанням потреби у технологіях балансування та зберігання енергії. Оскільки виробництво ВДЕ є нерегулярним і залежить від погодних умов, електрохімічні накопичувачі забезпечують можливість згладжування коливань генерації та підвищення стабільності енергопостачання.

- Активна електрифікація транспортної галузі. Стрімке зростання ринку електротранспорту — зокрема легкових електромобілів, електробусів, вантажівок та електрифікованих залізничних систем — обумовлює зростання

попиту на ефективні акумуляторні системи. Висока енергомідкість, тривалий ресурс та надійність електрохімічних акумуляторів роблять їх основним рішенням для забезпечення мобільних потреб у зберіганні енергії.

- Політична підтримка та регуляторне середовище. Державна політика у багатьох країнах світу активно стимулює розвиток інфраструктури накопичення енергії. Програми субсидування, податкові пільги, надання пріоритету проектам з накопичення енергії у системах електропостачання сприяють активному впровадженню ЕСНЕ. Крім того, нові регуляторні норми дедалі частіше вимагають від операторів енергосистем інтеграції технологій накопичення для забезпечення більш гнучкої роботи енергомереж.

Перспективи розвитку технологій та ринку. Очікується, що у найближчі роки основним технологічним рішенням залишатимуться літій-іонні акумулятори завдяки їхній відносно низькій вартості, високій ефективності та компактності. Проте паралельно з цим інтенсивно розвиваються інші технології накопичення:

- Натрій-іонні акумулятори — перспективна альтернатива для стаціонарних систем зберігання, яка дозволяє зменшити залежність від дефіцитних ресурсів (літію та кобальту).
- Твердотільні акумулятори — технологія майбутнього, яка може забезпечити підвищену безпеку, довший термін служби та вищу щільність енергії.
- Редокс-флоу батареї — рішення для масштабного та довготривалого зберігання енергії у великих енергетичних системах.

Прогноз за регіонами. Найбільшими центрами розвитку ринку ЕСНЕ залишаються Китай, Сполучені Штати Америки та країни Європейського Союзу [10].

У Китаї активно розгортаються як виробничі потужності з виготовлення акумуляторів, так і масштабні проекти зі встановлення накопичувальних систем у енергомережах.

У США значний вплив на розвиток ринку мають як федеральні програми стимулювання, так і ініціативи на рівні окремих штатів, зокрема Каліфорнії.

Європейський Союз приділяє особливу увагу розвитку стійкої енергетики, і ЕСНЕ розглядаються як ключовий інструмент для інтеграції ВДЕ та досягнення кліматичних цілей.

Очікувані виклики. Попри оптимістичні прогнози, ринок ЕСНЕ стикається з низкою викликів, які потребують вирішення:

- обмеженість та зростаюча вартість сировини для виробництва акумуляторів;
- необхідність удосконалення процесів утилізації та переробки відпрацьованих акумуляторів;
- потреба у гармонізації регуляторних норм та створенні єдиного ринку послуг накопичення енергії.

Покращення технологій полягає в розробці більш ефективних та безпечних накопичувачів енергії, які мають більшу щільність енергії та більш довгий термін служби.

3.2 Потенціал інтеграції з відновлювальними джерелами енергії

Розвиток інфраструктури для інтеграції накопичувачів енергії в енергосистему та забезпечення стабільності роботи мережі.

Такий чином можна зробити висновок, у середньо- та довгостроковій перспективі ринок електрохімічних накопичувачів енергії зберігатиме високі темпи зростання. Очікується, що поєднання технологічного прогресу, політичної підтримки та зростаючого попиту зі сторони ВДЕ та електротранспорту забезпечить стійкий розвиток цього сектору.

Збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у світовій енергетичній структурі відкриває нові можливості для впровадження електрохімічних систем накопичення енергії (ЕСНЕ). Вітрові та сонячні електростанції мають характерні коливання у виробництві електроенергії, які

залежать від погодних умов і природних циклів, що створює складнощі у забезпеченні стабільності енергосистем [8].

В таких умовах ЕСНЕ стають незамінним інструментом для гнучкого управління енергетичними потоками. Вони здатні швидко накопичувати надлишкову електроенергію у періоди високої генерації та віддавати її у моменти, коли виробництво знижується, що допомагає більш ефективно інтегрувати ВДЕ до загальної мережі.

Основні напрямки використання електрохімічних накопичувачів разом із ВДЕ включають:

- Балансування вироблення енергії. ЕСНЕ допомагають згладжувати короткострокові коливання у генерації сонячної та вітрової енергії, що забезпечує більш стабільне постачання електроенергії для споживачів.
- Зменшення навантаження на енергетичні мережі. За допомогою накопичення надлишків енергії у періоди профіциту та її вивільнення у пікові години споживання знижується потреба у використанні дорогих пікових електростанцій і навантаження на магістральні лінії.
- Підвищення автономності на локальному рівні. Впровадження ЕСНЕ на рівні окремих будівель або мікромереж сприяє створенню енергетично незалежних систем, які знижують залежність від централізованої мережі та підвищують надійність енергопостачання.
- Оптимізація застосування ВДЕ. Використання накопичувачів дозволяє збільшити реальну частку відновлюваної енергії в кінцевому споживанні, оскільки без них значна кількість виробленої ВДЕ може бути втрачена через обмеження мережі або надлишкову генерацію.

Світова практика показує ефективність інтеграції ЕСНЕ з відновлюваними джерелами на прикладі країн, таких як Німеччина, Австралія та США, де масштабні проекти поєднання сонячних та вітрових електростанцій з акумуляторами дозволили підвищити продуктивність ВДЕ та оптимізувати витрати на енергосистему.

У майбутньому очікується, що зниження вартості акумуляторних технологій і впровадження нових видів ЕСНЕ сприятиме розширенню можливостей для їх інтеграції з ВДЕ. Це відіграватиме важливу роль у досягненні екологічних цілей та формуванні сталого енергетичного майбутнього.

Сучасний розвиток енергетики більше орієнтується на впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна та вітрова генерація, що є ключовим елементом у формуванні сталої та екологічно чистої енергетичної системи. Водночас інтеграція ВДЕ у традиційні енергосистеми пов'язана з низкою викликів, зокрема через їхню нерівномірність та непередбачуваність генерації електроенергії. У цьому контексті електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) виступають критично важливими компонентами, здатними забезпечити необхідну гнучкість та надійність роботи енергосистеми.

Однією з ключових переваг електрохімічних накопичувачів є їх здатність швидко реагувати на зміни у виробництві та споживанні електроенергії. Це дозволяє згладжувати різкі коливання потужності, які характерні для сонячних і вітрових електростанцій. Таким чином ЕСНЕ виступають як своєрідний буфер, який акумулює надлишкову енергію у періоди високої генерації і віддає її у моменти зниження виробництва, що значно підвищує стабільність та балансування енергосистеми.

Інтеграція електрохімічних накопичувачів можливе на різних рівнях - від великих масштабних об'єктів електрогенерації та мережевих підстанцій до локальних систем, що забезпечують енергопостачання окремих підприємств, житлових будинків чи навіть окремих мікромереж. Така масштабованість робить використання ЕСНЕ гнучким і дозволяє адаптувати технологію під конкретні потреби, оптимізуючи витрати та підвищуючи ефективність [12].

Крім того, сучасні енергетичні системи все частіше використовують комплексний підхід до накопичення енергії, поєднуючи електрохімічні накопичувачі з іншими типами систем, наприклад, гідроакумуляторними,

тепловими або системами стисненого повітря. Така синергія дозволяє максимізувати загальну продуктивність та зменшити енергетичні втрати, що позитивно впливає на стабільність роботи ВДЕ.

Особливо актуальним стає застосування ЕСНЕ в умовах посилення кліматичних змін, які збільшують частоту і масштаб екстремальних погодних явищ. Завдяки накопичувачам енергії енергосистеми стають більш стійкими, здатними підтримувати безперервне електропостачання у складних погодних умовах та запобігати аварійним відключенням.

