

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Аналіз характеристик акумуляторів різних типів як
накопичувачів електроенергії
Analysing the characteristics of different types of
batteries as energy storage devices»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Євгеній
МАКЛАШЕВСЬКИЙ
«__» _____2024 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Олександр СІРІКОВ
«__» _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛЕСКОВ

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Маклашевського Євгенія Олеговича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Аналіз характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії

Analysing the characteristics of different types of batteries as energy storage devices

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 16.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є аналіз характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії.

Завдання роботи:

– теоретичні основи роботи акумуляторів;

– огляд існуючих типів акумуляторів;

– порівняльний аналіз характеристик акумуляторів;

– охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Теоретичні основи роботи акумуляторів</i>	<i>21.10.24</i>	
3	<i>Огляд існуючих типів акумуляторів</i>	<i>04.11.24</i>	
4	<i>Порівняльний аналіз характеристик акумуляторів</i>	<i>18.11.24</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>02.12.24</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>09.12.24</i>	
7	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>	<i>16.12.24</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Маклашевський Є.О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Маклашевський Є.О. Аналіз характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024.

Магістерська робота присвячена аналізу характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії, що є ключовим елементом сучасних енергетичних систем. У роботі розглянуто принципи роботи акумуляторів, їх технічні характеристики та фактори, що впливають на ефективність.

Здійснено класифікацію та порівняльний аналіз найпоширеніших типів акумуляторів: свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, нікель-металгідридних, літій-іонних, літій-залізо-фосфатних, літій-титанатних, натрієвих, цинкових та суперконденсаторів. Основна увага приділялася таким параметрам, як енергетична щільність, вартість, циклічність, термін служби, робоча напруга та безпека.

Результати дослідження дозволили визначити, що літій-іонні акумулятори є оптимальними для рухомих об'єктів завдяки високій енергетичній щільності та доступній вартості. Для стаціонарних систем запропоновано використовувати літій-титанатні акумулятори, які вирізняються високою циклічністю, тривалим терміном служби, безпекою і самою низькою вартістю одного циклу.

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору типу акумулятора залежно від умов експлуатації. Отримані висновки можуть бути корисними для розробки ефективних енергосистем, оптимізації енергоспоживання та впровадження інноваційних технологій у сфері зберігання енергії.

Ключові слова: акумулятори, енергозберігаючі системи, циклічність, енергетична щільність, літій-іонні акумулятори.

ABSTRACT

Maklashevskiy Y.O. Analysing the characteristics of different types of batteries as energy storage devices.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Energy Management», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The master's thesis is devoted to the analysis of the characteristics of batteries of various types as energy storage devices, which are a key element of modern energy systems. The paper considers the principles of operation of batteries, their technical characteristics and factors affecting efficiency.

A classification and comparative analysis of the most common types of batteries was carried out: lead-acid, nickel-cadmium, nickel-metal hydride, lithium-ion, lithium iron phosphate, lithium titanate, sodium, zinc and supercapacitors. The main attention was paid to such parameters as energy density, cost, cyclicity, service life, operating voltage and safety.

The results of the study allowed us to determine that lithium-ion batteries are optimal for mobile objects due to their high energy density and affordable cost. For stationary systems, it is proposed to use lithium titanate batteries, which are characterized by high cyclicity, long service life, safety and the lowest cost per cycle.

Based on the analysis, recommendations were formulated for choosing the type of battery depending on the operating conditions. The conclusions obtained may be useful for the development of efficient power systems, optimization of energy consumption and the implementation of innovative technologies in the field of energy storage.

Key words: batteries, energy-saving systems, cyclicity, energy density, lithium-ion batteries.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ АКУМУЛЯТОРІВ.....	10
1.1. Основні принципи роботи акумуляторів.....	10
1.2. Технічні характеристики акумуляторів	12
1.3. Фактори, що впливають на роботу акумуляторів.....	26
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ АКУМУЛЯТОРІВ	29
2.1. Свинцево-кислотні акумулятори.....	29
2.2. Нікель-кадмієві акумулятори.....	33
2.3. Нікель-металгідридні акумулятори.....	38
2.4. Літій-іонні акумулятори	41
2.4.1. Типи літій-іонних акумуляторів	42
2.4.2. Принцип роботи та характеристики літій-іонних акумуляторів.....	44
2.5. Інші типи акумуляторів (натрієві, цинкові, суперконденсатори)	49
2.5.1. Натрієвий акумулятор.....	49
2.5.2. Цинковий акумулятор.....	51
2.5.3. Суперконденсатор (іоністор)	54
РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК АКУМУЛЯТОРІВ	57
3.1. Табличне порівняння різних типів акумуляторів за основними параметрами.....	57
3.2. Графічне зображення результатів порівняння	60
3.3. Аналіз отриманих результатів	62
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	67
4.1. Аналіз потенційних небезпек і шкідливих факторів.....	67
4.1.1. Хімічні небезпеки.....	67
4.1.2. Електричні небезпеки.	69
4.1.3. Теплові та механічні ризики.	71
4.2. Заходи з безпеки під час роботи з акумуляторами.	74
4.2.1. Безпечне поводження з хімічними речовинами в акумуляторах.	74

4.2.2. Використання засобів індивідуального захисту.	77
4.2.3. Технічні засоби забезпечення безпеки.....	78
4.3. Охорона праці під час експлуатації акумуляторів.....	81
4.3.1. Правила заряджання та розряджання акумуляторів.....	81
4.3.2. Попередження аварійних ситуацій та дії у разі їх виникнення.....	84
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Світ, що стрімко розвивається, ставить перед нами все більш амбітні цілі щодо забезпечення сталого та екологічно безпечного енергопостачання. Ми переживаємо енергетичну трансформацію, де ключову роль відіграють відновлювані джерела енергії та електромобільність. Перехід до відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, є невід'ємною частиною цього процесу. Однак, мінливість виробництва електроенергії з таких джерел потребує ефективних рішень для її зберігання та подальшого використання. Саме тут на перший план виходять акумулятори, які здатні накопичувати надлишкову енергію та забезпечувати її подачу в мережу в періоди дефіциту.

Акумулятори, колись скромні джерела живлення для портативних пристроїв, сьогодні перетворюються на ключових гравців на енергетичній арені. Їх значення стрімко зростає, особливо в контексті глобального переходу до відновлюваних джерел енергії та бурхливого розвитку електромобілів.

Актуальність дослідження. Дослідження характеристик різних типів акумуляторів є надзвичайно актуальним з кількох причин. По-перше це розвиток відновлюваних джерел енергії так, інтеграція великої кількості сонячних та вітрових електростанцій в енергосистему вимагає ефективних систем зберігання енергії для забезпечення стабільності роботи мережі. По-друге швидке зростання популярності електромобілів стимулює розвиток більш енергоємних і довговічних акумуляторних батарей. По-третє децентралізація енергетики, а саме розвиток мікромереж та автономних енергосистем потребує використання різних типів акумуляторів для забезпечення їх енергетичної незалежності. Вчетверте забезпечувати резервне живлення, а саме акумулятори можуть використовуватися як резервні джерела живлення для критично важливих об'єктів, таких як лікарні, дата-центри та комунікаційні системи, забезпечуючи безперебійне електропостачання в разі аварійних ситуацій.

Різноманіття акумуляторів зумовлене різними хімічними складами, конструкціями та призначеннями. Різні типи акумуляторів мають свої переваги та відповідно і недоліки. Порівняльний аналіз їх характеристик дозволяє вибрати оптимальне рішення для конкретних умов застосування. Саме на вирішення цієї науково-практичної задачі і присвячена дана робота.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Огляд існуючих типів акумуляторів та їх основних характеристик.
2. Порівняльний аналіз різних типів акумуляторів за різними критеріями (енергетична щільність, потужність, циклічність, вартість, безпека тощо).
3. Дослідження впливу різних факторів на характеристики акумуляторів (температура, швидкість заряджання/розряджання).
4. Аналіз перспектив розвитку акумуляторних технологій.

Об'єкт дослідження використання акумуляторних батарей як накопичувачів електроенергії.

Предмет дослідження аналіз технічних та економічних характеристик акумуляторів різних типів.

Методи дослідження. Моделювання для створення математичних моделей прогнозування поведінки акумуляторів в різних умовах експлуатації; аналізу літературних джерел для огляд сучасних досліджень в галузі акумуляторних технологій.

Основні практичні результати роботи: Результати дослідження дозволили визначити, що літій-іонні акумулятори є оптимальними для рухомих об'єктів завдяки високій енергетичній щільності та доступній вартості. Для стаціонарних систем запропоновано використовувати літій-титанатні акумулятори, які вирізняються високою циклічністю, тривалим терміном служби, безпекою і самою низькою вартістю одного циклу.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ АКУМУЛЯТОРІВ

1.1. Основні принципи роботи акумуляторів

Акумулятор – це електрохімічний пристрій, який здатний накопичувати електричну енергію у хімічному вигляді та віддавати її за потреби. Принцип роботи акумулятора базується на зворотних хімічних реакціях, які відбуваються між електродами та електролітом. Ці реакції призводять до перетворення хімічної енергії на електричну і навпаки.

Основні компоненти акумулятора (рис. 1.1):

Електроди: Позитивний (катод) та негативний (анод) електроди, які беруть участь у хімічних реакціях.

Електроліт: Проводить іони між електродами, забезпечуючи протікання електричного струму.

Роздільник (сепаратор): Ізолює електроди один від одного, запобігаючи прямому контакту та короткому замиканню.

Фактично процес роботи складається з двох циклів:

– Заряджання: Під час заряджання до акумулятора підводиться електричний струм. Цей струм викликає хімічні реакції на електродах, в результаті яких хімічна енергія накопичується всередині акумулятора.

– Розряджання: Коли акумулятор підключений до споживача, хімічні реакції на електродах протікають у зворотному напрямку, віддаючи накопичену енергію у вигляді електричного струму.

Коли до акумулятора підводиться електричний струм (цикл заряджання), на електродах починають відбуватися такі процеси:

Катод: На позитивному електроді (катоді) відбувається процес відновлення. Іони з електроліту отримують електрони від зовнішнього джерела і вбудовуються в кристалічну решітку катодного матеріалу.

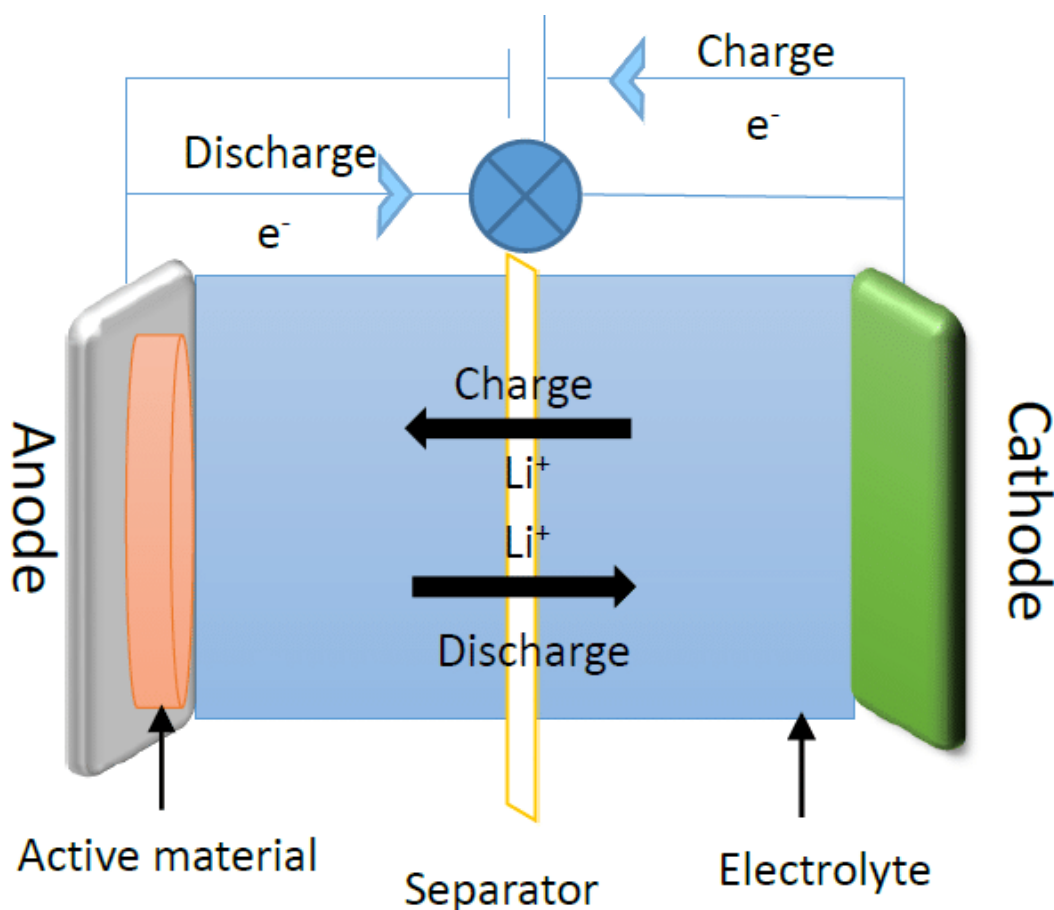


Рис. 1.1. Принципова схема процесу заряду-розряду в Li-ion акумуляторах.
[\[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-charging-discharging-process-in-Li-ion-batteries_fig3_320885489\]](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-charging-discharging-process-in-Li-ion-batteries_fig3_320885489)

Анод: На негативному електроді (аноді) відбувається процес окислення. Атоми матеріалу анода віддають електрони і перетворюються на іони, які переходять в електроліт.

Під час розряджання процеси відбуваються у зворотному напрямку:

Катод: Матеріал катода віддає електрони, а іони переходять в електроліт.

Анод: Іони з електроліту вбудовуються в матеріал анода, віддаючи електрони зовнішньому ланцюгу.

Приклад процесів, що відбуваються на електродах літій-іонного акумуляторі (рис. 1.2):

Заряджання: Іони літію (Li^+) мігрують з катода до анода, віддаючи електрони. В аноді вони вбудовуються в графітову структуру.

Розрядження: Іони літію мігрують з анода до катода, віддаючи електрони зовнішньому ланцюгу.

1.2. Технічні характеристики акумуляторів

До основних характеристики акумуляторів відносять: ємність, напруга, внутрішній опір, енергетична щільність, потужність, циклічність, термін служби. Розглянемо кожен параметр окремо.

Ємність акумулятора – це фізична величина, що визначає кількість електричної енергії, яку акумулятор здатний зберігати та віддавати за певних умов. Вона показує, скільки струму акумулятор може забезпечити за одиницю часу, і вимірюється в ампер-годинах (А·год) або міліампер-годинах (мА·год).

Формула для обчислення ємності:

$$C = I \cdot t$$

де: C – ємність (А·год або мА·год),

I – сила струму (А або мА),

t – час роботи (години).

Наприклад, якщо акумулятор має ємність 10 А·год, це означає, що він може забезпечувати струм 10 ампер протягом 1 години або 1 ампер протягом 10 годин.

Типи ємності акумуляторів:

1. Номінальна ємність – це значення, яке вказує виробник. Воно вимірюється за стандартних умов (температура, рівень розряду).
2. Реальна ємність – це фактична кількість енергії, яку акумулятор може віддати в реальних умовах. Вона залежить від температури, режиму зарядки/розрядки та віку акумулятора.

Ємність визначає, скільки часу пристрій може працювати без підзарядки. Наприклад:

- Для смартфонів ємність зазвичай вимірюється в мА·год (наприклад, 5000 мА·год).

- У електромобілях вона часто виражається в кіловат-годинах (кВт·год), що відображає запас ходу.

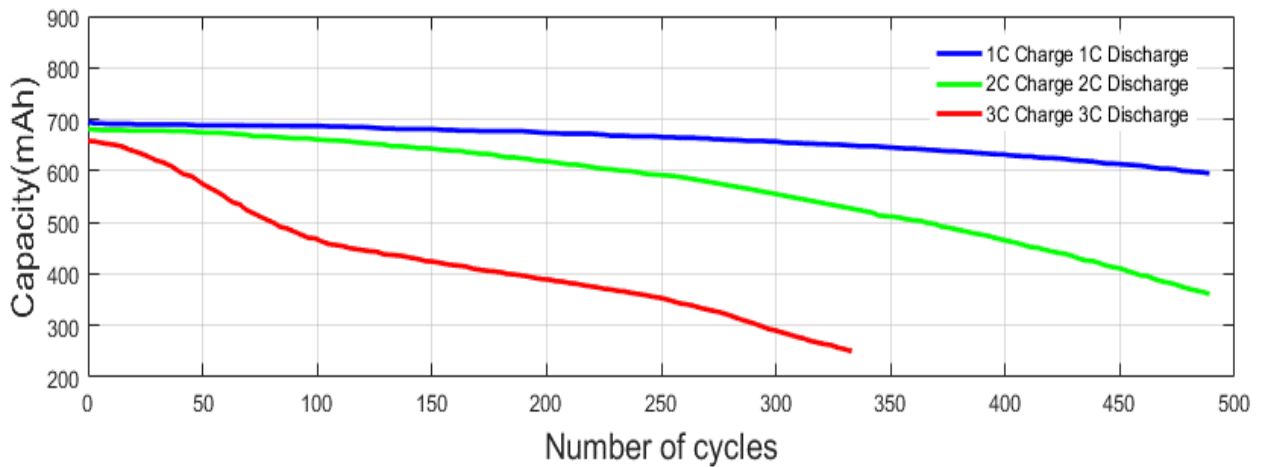


Рис. 1.2. Крива залежності ємності акумулятора від кількості циклів за різних показників струму розряду.

[https://www.researchgate.net/figure/Battery-capacity-versus-number-of-cycles-curve-under-different-rates_fig3_317107750]

Фактори, що впливають на ємність

- Тип акумулятора: Різні типи акумуляторів (літій-іонні, нікель-металгідридні, свинцево-кислотні) мають різну енергетичну щільність, тобто різну кількість енергії, яку вони можуть зберігати в одиниці об'єму або маси.
- Розмір акумулятора: Як правило, чим більший акумулятор, тим більша його ємність.
- Матеріали електродів: Від матеріалу електродів залежить, скільки іонів може бути в них вбудовано і вилучено, що впливає на ємність.
- Температура: Низькі та високі температури можуть знизити ємність акумулятора.

Отже, ємність акумулятора – це важлива характеристика, яка визначає його можливості. При виборі акумулятора для будь-якого пристрою необхідно враховувати саме цю характеристику, щоб забезпечити необхідний час роботи.

Напруга акумулятора – це одна з найважливіших його характеристик. Вона показує різницю потенціалів між позитивним і негативним електродами акумулятора і вимірюється у вольтах (В).

Напруга на акумуляторі залежить від кількох основних факторів, пов'язаних із його конструкцією, матеріалами, станом заряду та умовами експлуатації. Розглянемо більш детально фактори від яких залежить напруга на комірці акумулятора.

1. Хімічний склад. Напруга визначається електрохімічним потенціалом матеріалів, використаних для електродів та електроліту.

2. Стан заряду (SoC, State of Charge). Повністю заряджений акумулятор має максимальну напругу, характерну для його типу (наприклад, 4.2 В для літій-іонного). Розряджений акумулятор має мінімальну безпечну напругу (наприклад, 2.5 В для літій-іонного). Приклад, залежності напруги на затискачах акумулятора від стану заряду наведений в табл. 1.1 та проілюстрований графіком рис. 1.3.

Таблиця 1.1. Таблиця стану напруги Lifepo4 акумулятора [1]

Стан заряду (SOC)	12 В Напруга акумулятора (В)	3,2 В Напруга акумулятора (В)
100% допуск	14,6 В	3,65 В
90%	13,4 В	3,35 В
80%	13,28 В	3,32 В
70%	13,2 В	3,3 В
60%	13,08 В	3,27 В
50%	13,04 В	3,26 В
40%	13В	3,25 В
30%	12,88 В	3,22 В
20%	12,8 В	3,20 В
10%	12В	3,00В
0%	10В	2,50 В

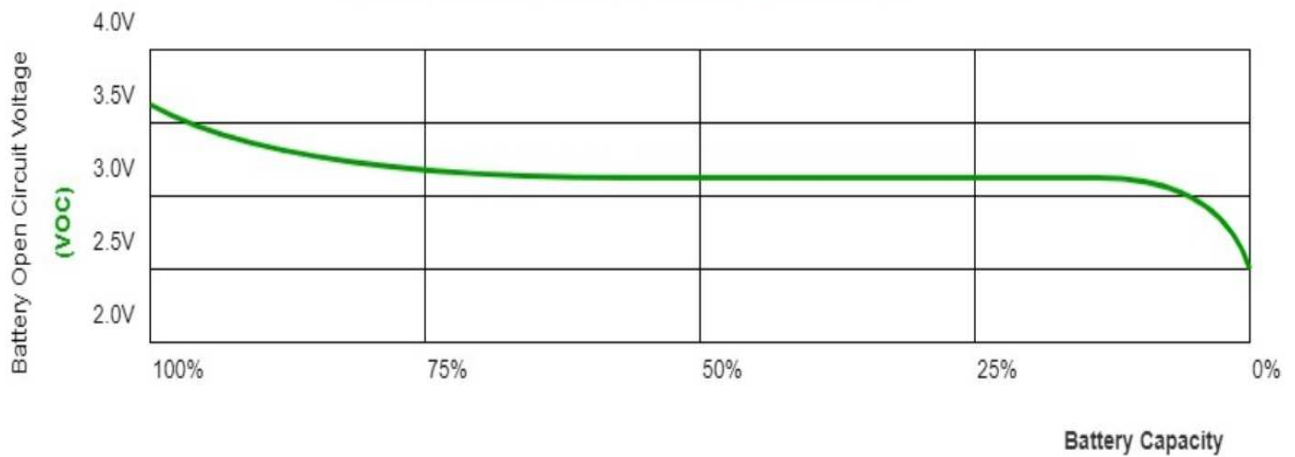


Рис. 1.3. Крива залежності напруги на комірці акумулятора від ступеня заряду [1].

3. Струм навантаження. При підключенні навантаження напруга може знижуватися через внутрішній опір акумулятора. Чим вищий струм навантаження, тим більше напруга зменшується. Це явище називається просадкою напруги.

4. Температура. При зниженні температури хімічні реакції всередині акумулятора сповільнюються. Це призводить до зниження внутрішнього опору акумулятора, але одночасно і до зниження його ємності. Як результат, напруга під навантаженням може різко падати, особливо при великих струмах розряду. При підвищенні температури хімічні реакції всередині акумулятора прискорюються. Це може призвести до підвищення саморозряду, скорочення терміну служби акумулятора і навіть до його перегріву та пошкодження. Максимальна напруга при високих температурах може бути дещо нижчою, ніж при оптимальній температурі. Залежність розрядної напруги від температури проілюстрована графіком наведеним на рис. 1.4.

5. Внутрішній опір акумулятора. Зі старінням або внаслідок пошкоджень внутрішній опір зростає, що зменшує напругу під час навантаження. Нові акумулятори зазвичай мають нижчий опір, що забезпечує стабільну напругу.

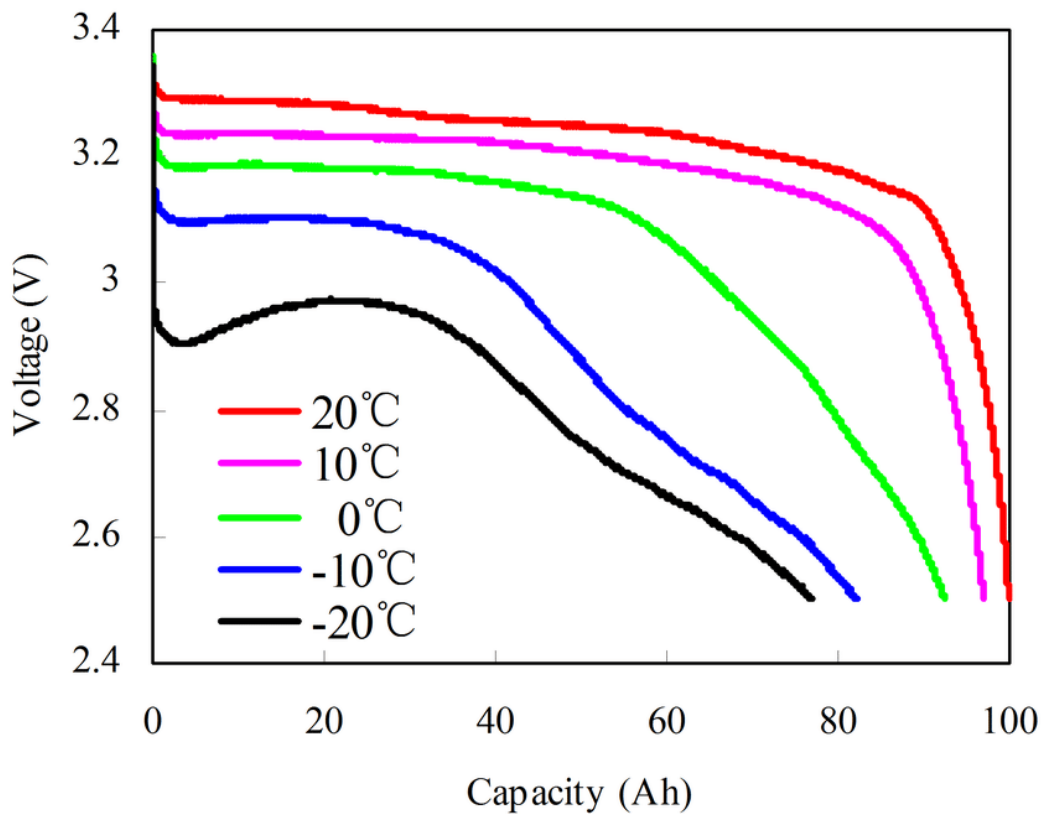


Рис. 1.4. Криві розрядної напруги при різних температурах для LiFePO₄ акумулятора [2].

6. Кількість комірок (для багатокоміркових акумуляторів). Загальна напруга акумулятора залежить від кількості послідовно з'єднаних комірок. Наприклад, акумулятор із 3 послідовними літій-іонними комірками матиме номінальну напругу близько 11,1 В ($3,7 \text{ В} \times 3$).

7. Режим експлуатації. Тривале перевантаження струмом або перезарядження може вплинути на стабільність напруги та призвести до її зменшення через деградацію акумулятора.

Типи напруги акумулятора

Номінальна напруга. Це стандартна напруга, яку виробник зазначає для даного типу акумулятора. Вона залежить від хімічного складу речовин застосованих в конкретному типі акумулятора, або як кажуть від «хімії» акумулятора. Приклади номінальної напруги різних типів акумуляторів (однієї комірки):

– Літій-іонні акумулятори: 3.7 В

- Свинцево-кислотні акумулятори: 2 В
- Нікель-метал-гідридні (NiMH) та нікель-кадмієві (NiCd): 1.2 В
- Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄): 3.2 В

Максимальна напруга акумулятора – це найвище значення напруги, яке акумулятор може видати при повній зарядці. Це важлива характеристика, яка залежить від типу акумулятора, його розміру та інших факторів. Як правило, напруга на акумуляторі залежить від стану його заряду або розряду, і найбільше значення спостерігається при повністю зарядженому стані. Приклади максимальної напруги різних типів акумуляторів (однієї комірки) наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Максимальна напруга для основних типів акумуляторів

Тип акумулятора	Максимальна напруга (В)
Літій-іонний (Li-ion)	4,2 В
Літій-полімерний (Li-Po)	4,2 В
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	3,65 В
Свинцево-кислотний (Pb)	2,3–2,4 В на одну комірку (14,4 В для 12В акумулятора)
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	1,4–1,45 В
Нікель-кадмієвий (NiCd)	1,4–1,45 В
Літій-сірчаний (Li-S)	2,6–2,7 В
Натрій-іонний (Na-ion)	3,6–3,7 В

Мінімальна напруга акумулятора – це найнижча допустима напруга, до якої можна розрядити акумулятор без ризику його пошкодження або значного скорочення терміну служби. Цей параметр залежить від типу акумулятора та його хімічного складу.

Глибокий розряд (нижче мінімальної напруги) може призвести до необоротних хімічних змін в електродах, зменшення ємності або навіть повної несправності літієвих акумуляторів. Тривалий глибокий розряд викликає сульфатацію пластин в свинцево-кислотних акумуляторах, що зменшує ефективність та термін служби. Нікелеві акумулятори (NiMH, NiCd)

витримують глибокий розряд краще, але тривале перебування у такому стані призводить до зниження ємності.

Приклади мінімальної напруги для різних типів акумуляторів (однієї комірки) наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Мінімально допустима напруга розрядження для основних типів акумуляторів

Тип акумулятора	Мінімальна напруга (В)	Примітка
Літій-іонний (Li-ion)	2,5–3,0 В	Розрядка нижче 2,5 В може призвести до деградації.
Літій-полімерний (Li-Po)	2,7–3,0 В	Чутливі до глибокого розряду.
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	2,0 В	Нижчий поріг безпечний завдяки стабільній хімії.
Свинцево-кислотний (Pb)	1,8–1,9 В	Для 12 В акумулятора це близько 10,8–11,4 В.
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	0,9–1,0 В	Відновлення можливе, але тривалий розряд шкідливий.
Нікель-кадмієвий (NiCd)	0,9–1,0 В	Довше витримують глибокий розряд.
Літій-сірчаний (Li-S)	1,8–2,0 В	Нижча напруга може пошкодити електроди.
Натрій-іонний (Na-ion)	–	–

Внутрішній опір акумулятора – це опір, який створюється всередині акумулятора при проходженні електричного струму через його електроди, електроліт і внутрішні з'єднання. Цей параметр впливає на продуктивність, ефективність і теплові характеристики акумулятора.

Внутрішній опір ($R_{\text{внут}}$ – це сумарний опір, який включає:

1. Омічний опір: Викликаний провідністю матеріалів електродів і електроліту.

2. Активний опір: Виникає через хімічні процеси при зарядці/розрядці акумулятора.

3. Поляризаційний опір: Залежить від утворення іонних шарів на електродах.

Фактори, що впливають на внутрішній опір.

– Температура. Низька температура збільшує внутрішній опір, уповільнюючи хімічні реакції. Висока температура зменшує опір, але прискорює деградацію.

– Хімічний склад. Різні типи акумуляторів мають характерні значення опору.

– Стан заряду. У сильно розрядженому акумуляторі опір зростає.

– Старіння. Внутрішній опір зростає з часом через утворення відкладень і деградацію матеріалів.

Вплив внутрішнього опору на акумулятор.

1. Просадка напруги. Під час розрядки через внутрішній опір знижується вихідна напруга:

$$U_{\text{вих}} = E - R_{\text{внут}} I,$$

де I – струм навантаження.

2. Нагрівання. При великому струмі значна частина енергії розсіюється у вигляді тепла:

$$P = I^2 R_{\text{внут}}.$$

3. Ефективність. Чим вищий внутрішній опір, тим більше енергії втрачається всередині акумулятора, зменшуючи ККД.

4. Старіння. З часом внутрішній опір збільшується через деградацію електродів та електроліту, що знижує потужність і ємність.

Енергетична щільність акумулятора – це показник, що характеризує кількість енергії, яку акумулятор може зберігати відносно його ваги або об'єму. Вона є ключовим параметром при виборі акумуляторів для різних застосувань, таких як електромобілі, портативні пристрої чи стаціонарні енергосистеми.

Розрізняють два види енергетичної щільності акумуляторних батарей:

1. *Гравіметрична енергетична щільність $E_{\text{грав}}$ (Wh/kg):* Кількість енергії, яку акумулятор може зберігати відносно його ваги.

$$E_{\text{грав}} = E_{\text{заг}}/m,$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальна енергія накопичена в акумуляторній батареї,

m – маса акумуляторної батареї.

2. *Об'ємна енергетична щільність (Wh/L):* Кількість енергії відносно об'єму акумулятора.

$$E_{\text{об}} = E_{\text{заг}}/V,$$

де V – об'єм акумуляторної батареї.

Типові значення різної енергетичної щільності для різних типів акумуляторів наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4. Значення енергетичної щільності для різних типів акумуляторів

Тип акумулятора	$E_{\text{грав}}$ (Wh/kg)	$E_{\text{об}}$ (Wh/L)	Примітки
Літій-іонний (Li-ion)	150–250	250–680	Найбільш поширений у портативних пристроях.
Літій-полімерний (Li-Po)	200–300	350–700	Покращена гнучкість у форм-факторі.
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	90–150	220–350	Висока безпека, нижча щільність.
Свинцево-кислотний	30–50	80–100	Підходить для стаціонарного використання.
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	60–120	140–300	Використовується в гібридних авто.
Нікель-кадмієвий (NiCd)	40–60	100–150	Стійкий до екстремальних температур.
Літій-сірчаний (Li-S)	300–500	500–600	Перспективна технологія для авіації.
Твердотільний (Solid-state)	400–500	700–1000	Розробляється як майбутня альтернатива.

Перерахуємо фактори які впливають на енергетичну щільність акумуляторів.

1. *Хімічний склад*: Різні типи акумуляторів мають різні реакції іонів у електроліті, що впливає на енергетичну щільність.
2. *Матеріали електродів*: Використання легких і ефективних матеріалів, таких як літій або вуглецеві наноструктури, підвищує щільність.
3. *Форм-фактор*: Компактніші та тонші конструкції забезпечують вищу об'ємну щільність.
4. *Температура*: Оптимальні температурні умови дозволяють зберігати максимальну енергоємність.
5. *Старіння*: Зі зношенням акумулятора щільність знижується через втрату активного матеріалу.

Потужність акумулятора – це здатність акумулятора забезпечувати певний рівень електричної енергії за одиницю часу. Вона характеризує, наскільки швидко акумулятор може віддавати або приймати енергію при розрядці або зарядці.

Потужність акумулятора можна визначити за відомою формулою:

$$P = U \cdot I,$$

де: P – потужність (Вт, W),

U – напруга акумулятора (В, V),

I – сила струму (А, A).

Розрізняють наступні типи потужності акумуляторів

1. *Миттєва потужність*: Це потужність, яку акумулятор може забезпечувати у конкретний момент часу. Залежить від струму навантаження і напруги.

2. *Максимальна потужність*: Це найбільша потужність, яку акумулятор може віддати протягом короткого часу без пошкодження. Вона обмежується внутрішнім опором і тепловими характеристиками.

3. *Середня потужність*: Потужність, яку акумулятор може стабільно віддавати протягом тривалого періоду.

Потужність акумулятора буде залежати від наступних факторів

1. *Внутрішній опір*: Чим нижчий опір, тим більша потужність, оскільки менше енергії втрачається на нагрівання.
2. *Тип акумулятора*: Різні хімічні системи мають різну здатність до швидкого віддавання енергії:
 - о Літій-іонні акумулятори мають високу потужність завдяки низькому внутрішньому опору.
 - о Свинцево-кислотні акумулятори мають нижчу потужність через більший опір.
3. *Температура*: При низьких температурах хімічні реакції уповільнюються, зменшуючи потужність.
4. *Стан заряду*: Максимальна потужність досягається при середньому рівні заряду (50–80%).
5. *Старіння*: З часом потужність зменшується через деградацію активних матеріалів і збільшення внутрішнього опору.

Приклади максимальної потужності для різних типів акумуляторів наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5. Типові значення максимальної потужності різних акумуляторів

Тип акумулятора	Потужність	Примітки
Літій-іонний (Li-ion)	Від 100 Вт до кількох кіловат	Використовується у смартфонах, ноутбуках, авто.
Свинцево-кислотний	Від 500 Вт до кількох десятків кіловат	Часто застосовується у стартерних системах авто.
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	До 5–10 кВт	Висока потужність, підходить для електротранспорту.
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	Декілька сотень ват	Застосовуються у гібридних авто.

Циклічність акумулятора – це показник, що відображає кількість повних циклів зарядки та розрядки, які акумулятор може витримати протягом свого терміну служби без значного зниження продуктивності. Цей параметр є ключовим для визначення довговічності акумулятора.

Один повний цикл заряду-розряду це заряд акумулятора від 0% до 100% і розряд назад до 0%. При цьому часткові розряди (наприклад, від 50% до 100%) також враховуються. Два таких розряди можуть сумарно утворити один повний цикл.

Циклічність різних типів розповсюджених акумуляторів наведена в табл. 1.6.

Таблиця 1.6. Циклічність різних типів акумуляторів

Тип акумулятора	Середня кількість циклів	Примітки
Літій-іонний (Li-ion)	300–1500	Залежить від умов використання і хімічного складу.
Літій-полімерний (Li-Po)	500–1000	Використовується у смартфонах і дронах.
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	2000–5000	Найбільш довговічний серед літєвих акумуляторів.
Свинцево-кислотний	200–500	Часто застосовується в автомобілях і стаціонарних системах.
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	500–1000	Використовується в побутових пристроях.
Нікель-кадмієвий (NiCd)	1000–1500	Стійкий до глибоких розрядів.

Фактори, що впливають на циклічність акумуляторів:

1. Глибина розряду (DoD): Чим більша глибина розряду (глибокі розряди до 0%), тим швидше знижується кількість циклів.
 - о Розряд на 100% – максимальне зношення.
 - о Розряд на 50% – значно збільшує тривалість життя.
2. Температура:

- о Висока температура прискорює деградацію матеріалів акумулятора.
 - о Низька температура знижує ефективність і також може пошкоджувати акумулятор.
3. Перевантаження: Частий заряд вище рекомендованої напруги або перевищення струму розрядки скорочують ресурс.
 4. Старіння: Навіть без активного використання акумулятор деградує з часом через хімічні процеси.
 5. Хімічний склад: Наприклад, літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO_4) мають більшу циклічність завдяки стабільності електродів.

Циклічність визначає, коли ємність акумулятора знижується до певного рівня. Зазвичай акумулятор вважається відпрацьованим, коли його ємність падає до 70–80% від номінальної.

Способи збільшення циклічності акумуляторів:

1. Уникати глибоких розрядів: Підтримуйте рівень заряду у межах до 20–80%.
2. Не допускати перезарядки: Використовуйте якісні зарядні пристрої з обмеженням напруги.
3. Контролювати температуру: Уникати нагрівання і експлуатації при надто низьких температурах.
4. Зберігання: Якщо акумулятор не використовується, зберігайте його при 40–60% заряду і температурі 15–25°C.
5. Використовувати циклічні режими зарядки: Для деяких акумуляторів, як-от нікель-кадмієві, періодичне повне розрядження допомагає уникнути «ефекту пам'яті».

Циклічність є важливим параметром при виборі акумуляторів, що безпосередньо впливає на їх ефективність, довговічність і економічність.

Термін служби акумулятора – це період часу, протягом якого акумулятор зберігає свою ефективність і працездатність до моменту, коли його характеристики (наприклад, ємність або потужність) знижуються до

неприйняттого рівня. Зазвичай цей рівень становить 70–80% від початкової ємності.

Фактори, які визначають термін служби акумулятора:

1. Кількість циклів зарядки-розрядки: Визначається циклічністю акумулятора. Більшість акумуляторів мають обмежену кількість повних циклів, після чого їх продуктивність починає суттєво знижуватися.
2. Календарне старіння: Навіть без активного використання акумулятор деградує через хімічні реакції всередині. Це пов'язано з окисленням електродів, розкладанням електроліту та іншими факторами.
3. Температура:
 - о Висока температура прискорює хімічні процеси, що призводить до більш швидкого зношення.
 - о Низька температура знижує ефективність і може пошкодити структуру акумулятора.
4. Глибина розряду (DoD): Глибокі розряди (до 0%) значно зменшують термін служби акумулятора. Часткові розряди (наприклад, до 50%) зберігають його довговічність.
5. Перевантаження і перезарядка: Часте перевищення допустимої напруги або струму скорочує термін служби.
6. Тип акумулятора: Різні хімічні склади мають різний термін служби. Наприклад, літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори служать довше, ніж звичайні літій-іонні.