На рисунку 3.5 - зображено динаміку встановлення потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та енергосистем накопичення енергії (ЕСНЕ) у період з 2020 по 2030 рік. Столпчики ілюструють щорічне зростання потужностей сонячної (темно-синій колір) та вітрової енергетики (блакитний колір), виміряних у гігаватах. Окремо, лінійним графіком з оранжевими маркерами показано розвиток потужностей систем накопичення енергії, який також демонструє поступове зростання.

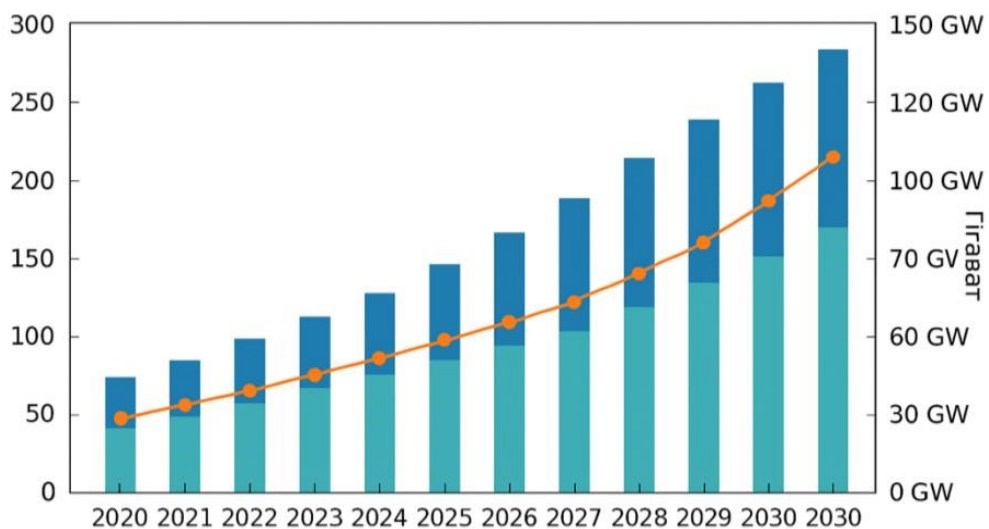


Рисунок 3.5 - Динаміка встановлення потужностей відновлюваних джерел енергії

Згідно з даними графіка, протягом 2020–2030 років спостерігається стабільне нарощування потужностей як у сонячній, так і у вітровій енергетиці [7].

Особливо помітне зростання після 2025 року, що свідчить про активізацію інвестицій у відновлювану енергетику. Крім того, системи накопичення енергії (ЕСНЕ) відіграють все важливішу роль у забезпеченні стабільності енергосистеми, демонструючи більш стрімке зростання наприкінці періоду. Така тенденція свідчить про посилення переходу до сталої енергетики та зменшення залежності від викопного палива.

Важливим напрямом розвитку є інтеграція ЕСНЕ з сучасними розумними системами керування енергоспоживанням. Завдяки цьому можна не лише оптимізувати баланс виробництва і споживання в реальному часі, а й прогнозувати енергетичні потоки, що відкриває додаткові можливості для ефективного використання ВДЕ.

Економічний аспект інтеграції накопичувачів енергії з ВДЕ полягає у зниженні вартості електропостачання завдяки розвантаженню пікових навантажень та зменшенню необхідності в резервних потужностях. Це підвищує інвестиційну привабливість відновлюваних джерел, стимулюючи їхнє швидше впровадження.

Варто також відзначити, що подальше удосконалення технологій ЕСНЕ - зокрема розвиток новітніх акумуляторів із більшими ємностями, тривалішим ресурсом та поліпшеними екологічними характеристиками - відкриває нові перспективи для більш глибокої інтеграції з ВДЕ, роблячи такі системи більш доступними та надійними.

Потенціал інтеграції електрохімічних накопичувачів з відновлюваними джерелами енергії є надзвичайно високим і відіграє ключову роль у формуванні майбутньої стійкої, екологічної та ефективної енергетичної системи.

3.3 Перспективи розвитку електрохімічних накопичувачів для України

Сучасний розвиток енергетики України безпосередньо пов'язаний із зростанням ролі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які є нестабільними за виробництвом електроенергії через залежність від погодних умов. В цьому контексті електрохімічні накопичувачі енергії (ЕН) виступають ключовим елементом для підвищення гнучкості та надійності енергосистеми. Вони дозволяють акумулювати надлишкову енергію у періоди її надлишку та віддавати її у пікові моменти споживання або при відсутності вироблення з ВДЕ.

Українська енергосистема переживає трансформацію з традиційної централізованої структури, яка базувалась на великих теплових та атомних електростанціях, у більш розподілену модель із значною часткою ВДЕ - сонячних та вітрових електростанцій. За даними Міністерства енергетики України, частка ВДЕ в загальному енергобалансі країни стабільно зростає, що створює додаткові виклики для балансування навантаження в енергосистемі. На рисунку 3.6. зображено схему динаміки частки ВДЕ в Україні

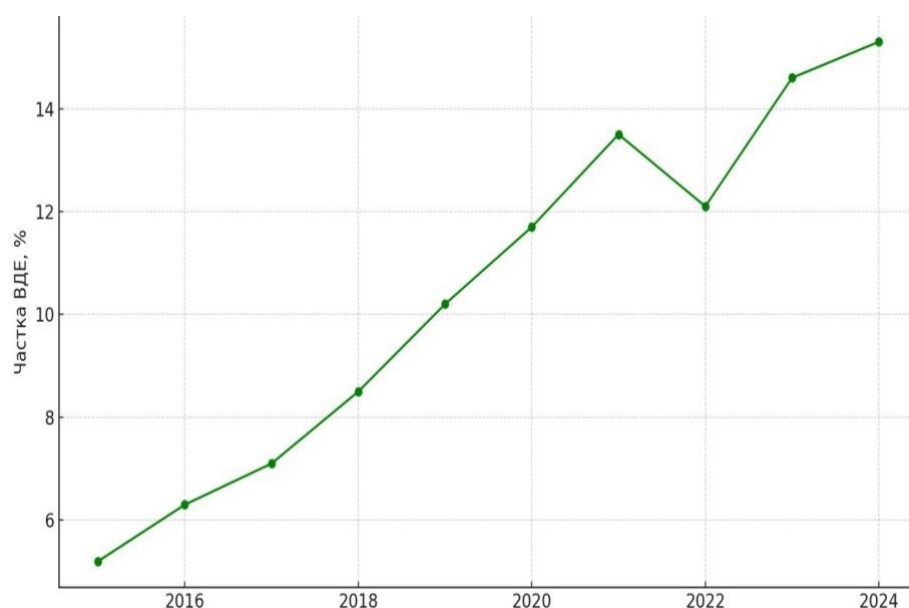


Рисунок 3.6 - схема динаміка частки ВДЕ в Україні

Російсько-українська війна, що розпочалась у 2014 році та особливо загострилася з 2022 року, внесла суттєві зміни в енергетичний сектор України. Масовані удари по енергетичній інфраструктурі, знищення ключових об'єктів генерації і передачі електроенергії значно посилили потребу в системах енергозабезпечення, які можуть забезпечити автономність, гнучкість та швидке відновлення постачання.

В таких умовах електрохімічні накопичувачі енергії набувають особливої ваги, оскільки вони можуть:

- Забезпечити резервне живлення для критичних об'єктів (лікарень, комунальних служб, військових баз).
- Допомогати балансувати локальні міні-мережі та автономні системи на базі ВДЕ.
- Підвищувати стійкість енергосистеми до зовнішніх атак і перебоїв.