Типові значення терміну служби акумуляторів різних типів наведено в табл. 1.7.

Ознаки зниження терміну служби

1. Зменшення ємності: Акумулятор не тримає заряд так довго, як раніше.
2. Падіння напруги: Під час роботи напруга швидко знижується.
3. Перегрів: Акумулятор нагрівається сильніше, ніж зазвичай, при зарядці або розрядці.

4. Збільшення внутрішнього опору: Знижується максимальна потужність, яку акумулятор може віддати.

Таблиця 1.7. Термін служби різних типів акумуляторів

Тип акумулятора	Середній термін служби	Примітки
Літій-іонний (Li-ion)	2–5 років (300–1500 циклів)	Використовується у смартфонах, ноутбуках, авто.
Літій-полімерний (Li-Po)	3–5 років (500–1000 циклів)	Часто застосовується в портативних пристроях.
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	5–10 років (2000–5000 циклів)	Підходить для електротранспорту, стаціонарних систем.
Свинцево-кислотний	3–6 років (200–500 циклів)	Застосовується в автомобілях і резервному живленні.
Нікель-метал-гідридний (NiMH)	5–7 років (500–1000 циклів)	Використовується у побутовій техніці.
Нікель-кадмієвий (NiCd)	10–15 років (1000–1500 циклів)	Може працювати в екстремальних умовах.

1.3. Фактори, що впливають на роботу акумуляторів.

На роботу акумуляторів впливають численні фактори, що визначають їх продуктивність, довговічність і ефективність. Ці фактори можна поділити на зовнішні (умови експлуатації) та внутрішні (особливості конструкції і хімічного складу).

1. Внутрішні фактори

1.1 *Хімічний склад.* Літій-іонні акумулятори мають високу енергетичну щільність, але чутливі до температур і режимів зарядки. Свинцево-кислотні акумулятори більш стійкі до перевантажень, але мають меншу енергетичну щільність і короткий термін служби. Нікель-метал-гідридні (NiMH) акумулятори характеризуються помірною енергетичною щільністю та більшою витривалістю до глибоких розрядів.

1.2 Внутрішній опір. Високий внутрішній опір призводить до збільшення втрат енергії на нагрівання, зменшення ефективності та потужності. З часом внутрішній опір збільшується через деградацію матеріалів електродів.

1.3 Рівень заряду. Занадто низький або високий заряд прискорює деградацію. Рекомендується підтримувати рівень заряду у межах 20–80% для більшості літій-іонних акумуляторів.

1.4 Рівномірність хімічних реакцій. Нерівномірний розподіл активних матеріалів або електроліту може знижувати ємність і ефективність акумулятора.

2. Зовнішні фактори

2.1 Температура. Висока температура: прискорює хімічні реакції, викликаючи деградацію матеріалів, може спричиняти перегрівання і вихід акумулятора з ладу. Низька температура: уповільнює хімічні процеси, знижуючи ємність і потужність, при екстремальних морозах може викликати пошкодження електроліту.

2.2 Струм зарядки і розрядки. Занадто високий струм може викликати нагрівання і швидке зношення акумулятора. Занадто низький струм зарядки може бути неефективним і сприяти утворенню пасивних шарів на електродах.

2.3 Глибина розряду (DoD.) Глибокі розряди скорочують термін служби акумулятора, особливо для літій-іонних і свинцево-кислотних типів.

2.4 Частота циклів. Чим частіше акумулятор заряджається і розряджається, тим швидше зменшується його ємність.

2.5 Умови зберігання. Зберігання в зарядженому стані або при високих температурах сприяє деградації. Для тривалого зберігання рекомендується частковий заряд (40–60%) і прохолодне місце.

3. Експлуатаційні фактори

3.1 Тип навантаження. Рівномірне навантаження менш шкідливе для акумулятора, ніж часті пікові стрибки потужності.

3.2 Зарядні пристрої. Низькоякісні зарядні пристрої можуть подавати нестабільну напругу, викликаючи перевантаження або перезарядку.

3.3 Експлуатація в несприятливих умовах. Вібрація, удари, забруднення можуть пошкодити акумулятор або викликати коротке замикання.

3.4 Вік акумулятора. Навіть при мінімальному використанні акумулятор деградує через хімічне старіння. Це називається календарне старіння.

4. Технологічні фактори.

4.1 Контролери заряду. Високоякісні акумулятори оснащуються BMS (Battery Management System), яка контролює напругу, температуру і рівень заряду, зменшуючи ризик пошкодження.

4.2 Захист від перезарядки і короткого замикання. Системи захисту запобігають критичним умовам роботи, продовжуючи термін служби акумулятора.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ АКУМУЛЯТОРІВ

2.1. Свинцево-кислотні акумулятори

Свинцево-кислотні акумулятори – це один з найстаріших і найпоширеніших типів акумуляторів, який використовується у багатьох сферах, включаючи автомобільну промисловість, енергетичні системи та інші пристрої, що потребують резервного живлення. Їхній принцип роботи заснований на хімічних реакціях між свинцевими пластинами та сірчаною кислотою в електроліті.

Основні типи свинцево-кислотних акумуляторів:

1. Стартерні акумулятори (SLA)

- Використовуються в автомобілях для запуску двигунів.
- Мають великий струм розряду на короткий період часу.
- Містять розчини сірчаної кислоти як електроліт.

Конструкція свинцево-кислотного стартерного акумулятора зображена на рис. 2.1.

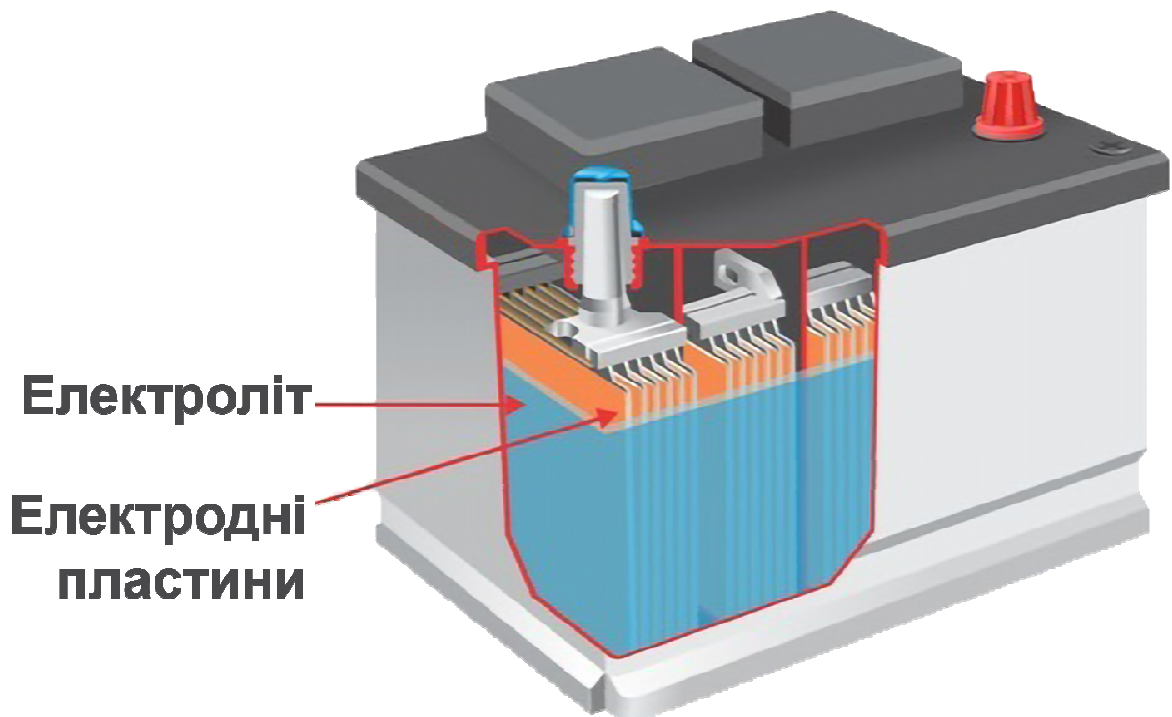


Рис. 2.1. Будова свинцево-кислотного акумулятора [3].

2. Гелеві акумулятори

- о Вони мають гелевий електроліт, що робить їх менш схильними до витоків і більш стійкими до вібрацій.
- о Використовуються для спеціалізованих застосувань, таких як резервні джерела живлення.

3. Відкриті (Flooded) акумулятори

- о Найбільш поширені свинцево-кислотні акумулятори, в яких електроліт знаходиться у рідкому вигляді.
- о Вимагають регулярного обслуговування (додавання води).

4. Запечатані акумулятори (VRLA)

- о Розроблені для забезпечення герметичності, що дозволяє уникати витоків електроліту.
- о Зазвичай використовуються в резервних джерелах живлення.

5. Акумулятори AGM (Absorbent Glass Mat) типу – це спеціальний тип свинцево-кислотних акумуляторів, який використовує абсорбовану в скловолоконній маті кислоту, що забезпечує певні переваги порівняно з традиційними свинцево-кислотними акумуляторами. AGM акумулятори відносяться до класу VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) – свинцево-кислотних акумуляторів з герметичним корпусом, що має клапан для регулювання тиску.

- о Розроблені для забезпечення герметичності, що дозволяє уникати витоків електроліту.
- о Зазвичай використовуються в резервних джерелах живлення.

Конструкція свинцево-кислотного AGM акумулятора зображена на рис. 2.2.

Свинцево-кислотний акумулятор складається з кількох основних компонентів:

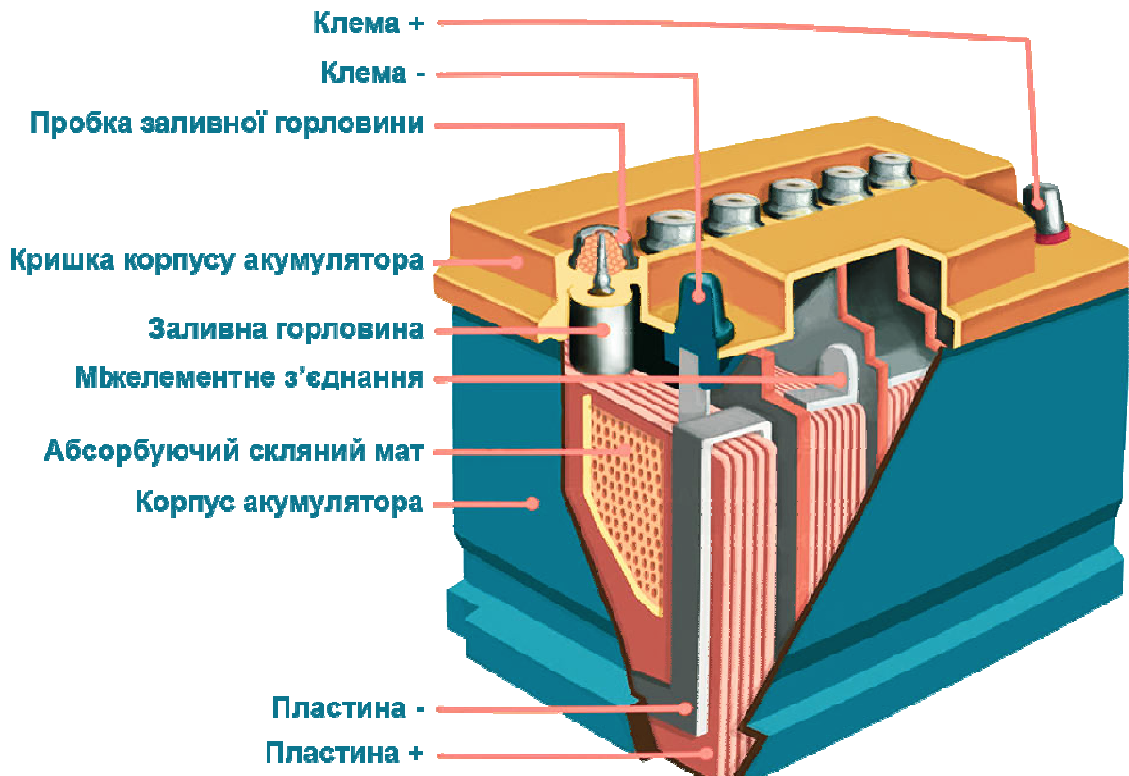


Рис. 2.2. Будова свинцево-кислотного AGM акумулятора [3].

- *Свинцеві пластини:* Активний матеріал, який бере участь у хімічних реакціях. Зазвичай вони складаються з свинцю або свинцевих сплавів.
- *Електроліт:* Сірчана кислота (H_2SO_4) у водному розчині, яка забезпечує іонний рух між пластинами.
- *Конектори та корпус:* Механічна частина акумулятора, яка утримує всі компоненти разом і забезпечує ізоляцію.

Принцип роботи свинцево-кислотного акумулятора полягає в наступному.

Зарядка: Під час зарядки акумулятора електричний струм змушує іони водню (H^+) рухатись до свинцевих пластин, відновлюючи свинець та утворюючи сірчану кислоту. На позитивних пластинах утворюється сірчаноокислий свинець (PbSO_4), а на негативних пластинах – свинець (Pb).

Розрядка: Під час розрядки зворотній процес: сірчаноокислий свинець на пластинах реагує з водою, виділяючи електрони і утворюючи свинець та сірчану кислоту.

Переваги свинцево-кислотних акумуляторів

1. *Низька вартість:* Вони є дешевшими порівняно з іншими типами акумуляторів, що робить їх доступними для широкого кола застосувань.
2. *Високий струм розряду:* Свинцево-кислотні акумулятори здатні видавати високі пікові струми, що важливо для автомобілів та інших пристроїв, де необхідно швидко почати роботу.
3. *Зріла технологія:* Вони мають добре вивчену технологію і широко застосовуються в різних галузях.
4. *Широка доступність:* Їх можна знайти практично в будь-яких магазинах акумуляторів та запчастин.

Недоліки свинцево-кислотних акумуляторів

1. *Короткий термін служби:* Порівняно з іншими типами акумуляторів, свинцево-кислотні акумулятори мають менший термін служби і більш схильні до зносу, особливо при глибоких розрядах.
2. *Велика вага:* Свинцево-кислотні акумулятори значно важчі, ніж літієві або інші сучасні акумулятори, що обмежує їх застосування у легких пристроях.
3. *Екологічні проблеми:* Викиди свинцю і кислоти в навколишнє середовище можуть бути токсичними. Тому необхідно правильне утилізування акумуляторів після їх використання.
4. *Низька енергетична щільність:* Вони мають меншу енергетичну щільність у порівнянні з літій-іонними акумуляторами, що означає більший розмір і вагу при однаковій ємності.

Застосування свинцево-кислотних акумуляторів

1. *Автомобілі:* Свинцево-кислотні акумулятори використовуються в основному для запуску двигунів автомобілів, мотоциклів та іншої техніки.
2. *Системи резервного живлення (UPS):* Використовуються для забезпечення безперервної роботи пристроїв у разі відключення електроенергії.

3. *Енергетичні станції та зв'язок:* Вони використовуються як частина джерел безперебійного живлення для телекомунікаційних систем та електричних мереж.

4. *Електричні транспортні засоби:* Свинцево-кислотні акумулятори можуть бути використані в електричних велосипедах, скутерах, машинах для чистки та інших транспортних засобах.

Технічні характеристики свинцево-кислотних акумуляторів

Напруга: 2 В на елемент, для більшості застосувань акумулятори з'єднуються в серії для отримання напруги 6 В або 12 В.

Ємність: Зазвичай коливається від 7 до 200+ ампер-годин, в залежності від застосування.

Термін служби: Зазвичай 3–5 років при належному догляді, але може бути коротшим при інтенсивній експлуатації або в умовах частих глибоких розрядів.

Свинцево-кислотні акумулятори це надійні, перевірені часом елементи живлення, які мають багато переваг у певних застосуваннях, але їхні недоліки вимагають уваги та обережності в експлуатації.

2.2. Нікель-кадмієві акумулятори

Нікель-кадмієві акумулятори (NiCd) – це тип акумуляторів, що використовує два основних компоненти: нікель (Ni) для позитивного електрода та кадмій (Cd) для негативного. Цей тип акумулятора був дуже популярним у другій половині 20-го століття завдяки своїй надійності та хорошій здатності до розряду при високих струмах. Однак із часом були виявлені деякі недоліки, які призвели до зменшення їх використання в порівнянні з новішими типами акумуляторів.

Конструкція нікель-кадмієвого акумулятора зображена на рис. 2.3.

Конструкція нікель-кадмієвого акумулятора:

1. *Позитивний електрод (анод).* Використовує нікелеві з'єднання, зазвичай гідроксид нікелю (Ni(OH)_2).



Рис. 2.3. Внутрішня будова нікель-кадмієвого акумулятора [4]

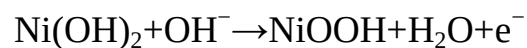
2. *Негативний електрод (катод)*. Використовує кадмій або його з'єднання, зазвичай гідроксид кадмію ($\text{Cd}(\text{OH})_2$).

3. *Електроліт*. Зазвичай розчин їдкого калію (KOH), який забезпечує іонний рух між позитивним і негативним електродами.

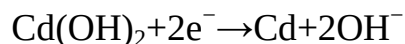
Принцип роботи лягає в наступному.

Процеси при заряджанні

1. На позитивному електроді (анод). Гідроксид нікелю ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) перетворюється на оксид нікелю (NiOOH) з вивільненням електронів.



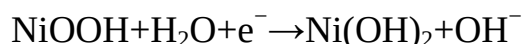
2. На негативному електроді (катод). Гідроксид кадмію ($\text{Cd}(\text{OH})_2$) перетворюється на металевий кадмій (Cd), поглинаючи електрони.



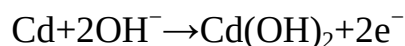
3. Електроліт. Розчин їдкого калію (KOH) сприяє руху іонів OH^- між електродами.

Процеси при розряді

1. На позитивному електроді (анод). Оксид нікелю (NiOOH) перетворюється на гідроксид нікелю ($\text{Ni}(\text{OH})_2$), поглинаючи іони OH^- .



2. На негативному електроді (катод). Металевий кадмій (Cd) перетворюється на гідроксид кадмію ($\text{Cd}(\text{OH})_2$), вивільняючи іони OH^- .



3. Електроліт. В процесі розряду електроліт залишається практично незмінним, оскільки реакції відбуваються з іонами OH^- , які постійно циркулюють між електродами.

Резюме електрохімічних реакцій

При *заряджанні*: Нікель окислюється, кадмій відновлюється.

При *розряді*: Нікель відновлюється, кадмій окислюється.

Переваги нікель-кадмієвих акумуляторів

1. *Стійкість до глибоких розрядів*. NiCd акумулятори можуть витримувати глибокі розряди без значної втрати ємності, що робить їх ідеальними для застосувань, де потрібно використовувати більшу частину заряду.

2. *Високий струм розряду*. Вони здатні витримувати високі струми розряду, що робить їх підходящими для застосувань, де потрібен великий пік потужності, наприклад, в інструментах та транспортних засобах.

3. *Широкий температурний діапазон*. NiCd акумулятори працюють ефективно в досить широкому температурному діапазоні (від -20°C до $+60^\circ\text{C}$), що робить їх корисними в екстремальних умовах.

4. *Велика кількість циклів заряджання/розряджання.* Вони можуть витримати багато циклів заряджання та розряджання (до 1000 або більше), що робить їх довговічними у порівнянні з іншими типами акумуляторів.

5. *Можливість швидкої зарядки.* Нікель-кадмієві акумулятори можуть бути швидко заряджені за допомогою спеціальних зарядних пристроїв.

Недоліки нікель-кадмієвих акумуляторів

1. *Ефект пам'яті.* Один з основних недоліків NiCd акумуляторів – це явище, відоме як ефект пам'яті. Якщо акумулятор часто не заряджається до повного рівня або розряджається лише частково, він може "запам'ятовувати" цей рівень і почати втрачати здатність до повного заряджання. Це зменшує їх ефективність і ємність.

2. *Токсичність кадмію.* Кадмій є токсичним металом, тому неправильне утилізування цих акумуляторів може призвести до забруднення навколишнього середовища. Це є серйозною проблемою для екології.

3. *Менша енергетична щільність.* У порівнянні з більш сучасними акумуляторами, такими як літій-іонні або літій-полімерні, нікель-кадмієві акумулятори мають меншу енергетичну щільність, що означає, що вони займають більше місця і важать більше для досягнення тієї ж ємності.

4. *Вища вартість.* Вони можуть бути дорожчими за інші типи акумуляторів через використання кадмію та потребу в спеціальному обслуговуванні.

Застосування нікель-кадмієвих акумуляторів

1. *Портативні електричні інструменти.* Нікель-кадмієві акумулятори часто використовуються в акумуляторних дрилях, шуруповертах, пилах та інших інструментах, які потребують високих пускових струмів і можуть витримувати часті цикли заряджання та розряджання.

2. *Мобільні телефони та портативна електроніка.* Раніше NiCd акумулятори були широко використані в мобільних телефонах і портативних пристроях, але зараз їх поступово замінюють літій-іонні батареї.

3. *Автомобільні стартери та резервні системи.* Нікель-кадмієві акумулятори також можуть використовуватися в автомобільних стартерних системах та для живлення резервних джерел безперебійного живлення (UPS).

4. *Космічні технології.* Завдяки їх здатності працювати в екстремальних умовах, такі акумулятори використовуються в космічних місіях.

5. *Системи зберігання енергії в енергетичних мережах.* Використовуються для стабілізації енергосистем, де потрібні швидкі та потужні цикли заряду/розряду.

Технічні характеристики нікель-кадмієвих акумуляторів

Напруга: Зазвичай 1,2 В на елемент.

Ємність: Зазвичай від 600 мА·год до 2000 мА·год на елемент.

Температурний діапазон: Зазвичай від -20°C до +60°C.

Циклічність: Можуть витримати до 1000–1500 циклів зарядки/розрядки при правильному догляді.

Час зарядки: Зазвичай 1–2 години для стандартних моделей.

Як уникнути ефекту «пам'яті» та продовжити термін служби акумуляторів NiCd.

1. *Регулярний повний розряд.* Для того щоб запобігти ефекту пам'яті, важливо періодично повністю розряджати акумулятор перед тим, як знову його заряджати.

2. *Правильне зберігання.* Зберігайте акумулятори в прохолодному та сухому місці, щоб запобігти їх деградації.

3. *Заряджати до повного рівня.* Заряджати акумулятори до повного рівня, щоб забезпечити максимальний термін служби.

Отже, нікель-кадмієві акумулятори, хоча і мають певні недоліки, такі як ефект пам'яті та токсичність кадмію, все ще мають свої переваги, зокрема

високу стійкість до глибоких розрядів, хорошу здатність до високих пускових струмів і довгий термін служби в умовах інтенсивного використання. Однак на сьогодні вони поступово витісняються більш сучасними і безпечними технологіями, такими як літій-іонні акумулятори.

2.3. Нікель-металгідридні акумулятори

Нікель-металгідридні акумулятори – це популярний тип акумуляторів, який використовує позитивний електрод із гідроксиду нікелю (Ni(OH)_2) і негативний електрод із металевих сплавів, що здатні накопичувати водень у формі металогідриду. Вони є вдосконаленим аналогом нікель-кадмієвих акумуляторів, але не містять токсичного кадмію і мають більшу енергетичну щільність.

Конструкція нікель-металгідридного акумулятора (рис. 2.4).

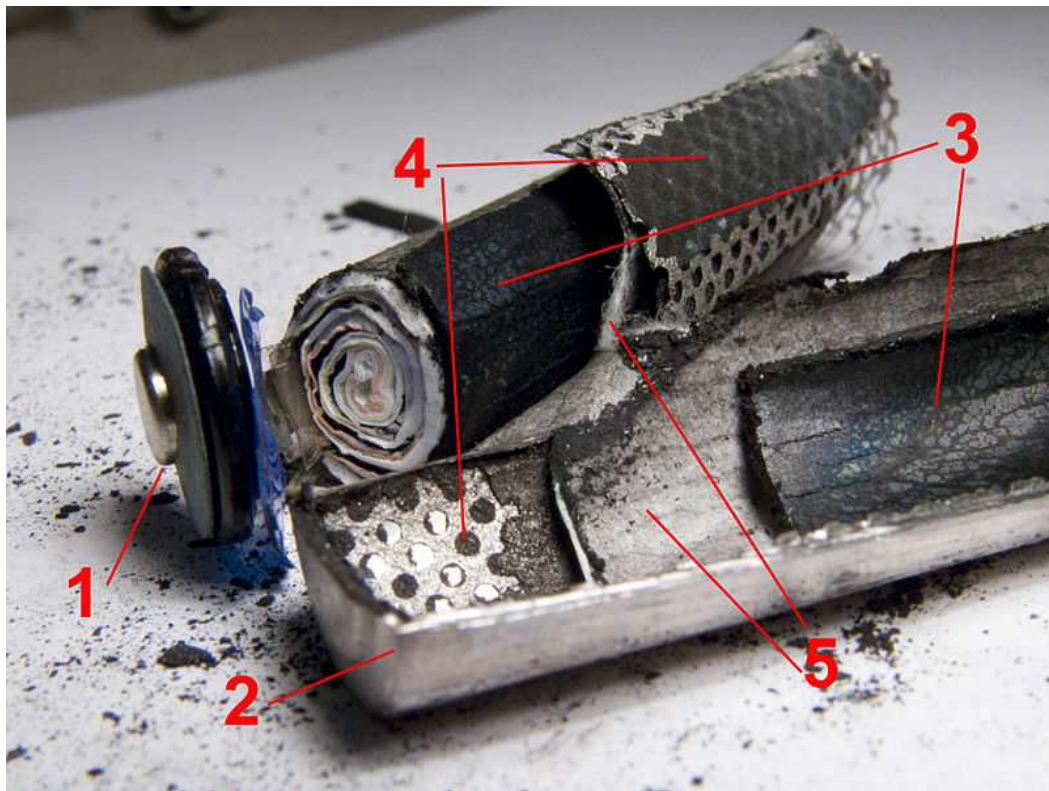


Рис. 2.4. Внутрішня будова нікель-металгідридного акумулятора [5]

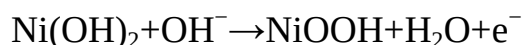
1 – позитивна клемка, 2 – зовнішній металевий корпус (негативний полюс), 3 – позитивний електрод, 4 – негативний електрод (металева сітка, що підключена до металевого корпусу), 5 – сепаратор.

1. *Позитивний електрод (анод)*. Використовує гідроксид нікелю ($\text{Ni}(\text{OH})_2$), аналогічно NiCd акумуляторам.
2. *Негативний електрод (катод)*. Виконаний із металевого сплаву, здатного абсорбувати водень. Найчастіше використовуються сплави на основі лантану (La), неодиму (Nd), або інших рідкоземельних елементів.
3. *Електроліт*. Лужний розчин, зазвичай їдкий калій (KOH).
4. *Сепаратор*. Тонкий шар, що розділяє анод і катод, щоб уникнути короткого замикання, дозволяючи проходження іонів.

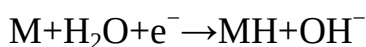
Процеси заряджання і розряджання

Під час заряджання.

1. *На позитивному електроді (анод)*. Гідроксид нікелю ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) окислюється до оксигідроксиду нікелю (NiOOH).

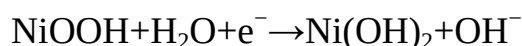


2. *На негативному електроді (катод)*. Металевий сплав (M) поглинає водень із води електроліту, утворюючи металогідрид (MH).

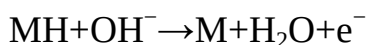


Під час розряджання.

1. *На позитивному електроді (анод)*. Оксигідроксид нікелю (NiOOH) відновлюється до гідроксиду нікелю ($\text{Ni}(\text{OH})_2$).



2. *На негативному електроді (катод)*. Металогідрид (MH) віддає водень, утворюючи метал (M).



Переваги нікель-металгідридних акумуляторів

1. *Вища енергетична щільність*. Енергетична щільність NiMH акумуляторів на 30–50% більша, ніж у NiCd акумуляторів.
2. *Екологічність*. Не містять токсичного кадмію, тому є менш шкідливими для навколишнього середовища.
3. *Менший ефект пам'яті*. NiMH акумулятори менш схильні до ефекту пам'яті, що дозволяє заряджати їх без повного розряду.

4. *Висока циклічність.* Вони можуть витримувати від 500 до 1000 циклів зарядки/розрядки.

5. *Широкий температурний діапазон.* NiMH акумулятори працюють у широкому діапазоні температур (зазвичай від -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$).

Недоліки нікель-металгідридних акумуляторів

1. *Саморозряд.* NiMH акумулятори мають вищий рівень саморозряду, ніж літій-іонні акумулятори. За місяць вони можуть втратити до 30% заряду.

2. *Нижча енергетична щільність у порівнянні з літєвими акумуляторами.* Хоча NiMH акумулятори кращі за NiCd, вони поступаються літій-іонним у співвідношенні ємності до ваги.

3. *Чутливість до температури.* Надмірний нагрів або робота в умовах високих температур можуть призвести до деградації електродів.

4. *Більша вартість.* NiMH акумулятори дорожчі у виробництві, ніж NiCd.

5. *Низька ефективність зарядки.* При зарядці частина енергії втрачається у вигляді тепла, особливо при швидкій зарядці.

Технічні характеристики

Робоча напруга елемента: близько 1,2 В.

Ємність: зазвичай від 1000 до 3000 мА·год.

Циклічність: від 500 до 1000 циклів залежно від умов експлуатації.

Час заряджання: 2–4 години для стандартних моделей.

Температурний діапазон: від -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Застосування нікель-металгідридних акумуляторів

1. *Побутова техніка.* Використовуються в портативних електронних пристроях, таких як пульти дистанційного управління, ліхтарики, іграшки.

2. *Роботи і бездротові пристрої.* Застосовуються в роботах-пилососах, бездротових мишах і клавіатурах.

3. *Гібридні автомобілі.* Широко використовуються в гібридних автомобілях (наприклад, Toyota Prius), де потрібна висока циклічність і стабільність.

4. *Професійна техніка.* Акумулятори NiMH застосовуються в портативних радіостанціях, медичних пристроях і спеціалізованому обладнанні.

Як доглядати за NiMH акумуляторами.

1. *Запобігати глибоким розрядам.* Хоча вони менш схильні до ефекту пам'яті, регулярний глибокий розряд може скоротити їх термін служби.

2. *Заряджати правильно.* Використовуйте зарядні пристрої, які підтримують контроль температури та напруги для запобігання перезарядженню.

3. *Зберігати при середньому заряді.* Для довготривалого зберігання заряджайте акумулятор приблизно на 50%.

4. *Уникати екстремальних температур.* Зберігайте акумулятори в сухому місці при кімнатній температурі.

Отже, нікель-металгідридні акумулятори (NiMH) є хорошим вибором для багатьох застосувань, оскільки вони екологічно безпечні, довговічні й мають вищу енергетичну щільність, ніж NiCd. Однак їх недоліки, такі як високий саморозряд і чутливість до температури, обмежують їх використання в деяких сферах. З появою літєвих акумуляторів NiMH все частіше замінюються на більш сучасні технології.

2.4. Літій-іонні акумулятори

Літій-іонні акумулятори є одними з найпоширеніших та найефективніших типів акумуляторів, які використовуються в сучасній електроніці, електротранспорті та енергетичних системах. Вони характеризуються високою енергетичною щільністю, тривалим терміном служби та низьким саморозрядом.

2.4.1. Типи літій-іонних акумуляторів

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) відрізняються за складом катодного матеріалу, який визначає їхні характеристики, такі як енергетична щільність, термін служби, безпеку та вартість. Основні типи включають:

1. LiCoO_2 (літій-кобальтові, LCO)

- Характеристики: висока енергетична щільність, легка вага, найбільш поширені у споживчій електроніці.
- Застосування: смартфони, ноутбуки, камери.
- Переваги: компактність, добре підходять для пристроїв із низьким енергоспоживанням.
- Недоліки: схильність до перегріву, обмежений термін служби (300–500 циклів), використання кобальту робить їх дорогими та менш екологічними.

2. LiMn_2O_4 (літій-марганцеві, LMO)

- Характеристики: вища термостійкість і безпека, низька енергетична щільність порівняно з іншими типами.
- Застосування: електромобілі, електроінструменти, портативні пристрої.
- Переваги: мала вартість, стійкість до перегріву.
- Недоліки: нижча ємність, відносно короткий термін служби (300–700 циклів).

3. LiNiMnCoO_2 (літій-нікель-марганець-кобальтові, NMC)

- Характеристики: баланс між енергетичною щільністю, безпекою та тривалістю роботи.
- Застосування: електромобілі, системи зберігання енергії, побутова електроніка.
- Переваги: висока енергетична щільність, багато циклів заряджання/розряджання (1000+).
- Недоліки: дорогі у виробництві через складний хімічний склад.

4. LiFePO_4 (літій-залізо-фосфатні, LFP)

- Характеристики: найвища безпека серед Li-ion акумуляторів, відносно низька енергетична щільність.

- Застосування: електромобілі, сонячні системи, медичні пристрої.
- Переваги: стійкість до високих температур і механічних пошкоджень, тривалий термін служби (2000+ циклів), екологічність.
- Недоліки: вища вага, обмежена енергетична щільність.

5. LiNiCoAlO_2 (літій-нікель-кобальт-алюмінієві, NCA)

- Характеристики: дуже висока енергетична щільність, використовуються в електромобілях та промислових застосуваннях.
- Застосування: Tesla, інші преміальні електромобілі, системи зберігання енергії.
- Переваги: тривалий термін служби, висока потужність.
- Недоліки: вища вартість, менша безпека у порівнянні з LFP.

6. LiTiO (літій-титанатні, LTO)

- Характеристики: унікальний анод із літій-титанату замість графіту, надзвичайно швидке зарядження.
- Застосування: електромобілі, системи зберігання енергії, військова техніка.
- Переваги: тривалий термін служби (10 000+ циклів), висока безпека та стійкість до температур.
- Недоліки: низька енергетична щільність, висока вартість.

Порівняння різних типів Li-іон акумуляторів проведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Порівняльна таблиця характеристик різних типів Li-іон акумуляторів

Тип	Енергетична щільність	Циклічність	Безпека	Застосування
LCO	Висока	300–500	Середня	Споживча електроніка
LMO	Середня	300–700	Висока	Електроінструменти
NMC	Висока	1000+	Висока	Електромобілі
LFP	Середня	2000+	Дуже висока	Сонячні системи
NCA	Дуже висока	1000–1500	Середня	Tesla, енергетика
LTO	Низька	10 000+	Дуже висока	Промислові системи

Отже, різні типи літій-іонних акумуляторів розроблені для різних застосувань. Вибір залежить від пріоритетів: висока енергетична щільність для компактних пристроїв, тривалий термін служби для промислових потреб або безпека для електротранспорту та енергетичних систем.

2.4.2. Принцип роботи та характеристики літій-іонних акумуляторів

Принцип роботи

Літій-іонні акумулятори працюють завдяки оборотному переміщенню іонів літію між анодом і катодом через електроліт.

1. *Анод (негативний електрод)*. Зазвичай виготовлений із графіту, де іони літію вбудовуються в структуру під час зарядки.
2. *Катод (позитивний електрод)*. Зазвичай виготовлений із літієвих металевих оксидів (наприклад, LiCoO_2 , LiFePO_4 або LiNiMnCoO_2).
3. *Електроліт*. Використовується органічний розчин із солями літію (наприклад, LiPF_6), що забезпечує рух іонів між електродами.
4. *Сепаратор*. Тонка мембрана, яка фізично розділяє анод і катод, але дозволяє іонам літію проходити.

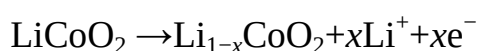
Процеси заряджання і розряджання в літієвих акумуляторах

У літій-іонних акумуляторах принцип роботи базується на електрохімічних реакціях між анодом (негативним електродом), катодом (позитивним електродом) і електролітом. Головна особливість – це рух іонів літію між електродами через електроліт під час заряджання та розряджання.

Процес заряджання

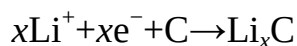
1. Переміщення іонів літію. Під час заряджання джерело струму прикладає напругу, змушуючи іони літію (Li^+) залишати катод і мігрувати через електроліт до анода.

2. Реакції на катоді. На катоді відбувається окислення, коли іони літію залишають активний матеріал (наприклад, літієвий кобальт-оксид, LiCoO_2)



Це призводить до утворення позитивного заряду на катоді.

3. Реакції на аноді. Іони літію вбудовуються в структуру графіту анода (інтеркаляція).



4. Потік електронів. Електрони, що вивільнилися на катоді, проходять через зовнішній електричний ланцюг до анода, компенсуючи заряд.

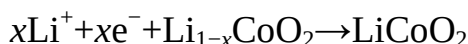
Процес розрядження

1. Переміщення іонів літію. Під час розрядження іони літію залишають анод (графіт) і мігрують через електроліт назад до катода.

2. Реакції на аноді. На аноді іони літію вивільняються з графітової структури.



3. Реакції на катоді. Іони літію знову інтегруються в матеріал катода (наприклад, LiCoO_2):



4. Потік електронів. Електрони рухаються через зовнішній ланцюг від анода до катода, створюючи струм, який живить пристрій.

Механізм роботи електроліту.

Електроліт в акумуляторі (зазвичай органічний розчин із солями літію, наприклад, LiPF_6) дозволяє іонам літію вільно переміщуватися між анодом і катодом. Однак він є електронно-непровідним, що запобігає короткому замиканню.

Роль сепаратора.

Сепаратор є тонкою пористою мембраною, яка фізично розділяє анод і катод. Він забезпечує рух іонів літію через електроліт, але блокує проходження електронів, унеможливорюючи коротке замикання.

Ці процеси роблять літій-іонні акумулятори ефективними для зберігання енергії з високою щільністю та тривалим терміном служби.

Основні характеристики

Робоча напруга. Робоча напруга літій-іонних акумуляторів залежить від хімічного складу катода і анода. В табл. 2.2 наведено типові значення робочої напруги для різних типів літій-іонних акумуляторів.

Таблиця 2.2. Робоча напруга різних типів літій-іонних акумуляторів.

Тип акумулятора	Номинальна напруга (В)	Мінімальна напруга (В)	Максимальна напруга (В)
LiCoO ₂ (LCO)	3,6–3,7	3,0–3,2	4,2
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	3,7	3,0	4,2
LiNiMnCoO ₂ (NMC)	3,6–3,7	2,8–3,0	4,2
LiFePO ₄ (LFP)	3,2–3,3	2,5–2,8	3,65
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	3,6–3,7	3,0	4,2
LiTiO (LTO)	2,3	1,8	2,8

Енергетична щільність. Енергетична щільність літій-іонних акумуляторів залежить від хімічного складу катода і анода. Вона вимірюється у ват-годинах на кілограм (Вт·год/кг) або ват-годинах на літр (Вт·год/л) і є важливим показником для оцінки продуктивності акумулятора. В табл. 2.3 наведено типові значення енергетичної щільності для різних типів Li-іон акумуляторів.

Саморозряд. Низький, близько 2–5% на місяць.

Циклічність. Від 300 до 10000+ циклів залежно від типу акумулятора.

Час заряджання. Від 1 до 4 годин для стандартних моделей.

Температурний діапазон. Зазвичай від -20°C до +60°C, хоча оптимальна робота – при кімнатній температурі.