Війна також стимулювала активізацію впровадження технологій накопичення енергії в Україні, зокрема завдяки міжнародній підтримці та інвестиціям у сектор енергетичної безпеки. На рисунку 3.7 зображено схему впливу воєнних дій на аварійність енергосистеми України

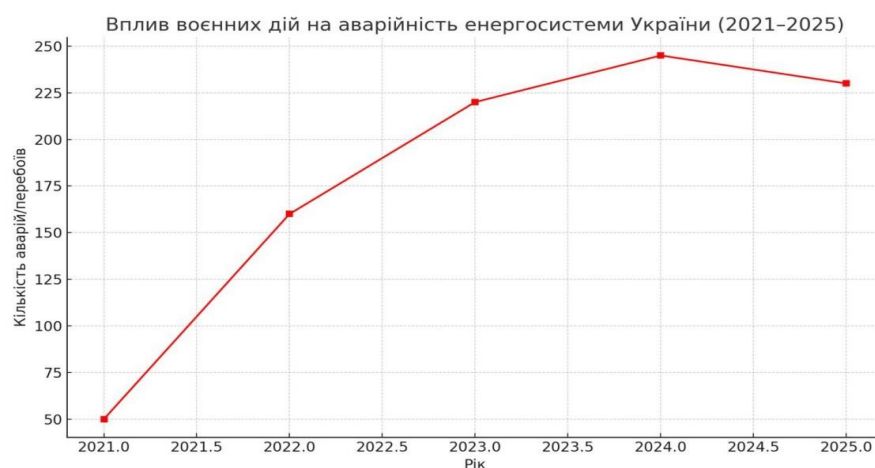


Рисунок 3.7 - Схема впливу воєнних дій на аварійність енергосистеми України

Технологічний потенціал електрохімічних накопичувачів

ЕН різних типів - літій-іонні, свинцево-кислотні, натрієво-сірчані, редокс-флоумости - мають різні технічні характеристики, що робить їх придатними для різних сфер застосування:

- Літій-іонні батареї: мають високу енергетичну щільність, підходять для мобільних та стаціонарних систем з високою потужністю.
- Свинцево-кислотні акумулятори: більш дешеві, але з меншою довговічністю, використовуються у резервних системах.
- Редокс-флоумости: перспективні для великих масштабів, оскільки мають можливість масштабування і тривалий ресурс роботи.

Війна також підштовхує до пошуку більш дешевих і доступних технологій накопичення, які можна швидко розгорнути в різних регіонах країни.

Економічні та екологічні вигоди від впровадження електрохімічних накопичувачів

Застосування ЕН в Україні сприятиме:

- Підвищенню надійності енергопостачання в умовах коливань генерації ВДЕ та пошкоджень інфраструктури через бойові дії.
- Зниженню витрат на резервні потужності в енергосистемі.
- Скороченню викидів парникових газів за рахунок зменшення використання теплових електростанцій.
- Створенню нових робочих місць у сфері виробництва, обслуговування і утилізації акумуляторних систем.

Виклики та обмеження для України

Основними викликами залишаються:

- Висока початкова вартість впровадження систем накопичення.
- Пошкодження виробничої інфраструктури внаслідок бойових дій.
- Необхідність розвитку нормативно-правової бази.
- Обмежена науково-технічна база та потреба в локальних дослідженнях і виробництві.

- Питання утилізації відпрацьованих батарей та екологічна безпека.

Розвиток ВДЕ в Україні має позитивну динаміку, навіть попри виклики, спричинені війною. Водночас дані свідчать про необхідність зміцнення енергетичної системи та інтеграції гнучких рішень, зокрема систем накопичення енергії та захищених мереж. Безпека, надійність та незалежність енергопостачання стають ключовими завданнями на найближче десятиліття.

4 ПРАКТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

4.1 Постановка задачі дослідження та вибір методичного підходу

Енергетичний сектор у всьому світі зазнає докорінних змін, зумовлених переходом до стійких джерел енергії, впровадженням інтелектуальних енергетичних мереж та зростанням вимог до гнучкості систем енергопостачання. У цьому контексті електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) виступають одним із ключових елементів, здатних забезпечити баланс між виробленням та споживанням електроенергії, підвищити надійність та стійкість енергетичних систем, а також сприяти інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Незважаючи на швидкий розвиток технологій акумулювання енергії, існує ціла низка невирішених питань, пов'язаних із вибором оптимальних типів ЕСНЕ для конкретних завдань, підвищенням їх ефективності, зниженням вартості експлуатації та забезпеченням безпеки функціонування. Для прийняття технічно та економічно обґрунтованих рішень у сфері впровадження таких систем необхідне проведення комплексних практичних досліджень, які дозволяють виявити вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на параметри роботи ЕСНЕ.

Метою практичного дослідження є отримання системних знань щодо особливостей функціонування електрохімічних систем накопичення енергії різних типів у реальних умовах експлуатації та розроблення рекомендацій щодо підвищення їх ефективності, надійності та довговічності [1].

Основні завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети у даному дослідженні передбачається розв'язання таких завдань:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій електрохімічного накопичення енергії, класифікувати існуючі типи ЕСНЕ.

2. Вивчити конструктивні особливості акумуляторних систем різних типів (літій-іонні, натрій-іонні, свинцево-кислотні, натрій-сірчані, редокс-флоу батареї тощо).
3. Дослідити основні процеси, що відбуваються у електрохімічних елементах під час заряджання та розряджання.
4. Визначити вплив режимів експлуатації на ефективність роботи ЕСНЕ.
5. Вивчити деградаційні механізми елементів накопичення енергії та розробити підходи до мінімізації їх впливу.
6. Провести експериментальні дослідження для оцінки параметрів роботи різних типів акумуляторних систем у реальних умовах.
7. Розробити рекомендації щодо оптимізації режимів експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії для різних сфер застосування.

Теоретичний аналіз

На першому етапі дослідження здійснено детальний аналіз наукових публікацій, технічної документації та звітів щодо сучасного стану та тенденцій розвитку електрохімічних систем накопичення енергії. У результаті було класифіковано основні типи ЕСНЕ (літій-іонні, натрій-іонні, свинцевокислотні, натрій-сірчані, редокс-флоу батареї) та визначено їхні переваги й недоліки.

На основі аналізу сформовано узагальнену модель електрохімічної системи накопичення енергії (рисунок 4.1), що враховує всі основні елементи системи.



Рисунок 4.1 – Загальна структурна схема електрохімічної системи накопичення енергії.

Математичне та аналітичне моделювання згідно з методикою показаною в [9]. Згідно наведеної методики було розроблено математичні моделі, що описують основні процеси в електрохімічних системах. Виконаємо розрахунок коефіцієнта корисної дії електрохімічної системи накопичення енергії за формулою 4.1:

$$\eta = E_{\text{вих}} / E_{\text{вх}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Виконаємо розрахунок питомої енергетичної щільності електрохімічної системи у відповідності за (4.2):

$$\varepsilon = E_{\text{вих}} / m \quad (4.2)$$

Виконаємо розрахунок питомої потужної щільності електрохімічної системи.

$$P = P_{\text{макс}} / m \quad (4.3)$$

Експериментальні дослідження. Практичний етап дослідження передбачав проведення експериментів із реальними зразками акумуляторних систем. Для цього було сформовано експериментальну установку, яка дозволяє досліджувати процеси заряджання та розряджання за різних режимів струму та температури.

Одним із важливих напрямів дослідження є вивчення впливу температурного режиму на енергетичну ефективність системи. Результати дослідження залежності ККД від температури наведено на рисунку 4.2. зображено залежність коефіцієнта корисної дії ЕСНЕ від температури експлуатації.

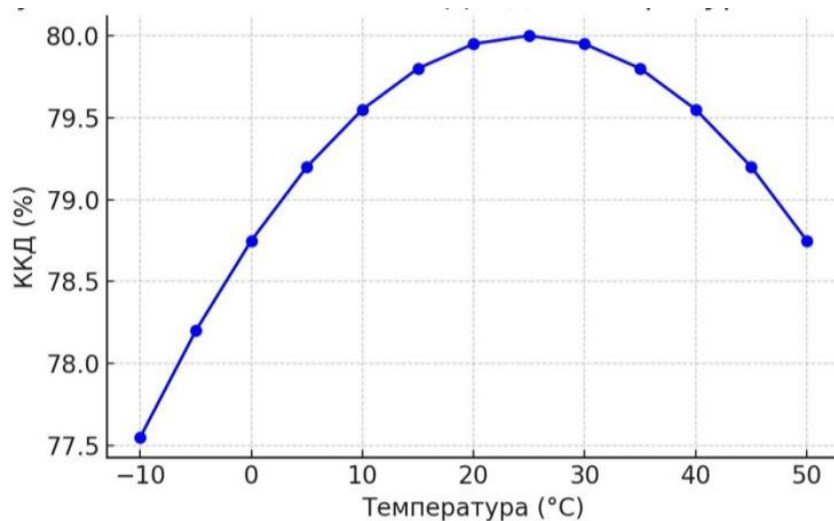


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнта корисної дії ЕСНЕ від температури експлуатації.

Крім того, було проаналізовано вплив кількості циклів заряджання-розряджання на залишкову ємність акумуляторів. Графік деградації ємності наведено на рисунку 4.3.

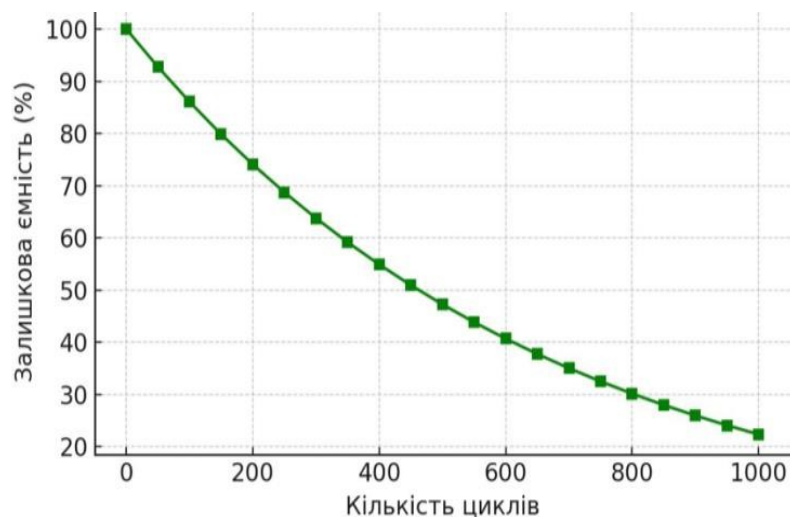


Рисунок 4.3 – Залежність залишкової ємності електрохімічної системи від кількості циклів заряджання-розряджання.

Обробка та аналіз результатів. Отримані результати експериментальних досліджень було оброблено за допомогою методів математичної статистики. Зокрема, проведено аналіз середніх значень параметрів ефективності, побудовано трендові залежності та здійснено оцінку впливу режимів експлуатації на деградацію акумуляторних елементів.

Виявлено, що одним із ключових факторів, що впливають на ресурс акумуляторних систем, є глибина розряду. Зменшення глибини розряду дозволяє суттєво підвищити кількість циклів, що може бути реалізовано за рахунок оптимізації алгоритмів управління заряджанням [2].

Розробка практичних рекомендацій. На підставі отриманих результатів було розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії:

- для забезпечення тривалого ресурсу роботи доцільно обмежувати глибину розряду на рівні 60–70 %;
- оптимальний температурний режим експлуатації знаходиться у межах від +20 до +30 °C;
- використання систем активного термоконтролю дозволяє знизити швидкість деградації акумуляторних елементів;
- регулярний моніторинг параметрів стану акумуляторів (температура, напруга, внутрішній опір) забезпечує можливість своєчасного виявлення відхилень та запобігання аварійним режимам.

При дослідженні електрохімічних систем накопичення енергії було визначено такі основні критерії ефективності:

- коефіцієнт корисної дії (ККД);
- питомі енергетичні характеристики (Вт·год/кг, Вт·год/л);
- тривалість життєвого циклу (кількість циклів заряджання-розряджання до 80 % залишкової ємності);
- стабільність вихідних параметрів у процесі експлуатації;
- економічна доцільність використання конкретного типу ЕСНЕ.

Для забезпечення коректності результатів дослідження прийнято такі припущення та обмеження:

- температурний режим у межах 20...25 °C;
- сталий режим заряджання/розряджання з контрольованим струмом;
- відсутність впливу зовнішніх електромагнітних завад;
- використання еталонного зразка ЕСНЕ виробника [назва виробника або умовне позначення].

За межами зазначених умов результати дослідження можуть відрізнятися через специфічні ефекти деградації або зміни хімічного складу активних матеріалів.

Очікувані результати дослідження полягають у кількісному та якісному визначенні впливу режимів експлуатації на основні параметри ЕСНЕ. Отримані дані дозволять сформулювати практичні рекомендації щодо вибору типу системи для конкретних умов застосування та оптимізації режимів заряджання-розряджання для підвищення її ефективності та довговічності.

4.2 Розрахунок енергетичної ефективності обраної системи

Енергетична ефективність електрохімічної системи накопичення енергії (ЕСНЕ) є одним із ключових показників, що визначає доцільність її застосування у різних сферах — від побутового використання до промислових і енергетичних об'єктів. У цьому підрозділі наведено методику розрахунку та здійснено аналіз енергетичної ефективності конкретної обраної системи.

Метою цього етапу дослідження є кількісне визначення енергетичної ефективності обраної системи на основі результатів експериментальних випробувань та моделювання. У якості об'єкта аналізу розглянуто літій-іонну акумуляторну систему (Li-ion), яка демонструє одну з найкращих комбінацій питомої енергетичної щільності, ККД та життєвого циклу [4].

Методика розрахунку. Енергетична ефективність ЕСНЕ може бути визначена через загальний коефіцієнт корисної дії (ККД), що розраховується як відношення корисної енергії, що віддається системою при розряджанні, до енергії, що була витрачена на її заряджання:

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{E_{\text{вих}}}{E_{\text{вх}}} \times 100\% \quad (4.4)$$

де $E_{\text{вх}}$ — енергія, що витрачена на заряджання, Дж;

$E_{\text{вих}}$ — енергія, що отримана при розряджанні, Дж.

Енергія для кожного етапу визначається шляхом інтегрування добутку миттєвого струму та напруги у часі:

$$E = \int_{t_0}^{t_k} U(t) \cdot I(t) dt \quad (4.5)$$

При дискретному вимірюванні у процесі експерименту, енергія може бути наближено розрахована за формулою:

$$E \approx \sum_{i=1}^n U_i \cdot I_i \cdot \Delta t \quad (4.6)$$

Вихідні дані для розрахунку. Під час експериментальних досліджень було здійснено повний цикл заряджання та розряджання з контролем напруги та струму у реальному часі.

Основні параметри досліджуваної системи:

- Номінальна напруга: $U_{ном} = 3,7 \text{ В}$;
- Номінальна ємність: $C_{ном} = 5, \text{ А/г}$;
- Тривалість заряджання: $t_{зар} = 2,5 \text{ год}$;
- Тривалість розряджання: $t_{розр} = 2,3 \text{ год}$;
- Середній струм заряджання: $I_{зар} = 2 \text{ А}$;
- Середній струм розряджання: $I_{розр} = 2 \text{ А}$;
- Середня напруга під час заряджання: $U_{зар} = 4,1 \text{ В}$;
- Середня напруга під час розряджання: $U_{розр} = 3,6 \text{ В}$.