Переваги літій-іонних акумуляторів

1. *Висока енергетична щільність.* Забезпечують більше енергії на одиницю ваги або об'єму порівняно з іншими акумуляторами.
2. *Відсутність ефекту пам'яті.* Їх можна заряджати без повного розряду, що спрощує експлуатацію.

Таблиця 2.3. Енергетична щільність різних типів літій-іонних акумуляторів.

Тип акумулятора	Енергетична щільність (Вт·год/кг)	Енергетична щільність (Вт·год/л)	Особливості
LiCoO ₂ (LCO)	150–200	400–500	Висока енергетична щільність, але обмежена тривалість служби.
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	100–150	300–400	Середня щільність, добре підходить для застосувань з високою безпекою.
LiNiMnCoO ₂ (NMC)	150–220	400–600	Збалансовані характеристики між щільністю, терміном служби та безпекою.
LiFePO ₄ (LFP)	90–120	250–350	Низька енергетична щільність, але висока безпека і довговічність.
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	200–260	500–700	Дуже висока щільність, використовується у високопродуктивних системах, таких як електромобілі.
LiTiO (LTO)	50–80	150–200	Низька щільність, але виняткова довговічність і безпека.

3. *Низький саморозряд.* Li-іон акумулятори довше зберігають заряд при зберіганні.

4. *Тривалий термін служби.* Здатні працювати кілька років при правильному використанні.

5. *Широкий спектр застосувань.* Використовуються у смартфонах, ноутбуках, електромобілях, дронах та енергетичних системах.

Недоліки літій-іонних акумуляторів

1. *Чутливість до температури.* Високі температури можуть спричинити деградацію або навіть займання.

2. *Ризик перегріву.* При пошкодженні або короткому замиканні можливий термічний розгін (займання або вибух).

3. *Вартість.* Дорожчі у виробництві порівняно з іншими типами акумуляторів.

4. *Обмежений термін служби.* Навіть при правильному використанні акумулятор втрачає ємність з часом.

5. *Утилізація.* Містять токсичні матеріали, які потребують спеціальної переробки.

Рекомендації для продовження терміну служби

1. Уникати глибоких розрядів. Рекомендується не допускати розряду нижче 20%.

2. Не перезаряджати. Уникати постійного тривалого зберігання при 100% заряді.

3. Оптимальна температура. Використовувати акумулятор при кімнатній температурі, уникати перегріву та замерзання.

4. Зберігання. Зберігати при зарядженні 40–60%, у прохолодному та сухому місці.

5. Використовувати правильний зарядний пристрій. Заряджати тільки з використанням сертифікованих пристроїв.

Застосування літій-іонних акумуляторів

1. Споживча електроніка. Смартфони, ноутбуки, планшети, розумні годинники.

2. Електромобілі. Використовуються у Tesla, Nissan Leaf, BMW i3 тощо.

3. Авіація та дрони. Легкі та енергоефективні батареї для дронів та інших безпілотних систем.

4. Енергетика. Застосовуються у системах зберігання енергії для сонячних і вітрових установок.

Літій-іонні акумулятори є універсальним рішенням для багатьох сфер завдяки своїм характеристикам, хоча потребують обережного поводження для безпечного та тривалого використання.

2.5. Інші типи акумуляторів (натрієві, цинкові, суперконденсатори)

2.5.1. Натрієвий акумулятор

Натрієві акумулятори є перспективною альтернативою літій-іонним акумуляторам, особливо в умовах зростаючого попиту на енергозберігаючі системи та обмеженість літійових ресурсів. Вони використовують натрій (Na) як основний активний елемент для зберігання заряду.

Типи натрієвих акумуляторів

1. *Натрій-іонні акумулятори (Na-ion)*. Працюють за принципом, схожим до літій-іонних акумуляторів, але замість літію використовують іони натрію. Основні матеріали для катода: натрій-залізо-фосфат (NaFePO_4), оксиди натрію та мангану. Анод: графіт, вуглецеві матеріали або титанові сполуки.

2. *Натрій-сірчані акумулятори (Na-S)*. Використовують рідкий натрій як анод і сірку як катод. Працюють при високих температурах (300–350°C), оскільки натрій і сірка у рідкому стані забезпечують високий рівень провідності.

3. *Натрій-метал-галоїдні акумулятори (ZEBRA)*. Використовують натрій і хлорид нікелю. Працюють при високій температурі (250–350°C) для підтримання електроліту у розплавленому стані.

Переваги натрієвих акумуляторів

1. Доступність сировини. Натрій є одним із найпоширеніших елементів на Землі, дешевший і екологічно безпечніший за літій.

2. Стабільність і безпека. Менш схильні до перегріву та самозаймання, ніж літій-іонні акумулятори.

3. Екологічність. Використовують матеріали, які легко утилізуються.

4. Довговічність. Мають тривалий термін служби через меншу деградацію матеріалів.

Недоліки натрієвих акумуляторів

1. Низька енергетична щільність. Натрій має більшу атомну масу і радіус іона, що знижує кількість енергії, яку можна зберігати на одиницю маси чи об'єму (100–150 Вт·год/кг у порівнянні з 150–260 Вт·год/кг у Li-ion).

2. Необхідність вдосконалення матеріалів. Сучасні матеріали для катодів і анодів ще не досягли рівня літій-іонних акумуляторів за продуктивністю.

3. Температурний режим. Високотемпературні типи натрієвих акумуляторів (Na-S, ZEBRA) вимагають додаткової енергії для підтримання робочої температури.

Основні технічні характеристики натрієвих акумуляторів (Na-ion) наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Технічні характеристики натрієвих акумуляторів (Na-ion)

Параметр	Значення
Номінальна напруга	2,3–3,3 В
Енергетична щільність	100–150 Вт·год/кг
Термін служби	2000–5000 циклів
Температура роботи	-20°C до +60°C
Коефіцієнт саморозряду	Нижчий, ніж у Li-ion

Застосування натрієвих акумуляторів:

1. *Системи зберігання енергії.* Вітрові та сонячні електростанції, мережеві системи для стабілізації подачі електроенергії.

2. *Електротранспорт.* Як альтернатива Li-ion для бюджетних електромобілів.

3. *Побутова електроніка.* У майбутньому можуть використовуватись у пристроях із середнім енергоспоживанням.

4. *Промислові застосування.* Енергосистеми, що працюють у жорстких умовах, наприклад, на високих температурах.

Перспективи розвитку:

Зниження витрат: Завдяки доступності натрію, ці акумулятори можуть стати дешевшими, ніж літій-іонні.

Покращення матеріалів: Нові катодні матеріали (наприклад, сполуки натрію та нікелю) обіцяють підвищити енергетичну щільність.

Масштабованість: Натрієві акумулятори краще підходять для великих систем зберігання енергії через низьку вартість і тривалий термін служби.

Натрієві акумулятори ще не досягли рівня популярності літій-іонних, але їх розвиток може значно вплинути на ринок енергетики та електротранспорту. Вони є економічно вигідним і екологічним рішенням для багатьох сучасних викликів.

2.5.2. Цинковий акумулятор

Цинкові акумулятори – це електрохімічні системи, які використовують цинк як основний активний матеріал для анода. Ці акумулятори привертають увагу завдяки низькій вартості, екологічній безпеці та високій доступності цинку, що є одним із найпоширеніших металів.

Типи цинкових акумуляторів

1. *Цинк-нікелеві акумулятори (Zn-Ni).* Використовують цинк як анод і оксид нікелю як катод. Основна перевага – висока стабільність та тривалий термін служби.

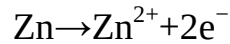
2. *Цинк-повітряні акумулятори (Zn-air).* Використовують цинк як анод, а кисень із повітря як катодний активний матеріал. Висока енергетична щільність завдяки використанню кисню з навколишнього середовища.

3. *Цинк-бромні акумулятори (Zn-Br).* Застосовують рідкий розчин броміду як катодний електроліт. Найбільш поширені у великих системах зберігання енергії.

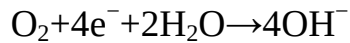
4. *Цинк-манганові акумулятори (Zn-Mn).* Використовуються для низьковартісних систем із середньою енергетичною щільністю.

Принцип роботи

1. *Анодна реакція.* На аноді (цинк) відбувається окиснення:



2. *Катодна реакція.* На катоді (залежить від типу акумулятора) відбувається відновлення, наприклад, для Zn-air:



3. *Електроліт.* Часто використовується водний розчин лугу (KOH або NaOH) для підтримання іонної провідності.

Переваги цинкових акумуляторів

1. *Низька вартість.* Цинк є дешевим і доступним матеріалом у великих кількостях.
2. *Екологічність.* Не містять токсичних матеріалів (наприклад, кадмію або свинцю), легко утилізуються.
3. *Висока безпека.* Менш схильні до займання чи перегріву порівняно з літій-іонними акумуляторами.
4. *Енергетична щільність.* Цинк-повітряні системи забезпечують високу щільність енергії (300–400 Вт·год/кг), що перевищує більшість комерційних акумуляторів.
5. *Сумісність із відновлюваною енергетикою.* Ідеальні для великих систем зберігання енергії завдяки стабільності та низькій вартості.

Недоліки цинкових акумуляторів

1. *Обмежений термін служби.* Проблема дендритів цинку, які утворюються під час заряджання і можуть викликати коротке замикання.
2. *Ефективність.* Втрати енергії під час циклів заряджання та розряджання (особливо в Zn-air системах).
3. *Чутливість до умов експлуатації.* Водні електроліти можуть випаровуватись або замерзати при екстремальних температурах.
4. *Повільна динаміка реакцій.* У Zn-air акумуляторах реакції на катоді можуть бути повільними, що обмежує потужність.

Основні технічні характеристики цинкових акумуляторів наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Технічні характеристики цинкових акумуляторів

Параметр	Zn-Ni	Zn-air	Zn-Br
Номінальна напруга, В	1,6 В	1,2–1,4 В	1,8–2,0 В
Енергетична щільність, Вт·год/кг	100–150	300–400	70–120
Циклічність	500–1000	200–300	2000+
Температура роботи	0°C до +50°C	-20°C до +40°C	0°C до +45°C

Застосування цинкових акумуляторів

1. *Системи зберігання енергії.* Zn-Br і Zn-air часто використовуються в масштабних енергосховищах для вітрових і сонячних електростанцій.

2. *Портативні пристрої.* Zn-air використовуються у слухових апаратах через високу енергетичну щільність і компактність.

3. *Електротранспорт.* Zn-Ni акумулятори можуть бути застосовані в електромобілях, хоча їх енергетична щільність нижча за літій-іонні.

4. *Промисловість.* Використовуються у резервних джерелах живлення для телекомунікаційних систем і базових станцій.

Перспективи розвитку

- *Вдосконалення матеріалів:* Розробка нових електролітів і покриттів для запобігання утворенню дендритів.
- *Інтеграція з відновлюваною енергетикою:* Зниження вартості виробництва та підвищення терміну служби роблять цинкові акумулятори перспективними для зберігання енергії.
- *Компактність:* інновації у Zn-air акумуляторах можуть зробити їх конкурентоспроможними з літій-іонними для портативних пристроїв.

Цинкові акумулятори – це економічно вигідне, екологічно чисте і надійне рішення для багатьох сучасних завдань, але потребують подальшого вдосконалення технологій.

2.5.3. Суперконденсатор (іоністор)

Суперконденсатор (також відомий як іоністор або ультраконденсатор) – це електрохімічний пристрій, який зберігає енергію за рахунок статичної ємності між електродами. На відміну від традиційних акумуляторів, він характеризується високою швидкістю заряджання/розряджання, тривалим терміном служби і високою потужністю.

Принцип роботи.

Суперконденсатор використовує два основні механізми зберігання енергії:

1. *Електростатична адсорбція (електрична подвійна ємність).* Енергія зберігається за рахунок накопичення іонів з електроліту на поверхні пористих електродів. Цей процес є фізичним, а не хімічним, що дозволяє швидко заряджання.

2. *Псевдокапацитивність.* Енергія зберігається за рахунок електрохімічних реакцій, які відбуваються на поверхні електродів (але не всередині об'єму матеріалу, як у батареях).

Конструкція

1. *Електроди:* Виготовляються з пористих матеріалів, таких як активоване вугілля, графен або оксиди металів.

2. *Електроліт:* Рідкий або гелеподібний матеріал, який забезпечує рух іонів між електродами.

3. *Сепаратор:* Тонкий матеріал, що розділяє електроди, дозволяючи іонам проходити через нього, але запобігаючи короткому замиканню.

Основні технічні характеристики суперконденсаторів наведені в табл.

2.6.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики суперконденсаторів

Параметр	Значення
Енергетична щільність	1–10 Вт·год/кг
Потужність	10000–15000 Вт/кг
Напруга	2,3–2,7 В на елемент
Термін служби	1000000+ циклів
Час заряджання	Секунди або хвилини
Температура роботи	-40°C до +70°C

Переваги суперконденсаторів

1. *Швидке заряджання і розрядження.* Час заряджання становить секунди, на відміну від годин для акумуляторів.
2. *Висока потужність.* Можуть віддавати або приймати велику кількість енергії за короткий час.
3. *Тривалий термін служби.* Мільйони циклів заряджання без значної деградації.
4. *Безпека.* Менш схильні до перегріву або займання, ніж акумулятори.
5. *Широкий температурний діапазон.* Можуть ефективно працювати в екстремальних умовах.

Недоліки суперконденсаторів

1. *Низька енергетична щільність.* У 10–50 разів нижча, ніж у літій-іонних акумуляторів.
2. *Саморозряд.* Втрачають заряд швидше, ніж акумулятори.
3. *Напруга.* Низька напруга на елемент (до 2,7 В), що потребує послідовного з'єднання для досягнення вищої напруги.

Застосування

1. *Електротранспорт.* Використовуються в гібридних транспортних засобах, електробусах для рекуперації енергії гальмування.
2. *Промисловість.* Відновлення енергії в підйомниках, кранах і інших системах, що працюють з великими навантаженнями.

3. *Енергозберігаючі системи*: Використовуються як буфери в сонячних і вітрових установках.

4. *Портативна електроніка*. Для забезпечення короткочасного високого енергоспоживання (наприклад, фотоспалахи).

5. *Автомобілі*. Як доповнення до акумуляторів для систем старт-стоп.

Перспективи розвитку

1. *Матеріали*. Розробка нових матеріалів, таких як графен, для підвищення енергетичної щільності.

2. *Гібридні системи*. Поєднання суперконденсаторів із батареями для досягнення найкращого балансу потужності та ємності.

3. *Масове виробництво*. Зниження вартості за рахунок масштабування виробництва.

Суперконденсатори мають величезний потенціал у галузях, де потрібна висока потужність, довговічність і швидкість, але їх енергетична щільність все ще потребує вдосконалення для широкомасштабного використання в системах зберігання енергії.

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК АКУМУЛЯТОРІВ

Акумуляторні системи відіграють ключову роль у багатьох сферах сучасного життя – від портативної електроніки до відновлюваних джерел енергії та електротранспорту. Різні типи акумуляторів мають свої унікальні характеристики, які впливають на їх ефективність, довговічність, потужність і адаптованість до конкретних умов експлуатації.

Порівняльний аналіз акумуляторів є важливим етапом для розуміння переваг та недоліків кожної технології. Він дозволяє вибрати оптимальний тип джерела енергії для конкретного завдання, враховуючи такі параметри, як енергетична щільність, термін служби, вартість, безпека, вплив на довкілля та умови експлуатації.

У цьому розділі розглядаються основні характеристики акумуляторів різних типів, таких як свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, літій-іонні, натрієві, цинкові, а також суперконденсатори. Порівняння здійснюється за ключовими параметрами, що визначають їх ефективність та доцільність застосування у певних галузях. Такий аналіз є особливо актуальним у контексті розвитку сучасних технологій, де вимоги до джерел енергії стають дедалі вищими.

3.1. Табличне порівняння різних типів акумуляторів за основними параметрами

Порівняння різних типів акумуляторів за їхніми основними параметрами є надзвичайно важливим завданням, особливо в сучасному світі, де портативні пристрої та електричні транспортні засоби стають все більш популярними. Воно допоможе вибрати акумулятор відповідно до специфічних потреб. Табличне порівняння різних типів акумуляторів за основними параметрами наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Основні характеристики різних типів акумуляторів

Параметр	Свинцево-кислотні (Pb-Acid)	Свинцево-кислотні (AGM)	Нікель-кадмієві (NiCd)	Нікель-металгідридні (NiMH)	Літій-іонні (Li-ion)	Літій-залізо-фосфатні (LiFePO ₄)	Літій-титанатні (LTO)	Натрієві (Na-ion)	Цинкові (Zn-air)	Іоністор
Енергетична щільність (Вт·год/кг)	30–50	35–60	40–60	60–120	150–260	90–150	70–100	100–150	100–300	5–10
Робоча напруга (В/елемент)	2,0	2,0	1,2	1,2	3,6	3,2	2,4	3,0	1,65–2,0	2,3–2,7
Термін служби (цикли)	300–500	400–600	1000–1500	500–1000	500–3000	2000–5000	3000–7000	2000–3000	200–500	>1,000,000
Саморозряд (%/місяць)	3–5	2–4	15–20	30–50	1–5	1–5	1–2	10–15	2–10	<1
Час заряджання (години)	8–16	6–8	1–2	2–4	1–4	1–2	<1	2–4	5–10	<0,1
Температурний діапазон (°C)	-20...+50	-20...+60	-40...+60	-20...+50	-20...+60	-10...+60	-40...+60	-20...+60	-10...+50	-40...+70
Пам'ять ефект	Немає	Немає	Є	Мінімальний	Немає	Немає	Немає	Немає	Немає	Немає
Екологічність	Низька (свинцева токсичність)	Низька	Низька (кадмієва токсичність)	Вища, ніж у NiCd	Висока	Висока	Висока	Висока	Висока	Дуже висока
Питома потужність (Вт/кг)	150–300	200–400	200–300	200–1000	1500–10,000	1000–5000	5000–10000	500–2000	100–500	>10,000
Вартість (\$/кВт·год)	150–250	200–300	300–500	200–500	100–300	150–400	400–600	100–200	50–200	>1000

Коментарі до таблиці:

1. *Енергетична щільність* визначає, скільки енергії акумулятор може накопичувати на одиницю маси. Найвищу щільність мають літій-іонні акумулятори.
2. *Термін служби* залежить від кількості циклів заряджання-розряджання; LiFePO_4 та натрієві акумулятори мають найдовший термін експлуатації.
3. *Саморозряд* є мінімальним у суперконденсаторів і літій-іонних технологій.
4. *Температурний діапазон* впливає на роботу акумулятора; нікель-кадмієві вирізняються стійкістю до низьких температур.
5. *Екологічність*: свинцево-кислотні та нікель-кадмієві акумулятори вимагають ретельної утилізації через токсичні матеріали.
6. *Пам'ять ефект*: проблема для NiCd, але неактуальна для сучасних літійових акумуляторів.

Основні причини, чому таке порівняння є необхідним:

Вибір оптимального акумулятора: Різні типи акумуляторів мають свої переваги та недоліки. Порівняння дозволяє визначити, який тип акумулятора найкраще підходить для конкретного застосування.

Оцінка ефективності: Порівнюючи різні акумулятори, можна оцінити їхню ефективність за такими параметрами, як ємність, щільність енергії, термін служби, вартість та інші.

Розуміння технологічних трендів: Аналіз характеристик різних типів акумуляторів дозволяє зрозуміти, які технології розвиваються найбільш активно і які нові можливості відкриваються в галузі накопичення енергії.

Оптимізація систем: Для розробників електроніки та енергетичних систем порівняння акумуляторів допомагає вибрати оптимальні рішення для створення ефективних і надійних пристроїв.

Складання технічних характеристик: Інженери та технічні фахівці використовують дані про різні типи акумуляторів для складання технічних характеристик пристроїв та систем.

3.2. Графічне зображення результатів порівняння

Представимо основні технічні характеристики різних типів акумуляторів в графічному вигляді для можливості наочного зіставлення отриманих результатів.

1. *Енергетична щільність.* Енергетична щільність (середнє значення) різних типів акумуляторів представлена гістограмою на рис. 3.1.

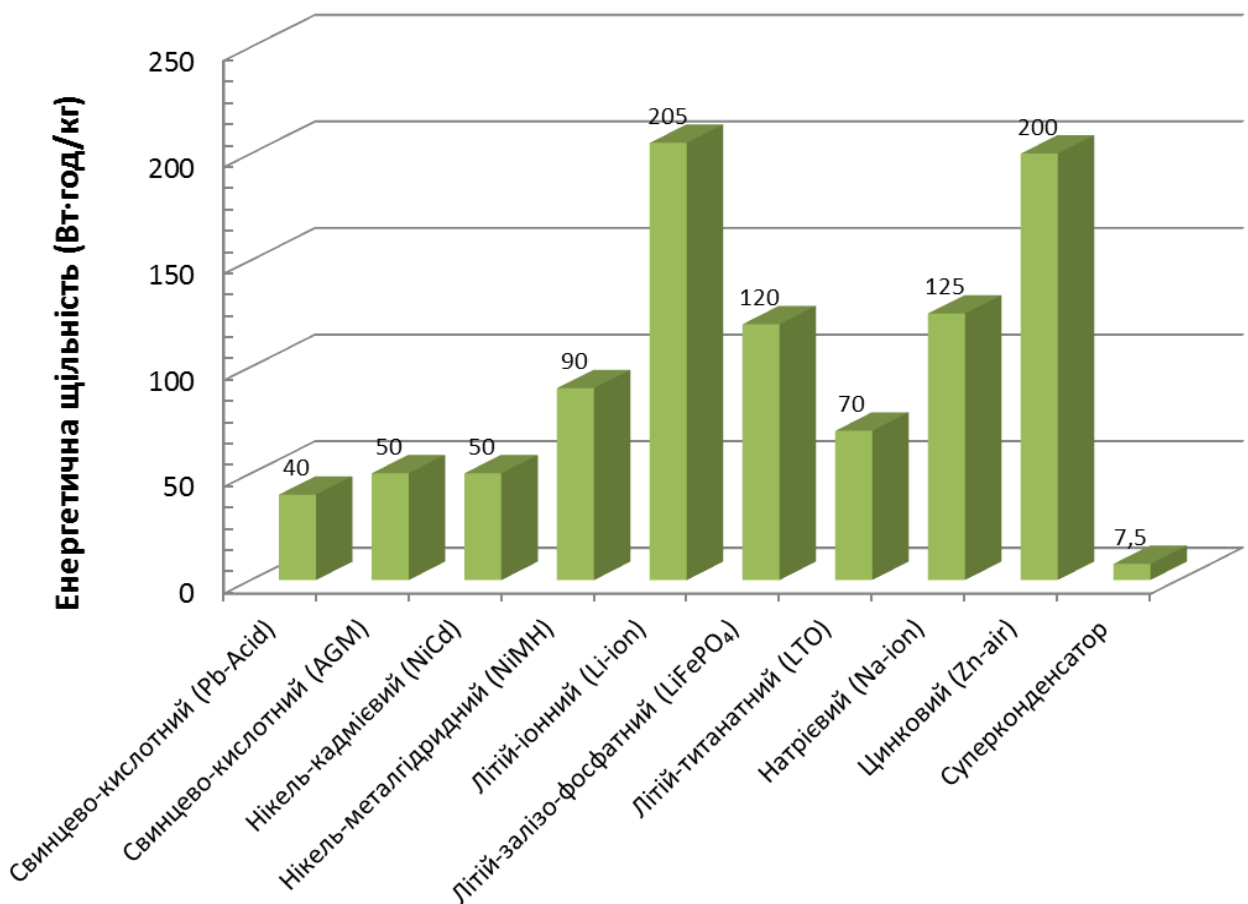


Рис. 3.1. Гістограма енергетичної щільності різних типів акумуляторів.

2. *Робоча напруга.* Робоча напруга (середнє значення) різних типів акумуляторів представлена гістограмою на рис. 3.2.

3. *Термін служби (цикли).* Термін служби або циклічність різних типів акумуляторів представлена гістограмою на рис. 3.3.

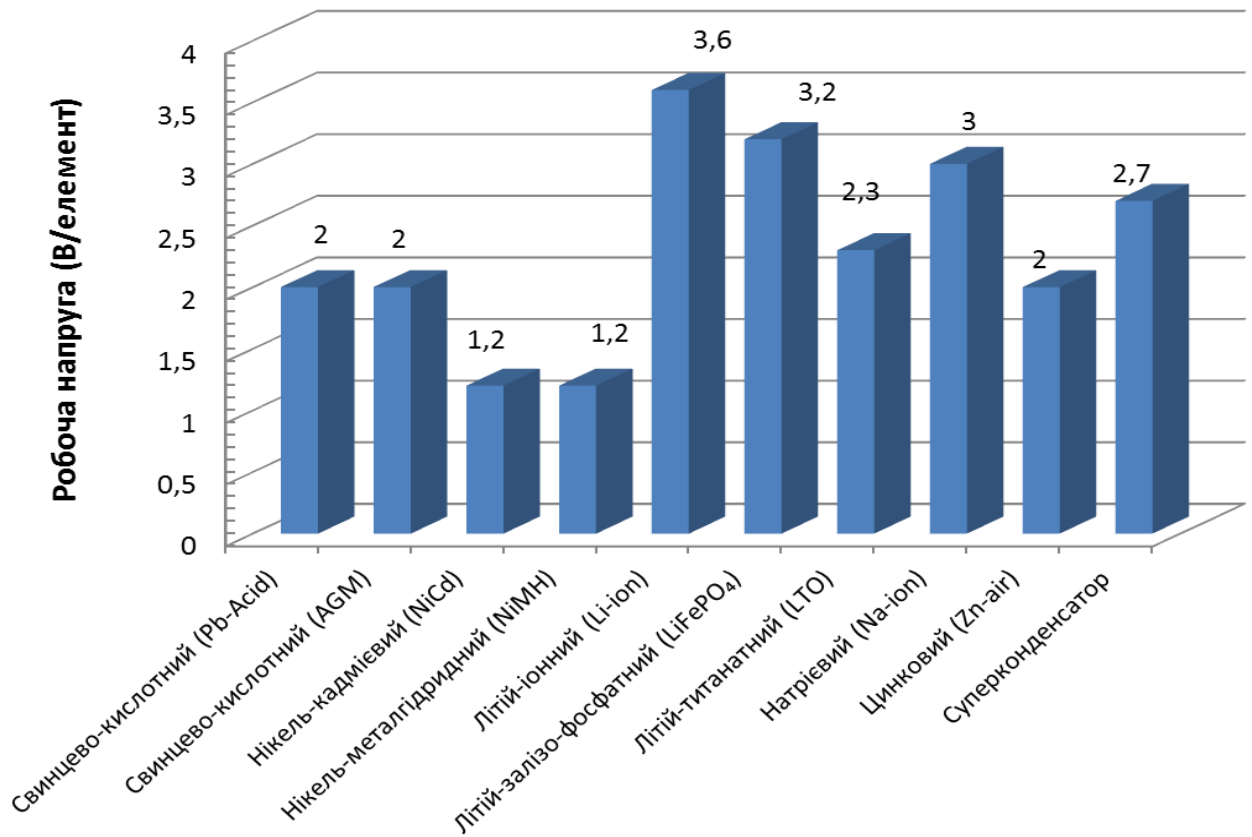


Рис. 3.2. Гістограма робочих напруг різних типів акумуляторів.

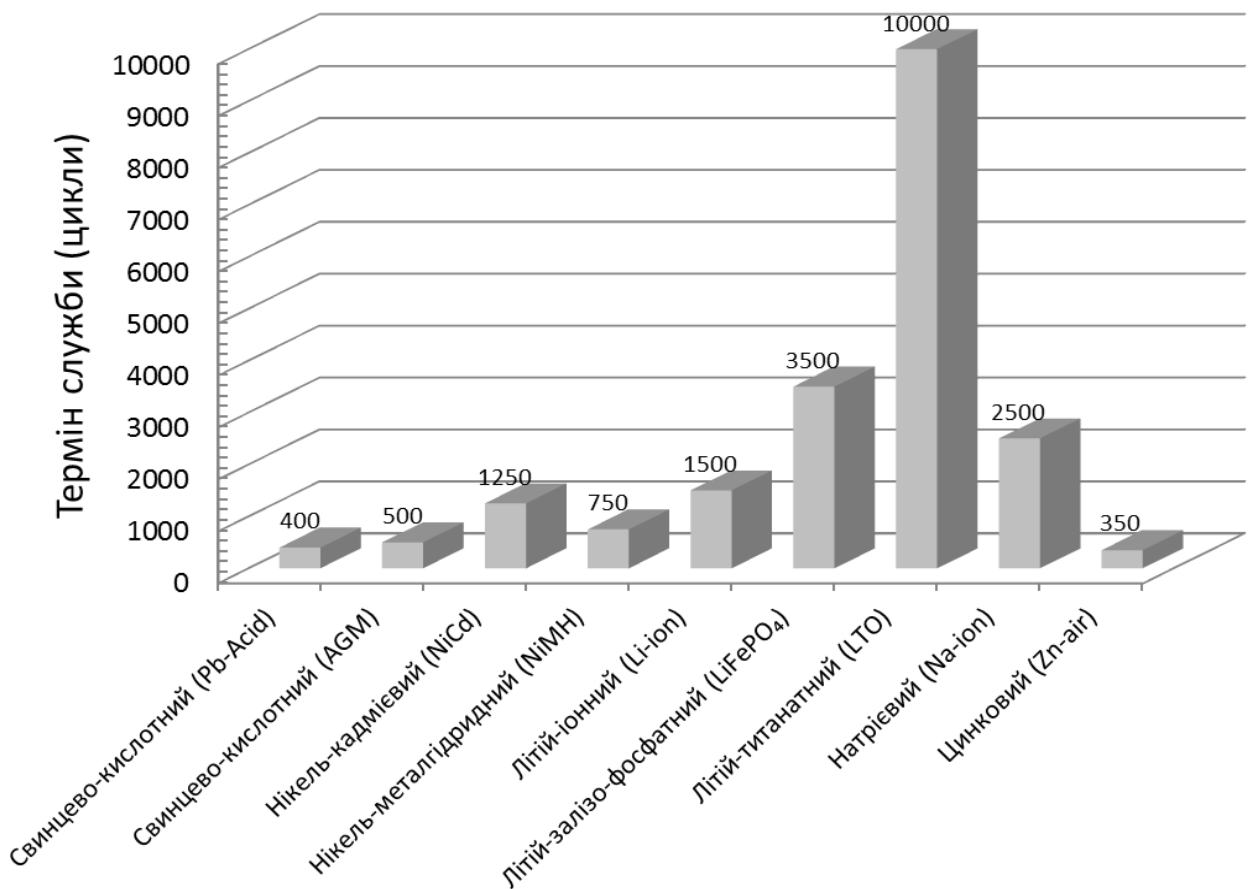


Рис. 3.3. Гістограма циклічності різних типів акумуляторів.

4. *Питома вартість.* Питома вартість різних типів акумуляторів представлена гістограмою на рис. 3.4.

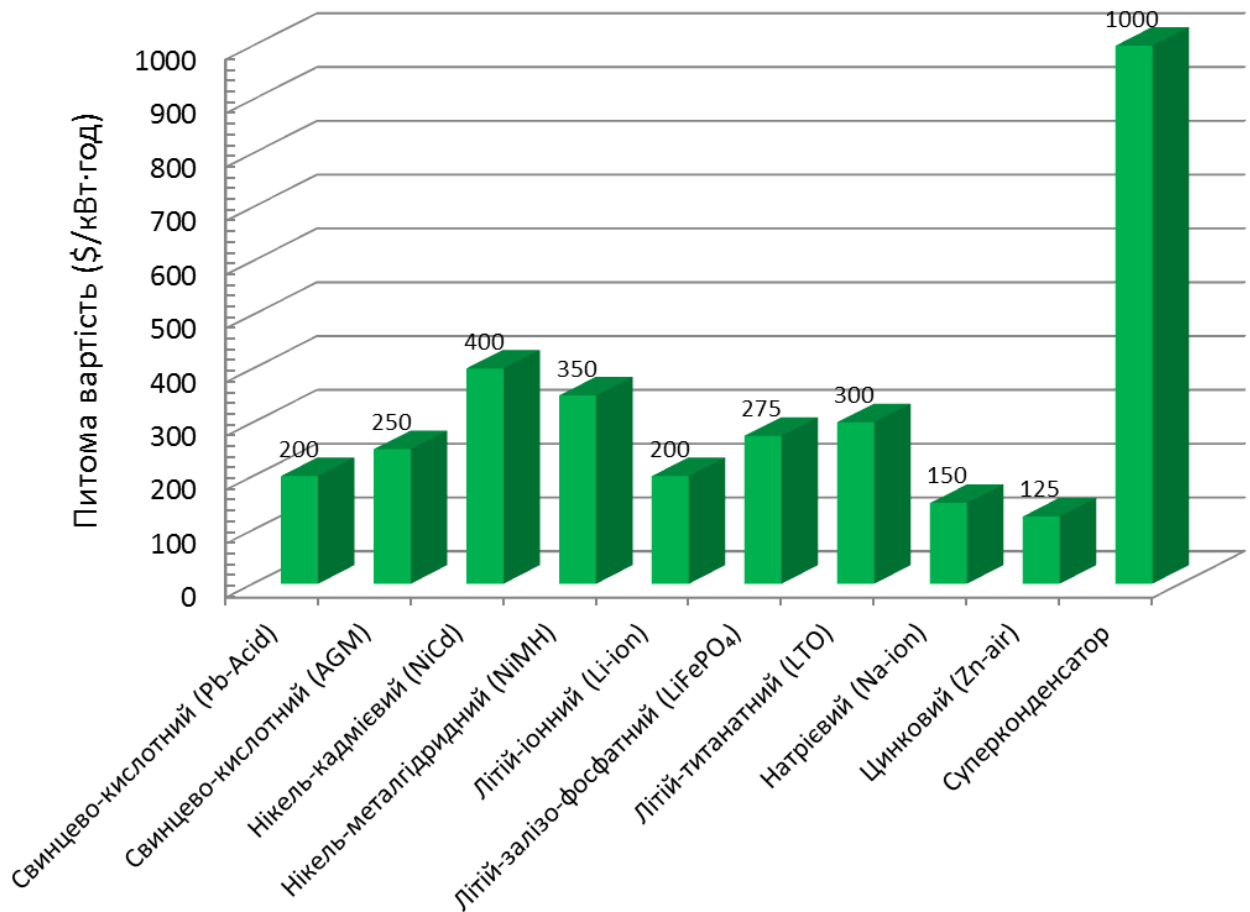


Рис. 3.4. Гістограма питомої вартості різних типів акумуляторів.

3.3. Аналіз отриманих результатів

Проаналізуємо характеристики різних типів акумуляторів наведені в підпункті 3.1 і 3.2. При аналізі будемо обирати акумулятори для двох типів об'єктів – рухомого (наприклад, електромобіль, зарядна станція) та нерухомого або стаціонарного (наприклад, акумуляторна батарея гібридної сонячної електростанції).

Рухомий об'єкт.

Для рухомого об'єкта, такого як електромобіль, дрон чи інша техніка, найкращим є *літій-іонний (Li-ion)* акумулятор.

Обґрунтування вибору:

1. *Висока енергетична щільність (205 Вт·год/кг):* літій-іонні акумулятори забезпечують значну кількість енергії при невеликій вазі, що є критично важливим для рухомих об'єктів. Це дозволяє збільшити дальність руху або тривалість роботи на одному заряді.

2. *Помірна вартість (\$200/кВт·год):* вартість залишається конкурентною, особливо враховуючи високу продуктивність і тривалий термін служби.

3. *Висока циклічність (1500 циклів):* літій-іонні батареї мають довгий термін служби, що мінімізує частоту заміни акумулятора та знижує експлуатаційні витрати.

4. *Середній термін служби (8–15 років):* тривалий термін служби відповідає потребам рухомих об'єктів, які часто експлуатуються протягом багатьох років.

5. *Швидке заряджання (1–4 години):* для рухомих об'єктів швидкість заряджання є важливим фактором. Літій-іонні акумулятори забезпечують досить швидке відновлення енергії.

6. *Широкий температурний діапазон (-20...+60 °C):* ці акумулятори працюють у різних кліматичних умовах, що важливо для транспорту або пристроїв, які використовуються на відкритому повітрі.

7. *Відсутність ефекту пам'яті:* літій-іонні акумулятори можна заряджати на будь-якому рівні заряду без втрати ємності, що зручно для нерегулярних режимів роботи.

Альтернативи:

– *Літій-залізо-фосфатний (LiFePO₄) акумулятор:* хоча вони мають більшу циклічність (3500 циклів) і тривалий термін служби, їхня енергетична щільність (120 Вт·год/кг) нижча. Це може бути проблемою для рухомих об'єктів, де вага критично важлива.

– *Літій-титанатний (LTO):* Надзвичайно довговічний (10,000 циклів), але має низьку енергетичну щільність (70 Вт·год/кг) і високу вартість, що робить його менш ефективним для більшості рухомих об'єктів.

Отже, літій-іонні акумулятори є найкращим вибором для рухомого об'єкта завдяки оптимальному поєднанню енергетичної щільності, циклічності, швидкості заряджання та доступної вартості.

Не рухомий об'єкт.

Для відповіді на це питання скористаємось таким показником як вартість одного циклу на одну кВт·год, адже вага акумулятора не має при цьому суттєвого значення:

вартість одного циклу = питома вартість/кількість циклів.

Результати розрахунку вартості одного циклу для різних типів акумуляторів наведено в табл. 3.2 та проілюстровано гістограмою рис. 3.5.