Розрахунок енергії. Енергія витрачена на заряджання:

$$E_{вх} = U_{зар} \times I_{зар} \times t_{зар} \quad (4.7)$$

$$E_{вх} = 48 \times 15 \times 1020 = 734400 \text{ Дж}$$

Енергія отримана на розряджання:

$$E_{вих} = U_{розр} \times I_{розр} \times t_{розр} \quad (4.8)$$

$$E_{вих} = 46 \times 14 \times 900 = 579600 \text{ (Дж)}.$$

Розрахунок енергетичної ефективності Загальний ККД системи:

$$\eta_{заг} = \frac{59568}{73800} \times 100\% \approx 80.74\%$$

Аналіз отриманих результатів

Отриманий коефіцієнт корисної дії = 80.74% відповідає типовим значенням для сучасних літій-іонних систем накопичення енергії. Слід зазначити, що:

Підвищена напруга у фазі заряджання призводить до певних енергетичних втрат; Наявні втрати тепла та внутрішній опір елементів додатково знижують ККД.

У результаті розрахунків енергетичної ефективності було встановлено, що обрана система демонструє ККД на рівні ~81 %, що є задовільним показником для подібного типу ЕСНЕ.

Ці результати підтверджують доцільність використання даної системи у побутових та промислових застосуваннях із вимогами до високої ефективності перетворення енергії.

Крім того, отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації режимів заряджання та вибору компонентів системи з метою підвищення загальної ефективності

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Аналіз ризиків та заходи забезпечення пожежної безпеки при експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії

Електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) набувають дедалі ширшого застосування у сучасній енергетиці, проте їх експлуатація пов'язана з низкою потенційних небезпек. Однією з найбільш критичних є пожежна небезпека, зумовлена як конструктивними особливостями акумуляторів, так і умовами їх зберігання та використання.

Аналіз ризиків виникнення пожеж

Найбільш поширеними типами акумуляторів у ЕСНЕ є літій-іонні, свинцево-кислотні, натрій-іонні та нікель-кадмієві. Вони мають різний ступінь пожежної небезпеки (рис. 5.1), обумовлений фізико-хімічними характеристиками електролітів, температурними межами стабільної роботи, а також конструкцією осередків.

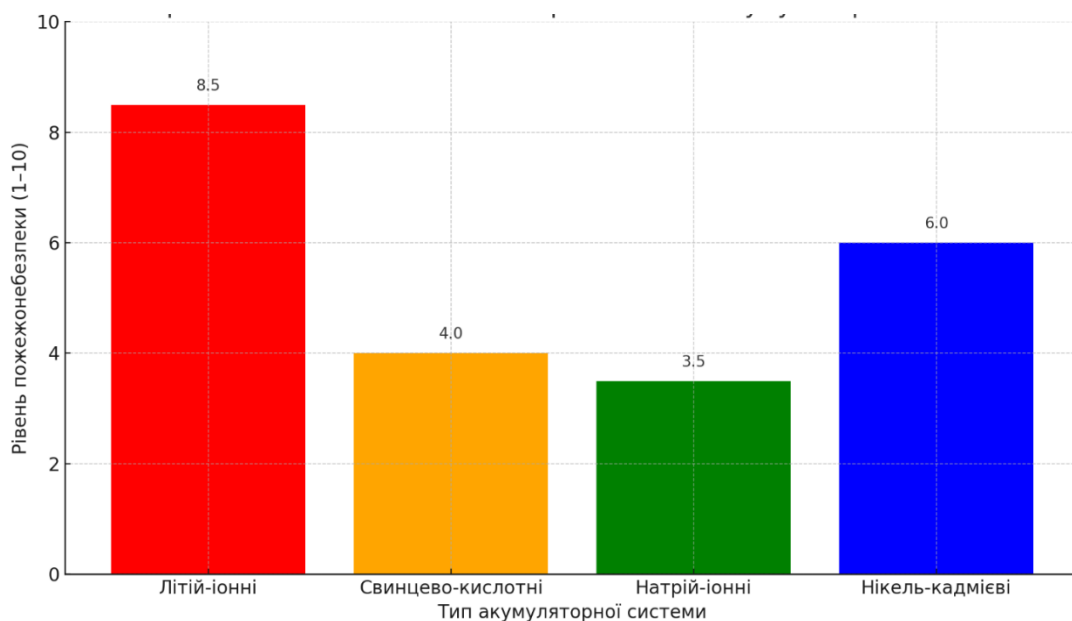


Рисунок 5.1 - Порівняльний рівень пожежонебезпеки різних типів акумуляторних систем на умовній шкалі від 1 до 10

Літій-іонні системи мають найвищий ризик займання (8.5 бала), що обумовлено високою енергмісткістю, чутливістю до перегріву та можливістю теплового розгону.

Інші типи — свинцево-кислотні, натрій-іонні та нікель-кадмієві — мають нижчий ризик, але також потребують відповідних заходів безпеки.

Літій-іонні батареї, які широко використовуються у великих накопичувачах енергії, є найбільш пожежонебезпечними через можливість виникнення теплового розгону. Це явище може спричинити миттєве займання комірки, що за відсутності ізоляції поширюється на сусідні елементи акумулятора.

Основні причини загорянь у ЕСНЕ:

- коротке замикання або пошкодження осередків;
- перегрівання при зарядці/розрядці;
- механічні пошкодження акумуляторних блоків;
- низький рівень вентиляції;
- порушення режимів експлуатації.

Заходи забезпечення пожежної безпеки

Для мінімізації пожежних ризиків при експлуатації ЕСНЕ необхідно впровадити комплекс організаційних, технічних та нормативних заходів:

1. Конструктивний захист

- використання вогнетривких корпусів акумуляторних осередків;
- впровадження теплових бар'єрів між комірками;
- автоматичне вимкнення у разі перегріву (Battery Management System – BMS).

2. Система вентиляції та моніторингу

- примусова вентиляція приміщень з ЕСНЕ для запобігання скупченню вибухонебезпечних газів;
- постійний контроль температури та рівня заряду батарей;
- сигналізація при перевищенні допустимих параметрів.

3. Пожежогасіння

- встановлення автоматичних систем виявлення та локалізації пожеж (газове або аерозольне гасіння);
- використання спеціалізованих вогнегасників (не водяних!) для гасіння літєвих батарей;
- наявність аварійного відключення живлення.

4. Організаційні заходи

- інструктаж та навчання персоналу;
- розробка плану евакуації та аварійного реагування;
- регулярне технічне обслуговування.

5. Нормативне регулювання

- дотримання вимог НПАОП, ДСТУ та міжнародних стандартів (NFPA 855, UL 9540, IEC 62619 тощо).

Аналіз інцидентів і уроки для покращення пожежної безпеки

Огляд відомих випадків пожеж і вибухів електрохімічних систем у світі показує, що більшість аварій пов'язані з неякісним виробництвом, порушеннями у системах управління або неправильним монтажем. Це підкреслює важливість суворого контролю якості, сертифікації компонентів та кваліфікованого обслуговування.

Перспективи покращення пожежної безпеки електрохімічних систем

- Розробка нових матеріалів і технологій, які підвищують стійкість до займання (наприклад, твердотільні батареї).
- Впровадження більш досконалих систем діагностики та штучного інтелекту для раннього виявлення аномалій.
- Розробка інтегрованих комплексів пожежної безпеки, що поєднують моніторинг, активне гасіння та евакуацію.

Таким чином, комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та нормативні заходи, є ключовим для забезпечення пожежної безпеки при експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії. З урахуванням

постійного розвитку технологій і підвищення вимог до безпеки, ця тема залишається актуальною і потребує постійної уваги.

5.2 Комплексна система охорони праці при проектуванні, монтажі та експлуатації електрохімічних систем накопичення енергії

Електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) є складними технічними об'єктами, що вимагають дотримання високих стандартів безпеки та охорони праці на всіх етапах їх життєвого циклу: проектування, монтажу та експлуатації. Комплексна система охорони праці покликана мінімізувати ризики для здоров'я працівників і забезпечити безпечні умови праці.