Таблиця 3.2. Вартість одного циклу для різних типів акумуляторів

Тип акумулятора	Вартість (\$/кВт·год)	Кількість циклів	Ціна за цикл (\$/цикл)
Свинцево-кислотний (Pb-Acid)	200	400	0,50
Свинцево-кислотний (AGM)	250	600	0,42
Нікель-кадмієвий (NiCd)	400	1250	0,32
Нікель-металгідридний (NiMH)	350	750	0,47
Літій-іонний (Li-ion)	200	1500	0,13
Літій-залізо-фосфатний (LiFePO ₄)	275	3500	0,08
Літій-титанатний (LTO)	300	10,000	0,03
Натрієвий (Na-ion)	150	2500	0,06
Цинковий (Zn-air)	125	350	0,36
Суперконденсатор	1000	>1000000	<0,001

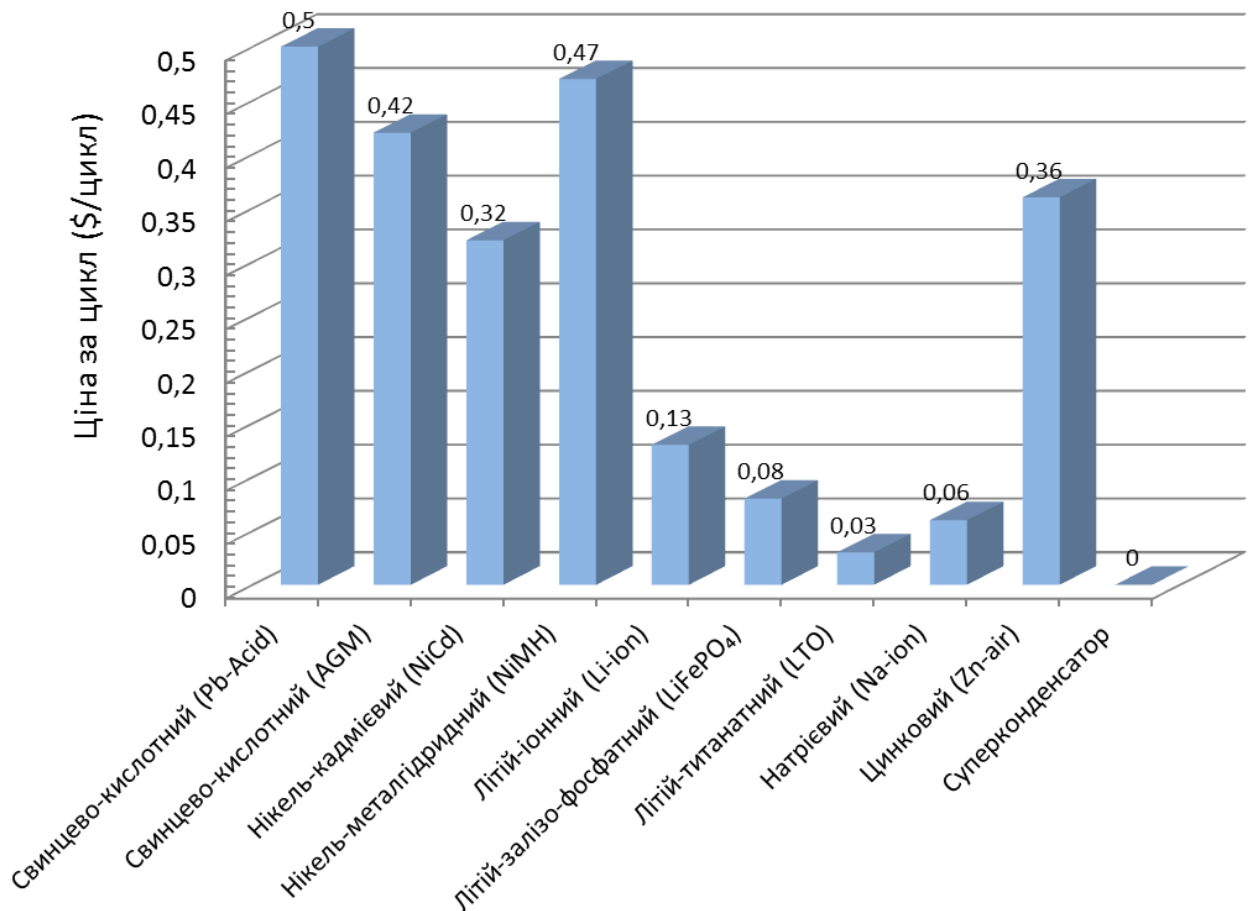


Рис. 3.5. Гістограма вартості одного циклу для різних типів акумуляторів.

Отже, аналізуючи дані табл. 3.2 можна зробити висновок, що для стаціонарного об'єкта, такого як система зберігання енергії в домашній сонячній електростанції або промисловій мережі, найкращим вибором є *літій титанатний (LTO)* акумулятор.

Обґрунтування вибору:

1. *Надзвичайна циклічність: 10000 циклів:* це більш ніж удвічі перевищує показники LiFePO₄, що зменшує необхідність заміни та витрати на обслуговування.

2. *Вартість за цикл: \$0.03:* найнижча серед усіх розглянутих типів акумуляторів, що робить LTO економічно привабливим варіантом у довгостроковій перспективі.

3. *Термін служби: 15–25 років:* LTO має тривалий термін служби, що відповідає або перевищує LiFePO₄ (10–20 років).

4. *Висока безпека та температурна стійкість:* LTO є одними з найбезпечніших акумуляторів, добре працюють у широкому температурному діапазоні ($-40\dots+60^{\circ}\text{C}$), що важливо для стаціонарних об'єктів у різних кліматичних умовах.

5. *Ефективність заряджання:* дуже низький внутрішній опір і високий ККД ($\sim 90\text{--}95\%$) дозволяють ефективно заряджати/розряджати навіть при високих струмах.

Недоліки LTO:

1. *Енергетична щільність:* $70 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$: значно нижча, ніж у LiFePO_4 ($120 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$). Для стаціонарних об'єктів це може бути несуттєвим, адже обмеження за масою та розмірами менше критичні.

2. *Вища початкова вартість:* вартість $\$300/\text{кВт}\cdot\text{год}$ трохи перевищує показник LiFePO_4 ($\$275/\text{кВт}\cdot\text{год}$). Проте це компенсується низькою ціною за цикл і довговічністю.

Отже, з урахуванням циклічності, ціни за цикл і довговічності, літій-титанатний (LTO) акумулятор є кращим вибором для стаціонарного об'єкта, особливо в умовах, де важлива безпека, тривалість служби та низькі витрати на обслуговування. LiFePO_4 залишається хорошим варіантом, якщо енергетична щільність і початкова вартість мають пріоритет.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз потенційних небезпек і шкідливих факторів.

4.1.1. Хімічні небезпеки.

Акумулятори, залежно від їх типу (свинцево-кислотні, літій-іонні, нікель-кадмієві тощо), містять різноманітні хімічні сполуки, які можуть становити потенційну загрозу для здоров'я працівників і довкілля. Основні хімічні небезпеки пов'язані з ризиком контакту з кислотами, лугами, важкими металами або токсичними речовинами, що входять до складу електроліту чи матеріалів електродів.

1. Небезпеки від кислот і лугів.

Кислоти (наприклад, сірчана кислота в свинцево-кислотних акумуляторах):

Ризики: хімічні опіки шкіри та слизових оболонок, подразнення органів дихання при вдиханні парів, руйнування одягу та пошкодження обладнання при розливі.

Джерела ризику: пошкодження корпусу акумулятора, пролиття під час технічного обслуговування чи заряджання.

Луги (наприклад, гідроксид калію в нікель-кадмієвих акумуляторах):

Ризики: хімічні опіки шкіри та очей, руйнування тканин при контакті з тілом, подразнення органів дихання через аерозолі.

Джерела ризику: протікання чи витік електроліту, неправильна утилізація акумулятора.

2. Небезпеки від важких металів.

Кадмій (у нікель-кадмієвих акумуляторах):

Ризики: токсичність при вдиханні пилу або парів, накопичення в організмі, що призводить до ураження нирок та інших органів, канцерогенна дія.

Свинець (у свинцево-кислотних акумуляторах):

Ризики: накопичення у кістках і м'яких тканинах, що викликає інтоксикацію, порушення роботи нервової та кровоносної систем.

Джерела ризику: контакт із залишками свинцевих пластин або пилом під час обслуговування акумуляторів, неправильна утилізація або переробка.

Літій (у літій-іонних акумуляторах):

Ризики: реакція з вологою, що може спричинити утворення корозійно активних продуктів, висока реакційна здатність при контакті з повітрям або водою.

3. Загальні ризики від електролітів та продуктів їх розпаду.

Токсичність: Деякі електроліти (наприклад, органічні розчинники в літій-іонних акумуляторах) можуть виділяти токсичні пари, які впливають на органи дихання.

Корозійна дія: Електроліти руйнують матеріали, з якими контактують (метали, пластмаси, тканини).

Викиди газів: У разі перегріву або пошкодження акумуляторів можливе виділення небезпечних газів, таких як водень, оксиди сірки чи фтористі сполуки.

Рекомендації для зменшення ризиків

1. *Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):* рукавички, захисні окуляри, хімічно стійкий одяг, захисні маски або респіратори для роботи з парами та аерозолями.

2. *Правильне поводження:* уникати проливів і витоків електролітів, використовувати герметичні приміщення з вентиляцією для роботи з акумуляторами.

3. *Навчання персоналу:* ознайомлення з правилами роботи з небезпечними речовинами, інструктаж з надання першої допомоги у разі контакту з хімічними речовинами.

4. *Утилізація:* дотримуватись правил утилізації акумуляторів для уникнення забруднення довкілля важкими металами та електролітами.

Робота з акумуляторами вимагає суворого дотримання техніки безпеки, щоб уникнути негативного впливу хімічних речовин на здоров'я працівників та навколишнє середовище.

4.1.2. Електричні небезпеки.

Робота з акумуляторними батареями пов'язана з ризиками, що виникають через високу напругу, струм, можливість короткого замикання або неправильне поводження з обладнанням. Електричні небезпеки можуть призводити до ураження електричним струмом, пошкодження обладнання, займання або вибуху.

Основні електричні небезпеки

1. Ураження електричним струмом.

Ризики: контакт із струмопровідними частинами акумулятора або кабелями, виникнення електричної дуги під час з'єднання чи роз'єднання елементів.

Наслідки: травми, включаючи опіки, фібриляцію серця, м'язові судоми, ураження внутрішніх органів.

2. Коротке замикання.

Ризики: з'єднання позитивного і негативного полюсів через провідник або металевий предмет, можливість утворення іскор, підвищення температури, що призводить до займання.

Наслідки: розгерметизація акумулятора, пошкодження обладнання, ризик займання чи вибуху.

3. Перевантаження струмом.

Ризики: надмірний струм під час заряджання або розряджання, використання акумулятора з неправильною конфігурацією або несумісним обладнанням.

Наслідки: перегрів, пошкодження внутрішніх елементів акумулятора, скорочення терміну служби або вихід із ладу.

4. Перевищення напруги.

Ризики: заряджання акумулятора до напруги, що перевищує допустиму для його типу, неправильне налаштування зарядного пристрою.

Наслідки: деградація матеріалів електродів, виділення газів, можливий вибух.

5. *Саморозряд і витік струму.*

Ризики: проблеми ізоляції або пошкодження корпусу акумулятора, старіння елементів, що призводить до втрати енергії та підвищення струму витоку.

Наслідки: нестабільність системи живлення, збільшення ризику короткого замикання.

6. *Електростатичний розряд (ESD).*

Ризики: накопичення статичного заряду на поверхні обладнання, виникнення розряду, що може пошкодити акумулятор або електроніку.

Наслідки: пошкодження чутливих компонентів, можливість займання.

Рекомендації для запобігання електричним небезпекам

1. *Забезпечення захисту від ураження струмом:* використовувати ізольовані інструменти та кабелі, забороняти роботу з акумуляторами без засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, взуття, килимки).

2. *Запобігання короткому замиканню:* уникати розташування металевих предметів поблизу акумуляторів, контролювати стан контактів та ізоляції.

3. *Правильне заряджання:* використовувати зарядні пристрої, що відповідають технічним характеристикам акумулятора, дотримуватися допустимих параметрів напруги та струму.

4. *Технічне обслуговування:* регулярно перевіряти стан ізоляції, корпусу акумулятора та з'єднувальних елементів, вчасно усувати пошкодження, тріщини або витік струму.

5. *Використання запобіжників і контролерів:* інтегрувати системи захисту від перевантаження струмом і короткого замикання, застосовувати

балансувачі для підтримки стабільності напруги в багатокомпонентних системах.

6. *Навчання персоналу:* інструктаж із безпечної роботи з акумуляторами, роз'яснення правил дій у разі електричних аварій.

7. *Електробезпека на робочому місці:* організація заземлення обладнання, дотримання належного рівня вологості та температури, щоб уникнути утворення конденсату.

Перша допомога при ураженні електричним струмом

1. Вимкнути джерело живлення (за можливості).
2. Вивільнити постраждалого від дії струму за допомогою діелектричних предметів.
3. Викликати швидку медичну допомогу.
4. Надати домедичну допомогу, включаючи проведення серцево-легеневої реанімації, якщо це необхідно.

Дотримання цих рекомендацій і заходів дозволяє значно зменшити ризик електричних небезпек, забезпечуючи безпечну експлуатацію акумуляторів.

4.1.3. Теплові та механічні ризики.

Робота з акумуляторами супроводжується потенційними тепловими та механічними ризиками, що виникають через нагрівання, механічні пошкодження або неправильне поводження. Ці ризики можуть призводити до пошкодження акумуляторів, аварійних ситуацій або травм персоналу.

Теплові ризики

1. *Перегрів акумуляторів.*

Причини: надмірне заряджання або розряджання акумулятора, порушення роботи охолоджувальних систем, висока температура навколишнього середовища.

Наслідки: зниження терміну служби акумулятора, вивільнення тепла, яке може спричинити розплавлення корпусу, тепловий розгін, що може призвести до займання або вибуху.

2. *Тепловий розгін (thermal runaway).*

Причини: внутрішнє коротке замикання, неправильна робота батарейного блоку або зарядного пристрою.

Наслідки: ескалація температури, що викликає хімічні реакції з виділенням газів, розгерметизація або займання акумулятора.

3. *Займання через вплив високих температур.*

Причини: контакт із нагрітими поверхнями або джерелами вогню, використання акумулятора за межами рекомендованого температурного діапазону.

Наслідки: ризик пожежі або виділення токсичних продуктів згоряння.

Механічні ризики

1. *Фізичні пошкодження.*

Причини: падіння акумулятора або удар, неправильне транспортування чи встановлення.

Наслідки: руйнування корпусу та витік електроліту, пошкодження внутрішніх компонентів, що може спричинити коротке замикання.

2. *Розгерметизація.*

Причини: удар, вібрація або прокол корпусу акумулятора, деформація через перегрів чи механічний тиск.

Наслідки: витік токсичних речовин (електроліту або газів), підвищення ризику займання чи вибуху.

3. *Вібрація та тряска.*

Причини: використання акумуляторів у транспортних засобах або промислових умовах.

Наслідки: зношення контактів, зниження електричної провідності, пошкодження елементів, що впливає на продуктивність і безпеку.

4. *Деформація акумуляторів:*

Причини: надмірний тиск на корпус або неправильне зберігання.

Наслідки: пошкодження внутрішніх структур і підвищення ризику аварії.

Рекомендації для запобігання тепловим і механічним ризикам

1. *Контроль температури:* використовувати акумулятори в межах рекомендованого температурного діапазону, забезпечити належну вентиляцію та охолодження під час роботи.

2. *Уникнення механічних пошкоджень:* транспортувати акумулятори в захищеній упаковці, забезпечити правильну фіксацію у транспортних засобах чи обладнанні.

3. *Правильне заряджання:* використовувати сумісні зарядні пристрої з функцією контролю температури та струму, уникати тривалого заряджання, яке може спричинити перегрів.

4. *Регулярне обслуговування:* перевіряти стан корпусу акумуляторів, відсутність тріщин чи деформацій, своєчасно замінювати пошкоджені акумулятори.

5. *Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):* носити рукавички та захисний одяг для уникнення контакту з електролітом у разі пошкодження.

6. *Інструктаж і навчання:* навчання персоналу правильному транспортуванню, монтажу та використанню акумуляторів, ознайомлення з планом дій у разі теплових або механічних аварій.

7. *Система моніторингу:* інтеграція датчиків температури, тиску та механічних впливів у великі акумуляторні системи для раннього виявлення проблем,

Допомога при аваріях.

1. *У разі теплового розгону:* негайно від'єднати акумулятор від джерела живлення, охолоджувати батарею (без контакту з водою, якщо це заборонено виробником).

2. *У разі механічного пошкодження:* уникати контакту з витоками електроліту; використовувати нейтралізатори для кислот чи лугів, ізолювати пошкоджений акумулятор від інших елементів,

4.2. Заходи з безпеки під час роботи з акумуляторами.

4.2.1. Безпечне поводження з хімічними речовинами в акумуляторах.

Акумулятори містять хімічні компоненти, які можуть бути небезпечними для здоров'я людини та довкілля. Дотримання правил безпечного поводження з такими речовинами є обов'язковим для запобігання аварійним ситуаціям, хімічним травмам і екологічному забрудненню.

Розглянемо основні хімічні речовини в акумуляторах та їх небезпеки

1. Свинцево-кислотні акумулятори.

- Сірчана кислота (H_2SO_4): викликає хімічні опіки, руйнує тканини при контакті, токсична при вдиханні парів.
- Свинцеві сполуки: накопичуються в організмі, токсичні для нервової системи, небезпечні для довкілля.

2. Літій-іонні акумулятори.

- Електроліт на основі органічних розчинників: легкозаймистий, токсичний при вдиханні парів.
- Солі літію (LiPF_6): при контакті з водою утворює токсичний газ (фтороводень).

3. Нікель-кадмієві акумулятори.

- Кадмій: високотоксичний, канцерогенний, накопичується в організмі, забруднює ґрунти та воду.
- Калій гідроксид (KOH): викликає хімічні опіки, небезпечний для слизових оболонок.

4. Натрієві акумулятори.

- Рідкий натрій або його сполуки: реактивний, може викликати займання при контакті з водою.

5. *Цинкові акумулятори.*

- Луги (гідроксид калію або натрію): агресивні до шкіри та тканин, можуть пошкоджувати очі.
- Цинкові сполуки: токсичні у великих концентраціях для довкілля.

Правила безпечного поводження

1. *Організація робочого місця.*

- Обладнати місце роботи системою вентиляції для видалення токсичних парів.
- Використовувати спеціальні контейнери для зберігання та транспортування акумуляторів.
- Забезпечити наявність нейтралізаторів для кислот і лугів.

2. *Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).*

- Носити кислотостійкі рукавички, захисні окуляри, фартухи або комбінезони.
- Використовувати респіратори при роботі з леткими сполуками.
- Забезпечувати доступ до мийних засобів для негайного промивання у разі контакту з хімікатами.

3. *Запобігання витокам.*

- Регулярно перевіряти герметичність акумуляторів.
- Не допускати пошкодження корпусу або контакту хімічних речовин із водою чи іншими реактивними матеріалами.

4. *Правильне транспортування.*

- Використовувати спеціальні контейнери з амортизацією для уникнення механічних пошкоджень.
- Транспортувати акумулятори у вертикальному положенні, щоб запобігти витоку електроліту.

5. *Зберігання.*

- Зберігати акумулятори в сухих, добре провітрюваних приміщеннях із температурою, рекомендованою виробником.
- Уникати контакту з легкозаймистими матеріалами.

- Забезпечити наявність знаків безпеки, що попереджають про хімічні небезпеки.

6. *Утилізація.*

- Передавати використані акумулятори в сертифіковані пункти збору або переробки.
- Заборонено зливати електроліт у каналізацію або викидати акумулятори на звалища.

Дії у разі аварії

1. *Контакт із хімічними речовинами:*

- Негайно промити уражене місце великою кількістю води.
- У разі потрапляння хімікатів в очі – промивати протягом 15 хвилин і звернутися до лікаря.

2. *Витік електроліту:*

- Обробити місце розливу нейтралізатором (для кислот – лугами, для лугів – слабкими кислотами, наприклад оцтовою).
- Використовувати абсорбенти для очищення і запобігати потраплянню у каналізацію.

3. *Займання:*

- Використовувати порошкові вогнегасники або пісок.
- Не застосовувати воду для гасіння літєвих або натрієвих акумуляторів.

4. *Інформування:*

- Негайно повідомити відповідальних осіб про інцидент.
- Викликати екстрені служби у разі серйозної аварії.

Навчання персоналу

- Регулярно проводити інструктаж із правил поводження з хімічними речовинами.
- Відпрацьовувати дії в аварійних ситуаціях.
- Забезпечувати доступ до інструкцій і паспортів безпеки хімічних речовин (MSDS).

4.2.2. Використання засобів індивідуального захисту.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) є обов'язковими для забезпечення безпеки працівників при роботі з акумуляторами, які містять хімічно активні речовини та створюють ризики електричних, теплових і механічних пошкоджень. Використання ЗІЗ запобігає травмам, отруєнням і опікам.

Основні засоби індивідуального захисту

1. *Захист шкіри та рук.*

- *Рукавички:* виготовлені з хімічно стійких матеріалів (латекс, нітрil, неопрен), використовуються для захисту від кислот, лугів та електроліту.
- *Захисний одяг:* кислотостійкий комбінезон або фартух із хімічно стійких матеріалів, довгий рукав для захисту рук і тулуба.

2. *Захист очей та обличчя.*

- *Захисні окуляри:* щільно прилягають до обличчя та захищають очі від бризок кислот, лугів чи електроліту.
- *Щиток для обличчя:* додатковий захист при роботі з великими об'ємами хімічних речовин або під час заряджання акумуляторів.

3. *Захист органів дихання.*

- *Респіратори:* використовуються для захисту від випарів кислот (сірчаної кислоти) або органічних розчинників, обираються залежно від характеру забруднень (фільтри для кислотних газів, аерозолів тощо).

4. *Захист ніг.*

Використання хімічно стійкого взуття, з гуми або іншого стійкого до хімічних речовин матеріалу, повинно мати протиковзку підошву.

5. *Захист від електричного струму.*

- *Діелектричні рукавички:* використовуються при роботі з акумуляторами під високою напругою.
- *Діелектричне взуття або килимки:* Забезпечують ізоляцію від струмоведучих елементів.

Правила використання засобів індивідуального захисту

1. *Вибір ЗІЗ:* враховувати тип акумуляторів та характер виконуваних робіт (хімічні ризики, електричні чи механічні), перевіряти сертифікати відповідності ЗІЗ стандартам безпеки.
2. *Перед використанням:* перевіряти цілісність рукавичок, окулярів, респіраторів тощо, впевнитись, що засоби правильно підігнані за розміром і надійно закріплені.
3. *Під час роботи:* постійно використовувати ЗІЗ, навіть при виконанні короточасних робіт, уникати контакту забрудненого ЗІЗ із відкритими ділянками шкіри чи обличчя.
4. *Після роботи:* знезаражувати або очищати ЗІЗ відповідно до інструкцій виробника, утилізувати одноразові засоби захисту у спеціальні контейнери.
5. *Заміна ЗІЗ:* замінювати ЗІЗ, якщо вони пошкоджені, зношені або втратили свої захисні властивості.

Наслідки недотримання правил використання ЗІЗ

1. *Хімічні опіки та отруєння:* контакт шкіри чи слизових оболонок із кислотами, лугами або токсичними парами.
2. *Електричні травми:* ураження електричним струмом через відсутність ізолювальних засобів.
3. *Механічні пошкодження:* порізи, удари або травми через неналежний захист рук чи ніг.

Використання ЗІЗ є ключовим елементом безпеки при роботі з акумуляторами. Правильний підбір і дотримання правил їх експлуатації забезпечують збереження здоров'я працівників і знижують ризик виникнення аварійних ситуацій.

4.2.3. Технічні засоби забезпечення безпеки.

Технічні засоби забезпечення безпеки мінімізують ризики, пов'язані з експлуатацією, зберіганням, заряджанням і транспортуванням акумуляторів.

Вони створюють бар'єри між небезпекою і працівником, автоматизують контроль небезпечних процесів та забезпечують належні умови роботи.

Основні технічні засоби забезпечення безпеки

1. Засоби захисту від електричних ризиків.

- *Ізоляційні матеріали:* ізоляція струмоведучих частин акумуляторів і обладнання, використання діелектричних килимків, рукавичок та взуття.
- *Захисні кожухи:* металеві або пластикові екрани для запобігання випадковому контакту з електричними елементами.
- *Автоматичні вимикачі та запобіжники:* захищають від перевантаження, короткого замикання та інших аварійних ситуацій.
- *Системи моніторингу напруги та струму:* контролюють параметри роботи акумуляторів і забезпечують автоматичне відключення при відхиленнях.

2. Системи вентиляції та аспірації.

- *Місцеві витяжки:* видаляють токсичні випари кислот, лугів чи органічних розчинників у місцях роботи.
- *Примусова вентиляція:* забезпечує обмін повітря в приміщеннях зберігання або заряджання акумуляторів.
- *Системи очищення повітря:* фільтри для уловлювання парів кислот і інших токсичних речовин.

3. Засоби запобігання хімічним ризикам.

- *Контейнери для зберігання:* хімічно стійкі резервуари або ящики для акумуляторів, контейнери з амортизацією для транспортування.
- *Системи утримання розливів:* піддони для збору рідин у разі витoku електроліту.
- *Станції нейтралізації:* обладнання для нейтралізації кислот і лугів (наприклад, содовий розчин для кислот).

4. Тепловий контроль.

- *Системи охолодження:* захищають акумулятори від перегріву під час роботи чи заряджання.

- *Теплозахисні екрани:* запобігають нагріванню акумуляторів від зовнішніх джерел тепла.
- *Датчики температури:* моніторять температуру акумуляторів для попередження теплових аварій.

5. Системи захисту від механічних ризиків.

- *Антивібраційні кріплення:* знижують вплив вібрації на акумулятори під час експлуатації чи транспортування.
- *Амортизувальні оболонки:* захищають корпус акумуляторів від ударів і механічних пошкоджень.

6. Системи пожежної безпеки.

- *Вогнегасники:* порошкові або вуглекислотні вогнегасники для гасіння пожеж акумуляторів, використання спеціальних вогнегасних засобів для літієвих акумуляторів.
- *Автоматичні системи пожежогасіння:* системи з вогнегасним газом або піною в місцях зберігання акумуляторів.
- *Теплові датчики:* сигналізують про підвищення температури, що може свідчити про займання.

7. Системи безпечного заряджання.

- *Інтелектуальні зарядні пристрої:* автоматично контролюють рівень зарядки, напругу та струм.
- *Захист від перенапруги:* перериває заряджання при небезпечному перевищенні напруги.
- *Датчики витоку газів:* сигналізують про виділення водню чи інших газів при заряджанні.

8. Сигнальні системи.

- *Індикатори стану:* відображають параметри акумуляторів (напруга, заряд, температура).
- *Аварійна сигналізація:* оповіщує про небезпечні умови роботи (витік електроліту, перегрів, коротке замикання).

Організація безпечного робочого середовища

1. Розміщення акумуляторів.

- Використовувати спеціальні приміщення з контрольованими умовами (температура, вентиляція).
- Уникати близькості легкозаймистих матеріалів.

2. Знаки безпеки.

- Розміщувати попереджувальні знаки про хімічну, електричну або теплову небезпеку.
- Облаштувати маршрути евакуації з відповідною розміткою.

3. Інструктаж і навчання.

- Регулярне навчання персоналу з використання технічних засобів безпеки.
- Ознайомлення з правилами роботи із системами контролю та захисту.

Переваги використання технічних засобів безпеки

- Зменшення ризику аварійних ситуацій.
- Захист здоров'я та життя персоналу.
- Підвищення ефективності роботи завдяки автоматизації процесів контролю.
- Збереження обладнання та запобігання пошкодженням акумуляторів.

Технічні засоби безпеки є невід'ємною частиною будь-якого робочого процесу, що включає взаємодію з акумуляторами. Їх правильне впровадження та використання забезпечують надійний захист від основних ризиків і підтримують безпечні умови роботи.

4.3. Охорона праці під час експлуатації акумуляторів.

4.3.1. Правила заряджання та розряджання акумуляторів.

Дотримання правил заряджання та розряджання акумуляторів є важливим для забезпечення їх безпечної експлуатації, подовження терміну служби і запобігання аварійним ситуаціям. Ці правила залежать від типу

акумулятора, але загальні рекомендації можна застосовувати до більшості технологій.

Загальні правила заряджання акумуляторів

1. Підготовка до заряджання.

- Перевірити стан акумулятора (відсутність пошкоджень, витоків електроліту, корозії).
- Впевнитися, що зарядний пристрій відповідає технічним характеристикам акумулятора.
- Забезпечити належну вентиляцію в приміщенні для відведення газів (особливо для свинцево-кислотних акумуляторів).

2. Підключення.

- Підключати акумулятор до зарядного пристрою правильною полярністю (позитивний до позитивного, негативний до негативного).
- Вмикати зарядний пристрій лише після перевірки підключення.

3. Режим заряджання.

- Використовувати рекомендований струм зарядки, зазвичай це $0.1C$ (10% від номінальної ємності) або за інструкцією виробника.
- Уникати надмірного заряджання, яке може призвести до перегріву чи деградації матеріалів.
- Для літій-іонних акумуляторів використовувати зарядні пристрої з функцією контролю напруги і струму.

4. Контроль параметрів.

- Моніторити температуру акумулятора, особливо під час заряджання.
- Перевіряти напругу та відключати зарядний пристрій, якщо досягнуто максимального рівня напруги (наприклад, 4.2 В для літій-іонних акумуляторів).

5. Закінчення заряджання.

- Вимикати зарядний пристрій перед відключенням акумулятора.
- Не залишати акумулятор підключеним до зарядного пристрою тривалий час після завершення заряджання (особливо для літійєвих акумуляторів).

Загальні правила розрядження акумуляторів

1. Дотримання рекомендованого струму.

- Використовувати акумулятор при струмах, які не перевищують зазначені виробником значення.
- Уникати надмірно високих струмів розрядження, які можуть спричинити перегрів чи пошкодження елементів.

2. Контроль напруги.

- Не допускати глибокого розрядження: свинцево-кислотні акумулятори – не нижче 1.75–1.8 В на елемент, літій-іонні акумулятори – не нижче 2.5–3.0 В на елемент.
- Використовувати захисні плати (BMS), які автоматично відключають акумулятор при досягненні мінімальної напруги.

3. Температурний режим.

- Уникати розрядження при екстремально низьких (-20°C) або високих ($+60^{\circ}\text{C}$) температурах.
- Забезпечити охолодження при тривалому розрядженні з високими струмами.

4. Перерва між циклами.

- Давати акумулятору відпочинок після розрядження перед зарядкою.
- Уникати багаторазових циклів без пауз, щоб уникнути перегріву.

Особливості заряджання та розрядження різних типів акумуляторів

1. Свинцево-кислотні акумулятори.

- Заряджати в режимі постійного струму (CC) з переходом на постійну напругу (CV).
- Уникати глибокого розрядження, яке може викликати сульфатацію пластин.
- Обов'язково перевіряти рівень електроліту та доливати дистильовану воду за необхідності.

2. Літій-іонні акумулятори.

- Заряджати в режимі CC/CV.

- Використовувати зарядні пристрої з функціями захисту від перезаряджання та глибокого розряджання.
- Не зберігати повністю заряджений акумулятор тривалий час.

3. Нікель-кадмієві (NiCd) та нікель-металгідридні (NiMH).

- Уникати часткових заряджання, які можуть спричинити «ефект пам'яті».
- Заряджати при постійному струмі, уникаючи перегріву.
- Періодично проводити глибокий розряд для відновлення повної ємності.

4. Суперконденсатори.

- Швидке заряджання та розряджання без особливих обмежень.
- Використовувати спеціалізовані контролери для уникнення надмірного заряджання.

Додаткові рекомендації

- Завжди дотримуватися інструкцій виробника акумулятора та зарядного пристрою.
- Працювати у добре вентильованих приміщеннях.
- Уникати прямого контакту з електролітом і не допускати його витоків.
- Забезпечувати регулярне технічне обслуговування акумуляторів та зарядного обладнання.

Дотримання цих правил забезпечить безпечну та ефективну роботу акумуляторів, а також дозволить зберегти їх ресурс протягом тривалого часу.

4.3.2. Попередження аварійних ситуацій та дії у разі їх виникнення.

Аварійні ситуації, що виникають при роботі з акумуляторами, можуть бути пов'язані з електричними, хімічними, механічними, тепловими або пожежними ризиками. Правильна організація роботи, дотримання правил техніки безпеки, застосування відповідного обладнання та навчання персоналу допомагають уникнути таких ситуацій або ефективно їх ліквідувати.

Попередження аварійних ситуацій

1. Організація безпечного робочого середовища.

- Забезпечення належної вентиляції у приміщеннях для заряджання та зберігання акумуляторів.
- Використання спеціалізованих контейнерів для зберігання і транспортування.
- Уникання перевантаження електричних ланцюгів і правильне підключення акумуляторів.

2. Технічні засоби безпеки.

- Використання пристроїв моніторингу напруги, струму та температури.
- Установлення автоматичних вимикачів та захисних реле для попередження коротких замикань.
- Оснащення приміщень системами пожежогасіння та аварійної сигналізації.

3. Правильна експлуатація акумуляторів.

- Дотримання рекомендованих режимів заряджання та розряджання.
- Уникання глибокого розряджання, перезаряджання та перегріву.
- Регулярний контроль стану електроліту у свинцево-кислотних акумуляторах.

4. Навчання персоналу.

- Проведення інструктажів щодо правил роботи з акумуляторами.
- Ознайомлення з діями у разі виникнення аварійних ситуацій.

5. Попередження хімічних небезпек.

- Використання засобів індивідуального захисту (рукавички, окуляри, спецодяг).
- Дотримання правил поводження з кислотами, лугами та іншими речовинами.
- Оперативне видалення розлитого електроліту та його нейтралізація.

Дії у разі виникнення аварійних ситуацій

1. Електрична аварія (коротке замикання, перевантаження):

Негайні дії: відключити живлення, перевірити стан ізоляції та контакти.

Подальші заходи: викликати електрика для перевірки системи, уникати повторного використання пошкодженого акумулятора.

2. Витік електроліту (кислоти, луги):

Негайні дії: зупинити роботу, використовувати нейтралізуючі засоби (наприклад, содовий розчин для кислоти), вентилювати приміщення.

Перша допомога: у разі потрапляння на шкіру – промити великою кількістю води, у разі потрапляння в очі – негайно промити очі і звернутися до лікаря.

3. Перегрів або загоряння акумулятора:

Негайні дії: виключити джерело струму, використовувати вогнегасники (порошкові, вуглекислотні, спеціальні для літєвих акумуляторів), евакуювати персонал із зони займання.

Подальші заходи: дочекатися охолодження акумулятора перед утилізацією, провести розслідування причини перегріву чи займання.

4. Механічне пошкодження акумулятора:

Негайні дії: припинити експлуатацію, ізолювати пошкоджений акумулятор у спеціальний контейнер.

Подальші заходи: утилізувати відповідно до вимог екологічної безпеки.

5. Виділення газів (водню, токсичних речовин):

Негайні дії: провітрити приміщення, зупинити заряджання акумулятора.

Попередження вибуху: уникати відкритого вогню та іскроутворення в зоні виділення газів.

6. Ураження електричним струмом:

Негайні дії: відключити потерпілого від джерела струму (за можливості, не торкаючись безпосередньо), викликати медичну допомогу,

надати першу допомогу (штучне дихання, непрямий масаж серця, якщо необхідно).

Загальні рекомендації у разі аварій:

- Інформувати керівництво та відповідальних осіб.
- Не допускати необізнаних працівників у зону аварії.
- Використовувати аварійні комплекти (нейтралізатори, сорбенти, рукавички, респіратори).
- Дотримуватися правил евакуації та організації безпеки.

Профілактика повторних аварій

- Проведення технічного огляду обладнання.
- Аналіз причин аварії та впровадження запобіжних заходів.
- Регулярне навчання персоналу та оновлення інструкцій з охорони праці.

Завчасна підготовка, правильне реагування та системний підхід до безпеки допоможуть уникнути серйозних наслідків та забезпечити надійну експлуатацію акумуляторів.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена аналізу характеристик акумуляторів різних типів як накопичувачів електроенергії, що є ключовим елементом сучасних енергетичних систем. У роботі розглянуто принципи роботи акумуляторів, їх технічні характеристики та фактори, що впливають на ефективність. Здійснено класифікацію та порівняльний аналіз найпоширеніших типів акумуляторів: свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, нікель-металгідридних, літій-іонних, літій-залізо-фосфатних, літій-титанатних, натрієвих, цинкових та суперконденсаторів. Основна увага приділялася таким параметрам, як енергетична щільність, вартість, циклічність, термін служби, робоча напруга та безпека.

Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

1. Розглянуто принципи роботи акумуляторів, включаючи електрохімічні процеси, що лежать в основі їхньої роботи, та основні технічні характеристики, такі як ємність, напруга, внутрішній опір, енергетична щільність та циклічність.

2. Проаналізовано властивості та особливості найбільш поширених типів акумуляторів, включаючи свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, нікель-металгідридні, літій-іонні, літій-залізо-фосфатні, літій-титанатні, натрієві, цинкові та суперконденсатори.

3. Проведено табличне та графічне порівняння різних типів акумуляторів за ключовими параметрами: енергетична щільність, вартість, циклічність, термін служби та безпека.

4. Встановлено, що для рухомих об'єктів найкраще підходять літій-іонні акумулятори завдяки їхній високій енергетичній щільності, тоді як для стаціонарних систем оптимальними є літій-залізо-фосфатні та літій-титанатні акумулятори, що характеризуються високою циклічністю та безпекою.

5. Виявлено основні чинники, які впливають на ефективність та довговічність акумуляторів, зокрема температура, глибина розряду, швидкість заряджання/розряджання та умови зберігання.

6. Сформульовано рекомендації щодо вибору типу акумулятора залежно від сфери застосування та умов експлуатації. Особливу увагу приділено питанням безпеки та охорони праці при роботі з акумуляторними батареями.

Результати дослідження дозволили визначити, що літій-іонні акумулятори є оптимальними для рухомих об'єктів завдяки високій енергетичній щільності та доступній вартості. Для стаціонарних систем запропоновано використовувати літій-титанатні акумулятори, які вирізняються високою циклічністю, тривалим терміном служби, безпекою і самою низькою вартістю одного циклу.

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору типу акумулятора залежно від умов експлуатації. Отримані висновки можуть бути корисними для розробки ефективних енергосистем, оптимізації енергоспоживання та впровадження інноваційних технологій у сфері зберігання енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Таблиця напруги Lifepo4 12 В 24 В 48 В і таблиця напруги Lifepo4 стану заряду. *Kamada Power* [онлайн]. 10 березня 2024 [дата звернення 19 грудня 2024]. Режим доступу: <https://uk.kmdpower.com/news/lifepo4-voltage-state-of-charge-table/>
2. Feng, Fei & Lu, Rengui & Zhu, Chunbo. (2014). A Combined State of Charge Estimation Method for Lithium-Ion Batteries Used in a Wide Ambient Temperature Range. *Energies*. 7. 3004-3032. 10.3390/en7053004.
3. Поширені типи акумуляторів, які найчастіше використовуються для накопичення електроенергії. *Правильне електроживлення* [онлайн]. 06.09.2022 [дата звернення 19 грудня 2024]. Режим доступу: <https://sun-energy.com.ua/articles/typy-akumulyatoriv>
4. Нікель-кадмієві акумулятори. *ТОВ «Автономні Джерела Струму»* [онлайн]. [дата звернення 19 грудня 2024]. Режим доступу: <https://ads.ua/ua/nikel-kadmievye-akkumulyatory>
5. Нікель-метал-гідридний акумулятор. (2024, жовтня 21). *Вікіпедія*. Процитовано 01:47, грудня 21, 2024 з https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9D%D1%96%D0%BA%D0%B5%D0%BB%D1%8C-%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB-%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BA%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80&oldid=43732513.
6. Шембель О. М., Білогуров В. А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем // Сучасна спеціальна техніка : науково-практичний журнал. — 2009. — № 2 (17). — С. 66-86.
7. Типи літій-іонних. *DS New Energy* [онлайн]. [дата звернення 19 грудня 2024]. Режим доступу: <https://ua.dsisolar.com/info/types-of-lithium-ion-32634866.html>

8. Воронін В. П. "Електрохімічні джерела струму". Київ: Наукова думка, 2019.
9. Linden D., Reddy T. B. "Handbook of Batteries". McGraw-Hill, 4th Edition, 2011.
10. Bruce P. G., Scrosati B., Tarascon J.-M. "Nanomaterials for Rechargeable Lithium Batteries". Nature Materials, 2008.
11. Манойлов В. М. "Сучасні тенденції розвитку акумуляторних систем". Енергетика і електрифікація, 2021.
12. ДСТУ EN 61427-1:2016. "Акумуляторні батареї для систем зберігання енергії".
13. BloombergNEF. Lithium-Ion Battery Price Trends and Market Analysis [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://about.bnef.com>. — Дата звернення: 21.12.2024.
14. Tesla Energy. Powerwall та Megapack як сучасні рішення для зберігання енергії [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.tesla.com/energy>. — Дата звернення: 21.12.2024.
15. SAFT Batteries. Інформація про акумуляторні системи [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.saftbatteries.com>. — Дата звернення: 21.12.2024.
16. NextEra Energy. Системи зберігання енергії для енергомереж [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.nexteraenergy.com>. — Дата звернення: 21.12.2024.