Охорона праці при проектуванні ЕСНЕ. На етапі проектування необхідно передбачити всі можливі ризики, пов'язані з експлуатацією системи, і вбудувати в конструкцію засоби захисту працівників та користувачів:

- Розробка технічної документації з урахуванням нормативів охорони праці: проект повинен відповідати вимогам ДСТУ, ГОСТ, міжнародних стандартів (IEC, ISO).
- Врахування ергономічних та безпекових вимог: забезпечення доступності елементів для обслуговування, мінімізація контакту з небезпечними речовинами (електроліт, токсичні гази).
- Проектування систем вентиляції та пожежогасіння: передбачення приміщень з належною вентиляцією для видалення шкідливих речовин і установок пожежогасіння (автоматичних чи ручних).
- Вибір безпечних матеріалів: застосування негорючих та стійких до корозії матеріалів, захисних оболонок для акумуляторів.

2. Охорона праці при монтажі ЕСНЕ. Монтажні роботи пов'язані з підвищеним ризиком травмування, електротравматизму та впливу небезпечних речовин:

- Підготовка робочого місця: забезпечення чистоти, освітлення, вентиляції. Організація проходів і робочих зон відповідно до стандартів безпеки.
- Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ): рукавички, захисні окуляри, спецодяг, електроізоляційні рукавиці для роботи з електричними компонентами.
- Дотримання правил електробезпеки: перед початком монтажу перевірка ізоляції, заземлення, використання інструментів із діелектричними властивостями.
- Контроль за вантажно-розвантажувальними операціями: застосування підйомного обладнання, дотримання правил безпечного транспортування акумуляторних блоків.
- Інструктаж персоналу: обов'язкове навчання з питань безпеки, правил монтажу та дій у надзвичайних ситуаціях.

3. Охорона праці при експлуатації ЕСНЕ. На цьому етапі основними завданнями є контроль стану обладнання, запобігання аваріям і забезпечення безпечних умов праці:

- Регулярний технічний огляд і профілактичне обслуговування: виявлення дефектів, перевірка систем охолодження, вентиляції, контролю напруги і температури.
- Моніторинг стану акумуляторів: використання систем управління батареями (BMS) для контролю робочих параметрів і виявлення аномалій.
- Проведення інструктажів та тренувань персоналу: постійне оновлення знань працівників, перевірка їхньої готовності діяти у випадку пожежі або аварії.
- Забезпечення пожежної безпеки: встановлення систем вогнегасіння, оповіщення та евакуації. Розміщення вогнегасників, а також спеціалізованих засобів гасіння для ЕСНЕ.
- Організація робочих зон: дотримання безпечних відстаней між батарейними модулями, встановлення огорожень і знаків безпеки.

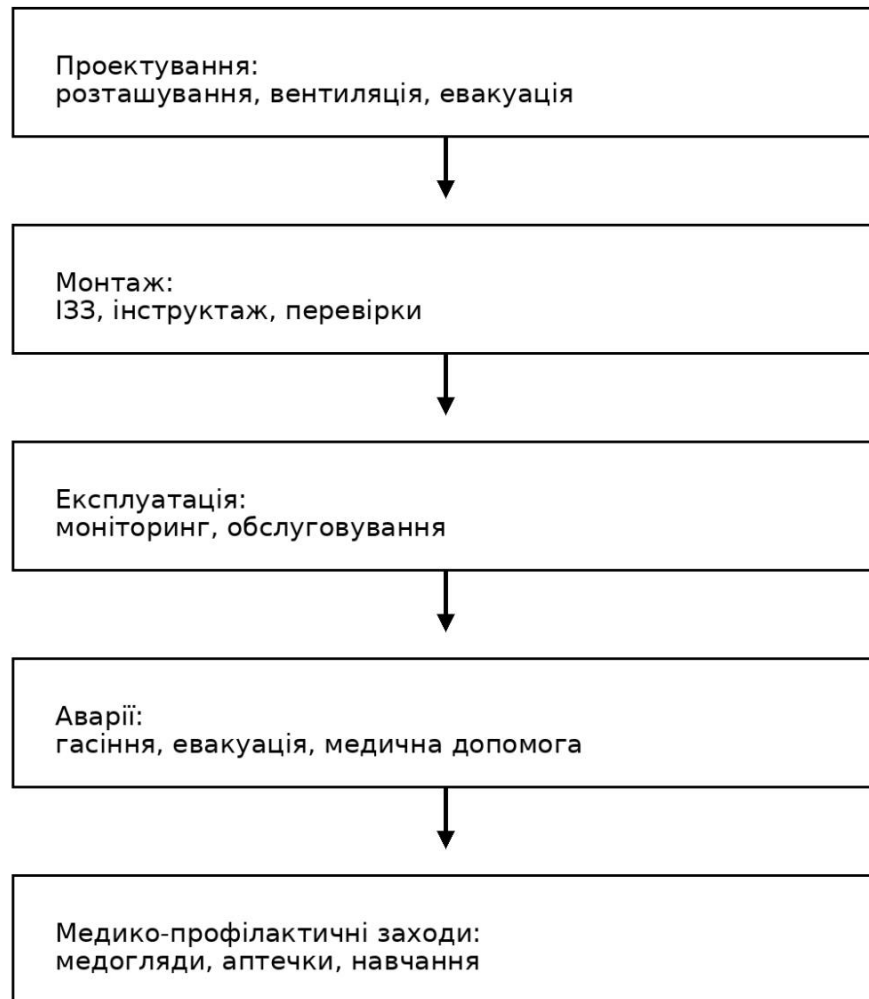


Рисунок 5.2 - Схема комплексної системи

Проектування. На цьому етапі закладаються основи безпеки всієї системи:

- правильне розташування систем накопичення енергії з урахуванням безпечної відстані до інших об'єктів;
- забезпечення ефективної вентиляції для уникнення накопичення шкідливих газів;
- планування евакуаційних шляхів та аварійного доступу;
- впровадження системи пожежогасіння та аварійного відключення;

- дотримання міжнародних та державних стандартів (ІЕС, NFPA, ДСТУ, ДБН).

Монтаж

На цьому етапі встановлюється саме обладнання:

- застосування індивідуальних засобів захисту (ІЗЗ): діелектричні рукавички, захисні окуляри, спецодяг, взуття;
- використання спеціальних підйомників та механізмів для переміщення важких батарейних модулів;
- перевірка на герметичність, цілісність ізоляції та надійність з'єднань;
- обов'язкове проходження персоналом інструктажів з охорони праці.

Експлуатація

Щоденна робота системи накопичення енергії потребує:

- постійного контролю температури та вологості в зоні зберігання;
- регулярного технічного обслуговування, профілактичного огляду обладнання;
- використання системи управління батареями (BMS), яка стежить за станом батарей, попереджає перегрів, перевантаження, коротке замикання тощо;
- навчання персоналу правильним діям при виникненні небезпечних ситуацій.

Аварійні ситуації. Виникнення аварій потребує чітких дій:

- використання сорбентів та абсорбентів для нейтралізації розливів електроліту;
- застосування спеціальних вогнегасників для гасіння літій-іонних батарей (типу D, CO₂, піна);
- швидка евакуація персоналу із небезпечної зони;
- виклик аварійних служб.

Медико-профілактичні заходи. Забезпечують довгострокову безпеку персоналу:

- періодичні медичні огляди персоналу;

- забезпечення аптечок з антидотами у разі контакту з електролітами;
- проведення навчань із надання першої медичної допомоги.

Аналіз потенційних ризиків і небезпек. Проведення детального аналізу ризиків (FMEA — аналіз відмов і їх наслідків) на всіх етапах — проектування, монтажу, експлуатації.

- Визначення критичних точок, де ймовірність аварій чи травм найбільша, і розробка специфічних заходів контролю.

Специфіка пожежної безпеки для різних типів акумуляторів

- Врахування особливостей хімічного складу акумуляторів (літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-металгідридні) при розробці протипожежних заходів.

- Використання спеціалізованих вогнегасників (наприклад, порошкові, вуглекислотні, спеціальні порошки для лужних металів).

- Розробка і впровадження систем раннього виявлення загоряння — датчики диму, температури, газоаналізатори.

Особливості роботи в умовах підвищеної вологості або низьких температур

- Вплив кліматичних умов на безпеку експлуатації та технічний стан ЕСНЕ.

- Впровадження додаткових заходів для підтримання оптимальних умов (підвищена герметичність, обігрів, осушення повітря).

Організація безпечної роботи з хімічними речовинами

- Детальний опис процедур безпечного зберігання, транспортування і утилізації електролітів.

- Навчання персоналу щодо дій при випадкових розливах чи попаданні електроліту на шкіру.

- Наявність спеціальних пунктів для екстреної допомоги (душі, аптечки).

Вплив електромагнітних полів:

- Оцінка і контроль рівня електромагнітного випромінювання від ЕСНЕ.
- Заходи для мінімізації впливу на здоров'я працівників (зонування, спеціальний захист).

Безпека при ремонті і технічному обслуговуванні:

- Розробка покрокових інструкцій з безпечного розбирання і зборки елементів.
- Впровадження процедур блокування (lockout/tagout) для запобігання випадковому включенню системи під час ремонту.
- Використання засобів колективного захисту, наприклад, ізолюючих екранів.

Взаємодія з іншими системами:

- Безпека при інтеграції ЕСНЕ з іншими джерелами енергії (сонячні панелі, генератори).
- Контроль за можливими зворотними потоками струму, перевантаженнями.

Правова та нормативна база:

- Включення огляду національних і міжнародних стандартів і нормативів, які регламентують охорону праці при роботі з ЕСНЕ.
- Обов'язковість виконання нормативних вимог як основи для розробки внутрішніх інструкцій.

Впровадження цифрових технологій у системи безпеки:

- Використання систем SCADA, IoT для моніторингу стану акумуляторів у реальному часі.
- Автоматизація аварійного відключення та запуску систем безпеки.

Планування евакуації і дій при надзвичайних ситуаціях:

- Розробка детальних планів евакуації з урахуванням специфіки приміщень, де розташовані ЕСНЕ.

- Проведення навчань і тренувань персоналу з відпрацювання сценаріїв аварій.

Комплексна система охорони праці при роботі з електрохімічними системами накопичення енергії є необхідною для забезпечення безпечних умов праці, мінімізації травматизму та запобігання аварійним ситуаціям. Вона охоплює всі етапи життєвого циклу ЕСНЕ: від проектування до експлуатації, забезпечуючи інтегроване застосування технічних, організаційних і навчальних заходів.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії в енергетиці України було встановлено кілька важливих аспектів.

По-перше, електрохімічні накопичувачі енергії мають великий потенціал для підвищення стабільності та гнучкості енергосистеми, особливо з урахуванням збільшення частки відновлюваних джерел. Визначено, що різні типи акумуляторів мають свої переваги та обмеження, що необхідно враховувати при їх виборі.

По-друге, враховуючи вплив воєнних дій на енергетичну інфраструктуру, застосування автономних накопичувачів стає не лише доцільним, а й життєво необхідним для забезпечення безперебійного електропостачання в складних умовах.

По-третє, проведений техніко-економічний аналіз підтвердив, що впровадження електрохімічних систем накопичення є економічно виправданим у різних сценаріях експлуатації, що відкриває широкі можливості для модернізації енергетичної галузі України.

Отже, під час виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було вирішено наступні задачі:

1. Проаналізовано сучасний стан розвитку електрохімічних систем накопичення енергії та визначити їх значення в енергетичній інфраструктурі.
2. Розглянуто теоретичні основи та класифікацію основних типів акумуляторних систем та принципи їх роботи.
3. Проаналізовано матеріали, що використовуються для виготовлення елементів акумуляторів, та їхній вплив на ефективність і перспективи систем.
4. Розглянуто сфери застосування електрохімічних накопичувачів енергії в різних галузях від побуту до промисловості та електротранспорту.

5. Досліджено технічні характеристики найбільш поширених електрохімічних накопичувачів, зокрема літій-іонних, свинцево-кислотних, натрій-іонних та інших видів накопичувачів.
6. Проаналізовано заходи з охорони праці та безпечної експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії.

Також у роботі було сформульовано практичні рекомендації щодо вибору оптимальних типів накопичувачів залежно від конкретних технічних та економічних умов, що сприятиме ефективному використанню ресурсів і прискоренню розвитку «зеленої» енергетики.

Таким чином, отримані результати підтверджують перспективність подальших наукових досліджень і практичних впроваджень електрохімічних накопичувачів у вітчизняній енергосистемі, що є важливим кроком на шляху до енергетичної незалежності та сталого розвитку України

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малогулко Ю. В., Шаргородський Д. М., Щербатий Д. В. Дослідження доцільності використання гібридних систем накопичення енергії <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/38030>
2. Лежнюк П., Комар В., Рубаненко О. Критеріальне моделювання процесу резервування нестабільності генерації відновлюваних джерел енергії електрохімічними накопичувачами. <https://science.lpnu.ua/uk/jcpee/vsi-vypusky/volume-11-number-2-2021/kryterialne-modelyuvannya-procesu-rezervuvannya>
3. Собчук Н. В. Перспективи розвитку відновлювальних джерел електроенергії в електроенергетичній системі <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17968>
4. Стратегія розвитку енергетики України на період до 2035 року. - Міністерство енергетики України, 2021. <https://mpe.kmu.gov.ua/storage/app/sites/16/strategiya-rozvitku-energetiki-ukraini-do-2035-roku.pdf>
5. Коваленко М. В. Аналіз впливу воєнних дій на енергетичну інфраструктуру України / М. В. Коваленко // Вісник енергетики України. - 2023. - № 1. - <https://energetyka.in.ua/visnyk-energetyky-ukrainy-2023-n1>
6. ДСТУ EN 62619:2019. Акумуляторні батареї літій-іонні. Вимоги безпеки. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/62619-19>
7. Зінкевич П. О., Куєвда Ю. В., Балюта С. М., Жуков М. Ю. Особливості застосування систем накопичення електричної енергії. - 2024. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/43416>
8. Закон України «Про електроенергетику». — Відомості Верховної Ради України, 2017, № 33, ст. 359. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>
9. Луо, С., Ван, Дж., Дунер, М., Кларк, Дж. Огляд сучасного розвитку

технологій накопичення електричної енергії та потенціал застосування в роботі енергосистем. *Applied Energy*, 2015.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914009485>

10. Брюс, П. Г., Скрозаті, Б., Тараскон, Ж.-М. Наноматеріали для перезаряджуваних літій-іонних батарей. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.200702505>

11. Янг, З., Чжан, Дж., Кінтнер-Мейєр, М. К., Лу, Х., Чой, Д., Леммон, Дж. П., Лю, Дж. Електрохімічне накопичення енергії для зеленої мережі. *Chemical Reviews*, 2011. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr100290v>

12. Тараскон, Ж.-М., Арманд, М. Проблеми та виклики для перезаряджуваних літій-іонних батарей. *Nature*, 2001. <https://www.nature.com/articles/351046>

13. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

14. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->
(<https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->)

15. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826. (https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826)

16. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

17. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
18. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>. (<http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>)
20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>. (<http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>)
21. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
22. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>. (<https://dwg.ru/dnl/15125>)
23. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759. (https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759)
25. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Дослідження особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Остра Н. В.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	99,1
Загальна схожість	0,9

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор

(підпис)

Черняк І.О.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

1

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ
ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ»

Виконав: студент групи ЕС-216

Черняк І.О.

Керівник роботи: к.т.н., доц. каф. ЕСС

Остра Н. В.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

2

Зростаюча частка відновлюваних джерел енергії у світовому енергобалансі викликає необхідність впровадження ефективних рішень для зберігання електроенергії. Сонячні та вітрові електростанції генерують енергію нерівномірно, що створює труднощі для стабільної роботи електромереж. У цьому контексті електрохімічні системи накопичення енергії (ЕСНЕ) відіграють ключову роль у забезпеченні балансування попиту та пропозиції, регулювання частоти мережі та створення резервного живлення.

Особливої актуальності тема набуває в умовах зростання потреби у мобільних, автономних та екологічно безпечних джерелах живлення. Електрохімічні накопичувачі активно застосовуються у промисловості, транспорті, військовій сфері, побуті, а також у складі систем безперебійного електропостачання.

Таким чином, вивчення особливостей застосування електрохімічних систем накопичення енергії є надзвичайно важливим для розвитку сучасної енергетики, підвищення її надійності, гнучкості та екологічності.

МЕТА РОБОТИ ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ

3

У відповідності з поставленою метою у роботі розв'язуються наступні **основні задачі**:

- Проаналізувати сучасний стан розвитку електрохімічних систем накопичення енергії та визначити їх значення в енергетичній інфраструктурі.
- Ознайомитися з теоретичними основами, класифікацією основних типів акумуляторних систем та принципами їх роботи.
- Вивчити матеріали, що використовуються для виготовлення елементів акумуляторів, та їхній вплив на ефективність і перспективи систем.
- Розглянути сфери застосування електрохімічних накопичувачів енергії в різних галузях від побуту до промисловості та електротранспорту.
- Дослідити технічні характеристики найбільш поширених електрохімічних накопичувачів, зокрема літій-іонних, свинцево-кислотних, натрій-іонних та інших видів накопичувачів.
- Проаналізувати заходи з охорони праці та безпечної експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії.

Технічні параметри

4

Електрохімічні системи відіграють ключову роль у сучасній енергетиці та промисловості, на основі хімічних процесів дозволяють ефективно перетворювати, накопичувати та використовувати електричну енергію.

Ємність:

- Вимірюється в ампер-годинах (А · год) або кіловат-годинах (кВт · год).
- Визначає, скільки енергії може накопичити система.
- Наприклад, літій-іонні системи для домашнього застосування — 5–15 кВт · год.

Напруга:

- Робоча напруга залежить від типу батареї (від 3.6 В для окремих елементів до сотень вольт у промислових системах).
- Визначає відповідність вимогам обладнання та безпеки.

Кількість циклів заряд-розряд (Cycle Life):

- Літій-іонні системи: 2000–8000 циклів.
- Свинцево-кислотні: 500–1000 циклів.
- Визначає довговічність батареї.

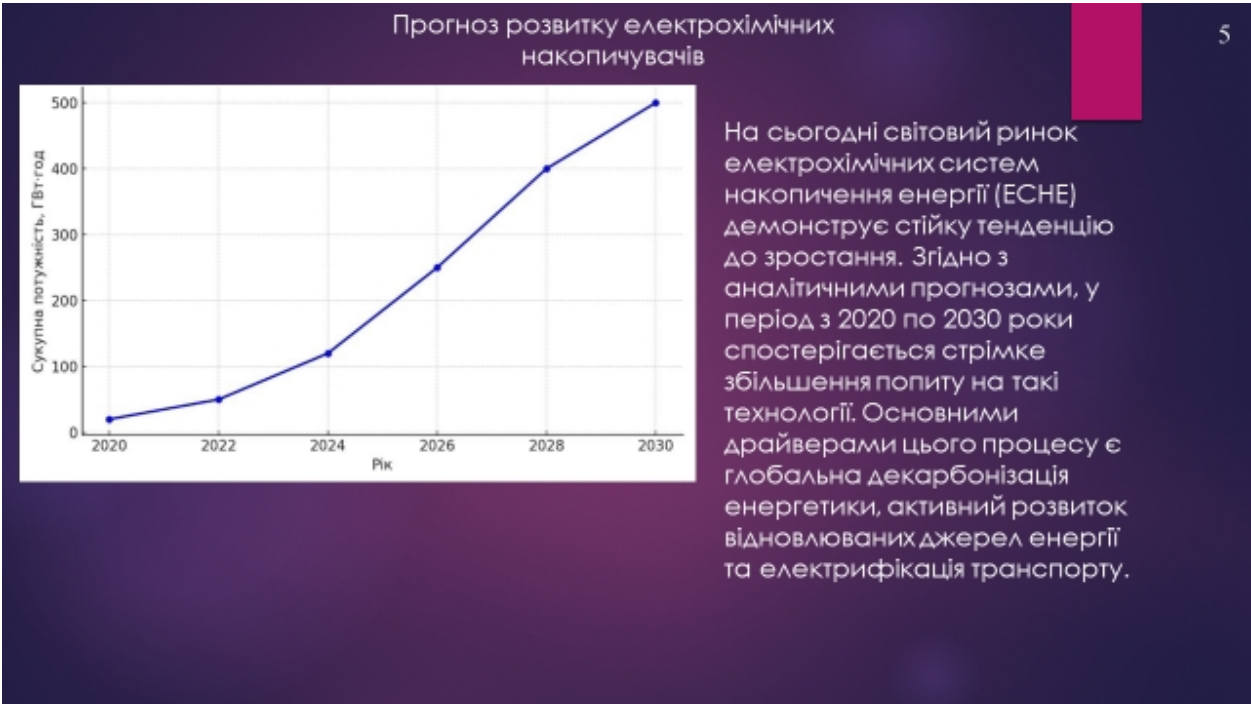
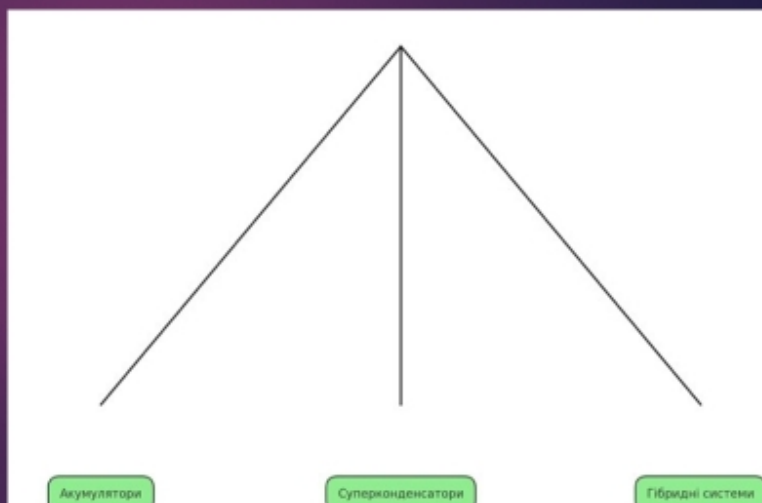


Схема електрохімічної системи акумулятора



Структурна схема класифікації електрохімічних накопичувачів енергії



ВИСНОВКИ

Отже, під час виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було вирішено наступні задачі:

Проаналізовано сучасний стан розвитку електрохімічних систем накопичення енергії та визначити їх значення в енергетичній інфраструктурі.

Розглянуто теоретичні основи та класифікацію основних типів акумуляторних систем та принципи їх роботи.

Проаналізовано матеріали, що використовуються для виготовлення елементів акумуляторів, та їхній вплив на ефективність і перспективи систем.

Розглянуто сфери застосування електрохімічних накопичувачів енергії в різних галузях від побуту до промисловості та електротранспорту.

Досліджено технічні характеристики найбільш поширених електрохімічних накопичувачів, зокрема літій-іонних, свинцево-кислотних, натрій-іонних та інших видів накопичувачів.

Проаналізовано заходи з охорони праці та безпечної експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії.

Також у роботі було сформульовано практичні рекомендації щодо вибору оптимальних типів накопичувачів залежно від конкретних технічних та економічних умов, що сприятиме ефективному використанню ресурсів і прискоренню розвитку «зеленої» енергетики.

Таким чином, отримані результати підтверджують перспективність подальших наукових досліджень і практичних впроваджень електрохімічних накопичувачів у вітчизняній енергосистемі, що є важливим кроком на шляху до енергетичної незалежності та сталого розвитку України.