

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АТ-94.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-2

Олег ЧЕРЕПАХА

2025

Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу Міністерства освіти і науки України
Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра автомобільного транспорту

Черепача Олег Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.314
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Дослідження експлуатаційних показників ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та їх вплив на термін служби в умовах Станції технічного обслуговування "Арсен - Авто"
(назва роботи)

Автомобільний транспорт
(назва освітньої програми)

274-Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

О.О. Черепача

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Мельник Василь Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Криштопа С.І.

(підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Консультанти по магістерській роботі із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	доц. Прунько І.Б.		

7. Дата видачі завдання 28.11.2025 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	4.1 ВСТУП. 4.2 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТО «АРСЕН АВТО». 4.2.1 Загальні дані про СТО «АРСЕН АВТО».	01.12.2025 р.	
2	4.3 ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ. 4.3.1 Огляд стану використання свинцево-кислотних АКБ. 4.3.2 Стан використання літій-іонних АКБ.	05.12.2025 р.	
3	4.4 ОСНОВНІ ВИДИ АКБ ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ НА АВТОМОБІЛЯХ. ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ. 4.4.1 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків свинцево-кислотних АКБ. 4.4.2 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків літій-іонних АКБ.	08.12.2025 р.	
4	4.5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ. 4.5.1 Типи свинцево-кислотних АКБ, їх класифікація, принцип роботи, відмінності.	11.12.2025 р.	
5	4.5.2 Рекомбінація при заряді VRLA – AGM та GEL акумуляторів 4.5.3 Дослідження стійкості АКБ до високої температури в прискореному циклі розряду.	15.12.2025 р.	
6	4.6 ВИСНОВКИ. 4.7 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ. 4.8 ДОДАТОК А – ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ.	19.12.2025 р.	
7	Готовність роботи до попереднього захисту.	19.12.2025 р.	

Студент _____ **Олег ЧЕРЕПАХА** _____
(Особистий підпис) (Розшифровка підпису)

Керівник _____ **Василь МЕЛЬНИК** _____
(Особистий підпис) (Розшифровка підпису)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі досліджено експлуатаційні показники ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та їх вплив на термін служби в умовах станції технічного обслуговування "Арсен - Авто".

За результатами проведених досліджень, на сьогодні широко використовуються свинцево-кислотні (AGM, GEL) акумулятори та літій-іонні серед яких широкого поширення набули літій-кобальтові, літій-марганцеві та літій-феррофосфатні.

Результати досліджень показали, що за температури 50 °С стійкість АКБ до розряду значно вища в акумуляторах GEL. За результатами досліджень, 350 циклів заряду-розряду акумуляторі GEL зменшило час розряду на 44,3 % у порівнянні з початковим часом. Для акумулятора AGM 12V 100Ah при 30 циклах заряду-розряду час розряду вже знизився 49,8 %, що свідчить про погану стійкість AGM акумуляторів до високих температур.

Дослідження циклічного ресурсу акумуляторів проведеного за температури 20 °С показали, що зростання глибини розряду акумуляторної батареї як AGM та GEL призводить до значного скорочення циклів заряду-розряду.

Щоб мінімізувати втрату ємності, акумулятори слід зберігати в прохолодному, сухому місці з рівнем заряду не нижче 50% для літійєвих або 80% для свинцево-кислотних батарей.

Ключові слова: автомобіль, акумуляторна батарея, виробництво, експлуатація, ємність, зберігання, температура.

ABSTRACT

The master's thesis investigated the operational performance indicators of lead-acid batteries and their impact on the service life in the conditions of the "Arsen - Auto" service station.

According to the results of the research, today lead-acid (AGM, GEL) batteries and lithium-ion batteries are widely used, among which lithium-cobalt, lithium-manganese and lithium-ferrophosphate batteries are widely used.

The results of the research showed that at a temperature of 50 °C, the battery resistance to discharge is significantly higher in GEL batteries. According to the research results, 350 charge-discharge cycles of the GEL battery reduced the discharge time by 44.3% compared to the initial time. For the AGM 12V 100Ah battery, at 30 charge-discharge cycles, the discharge time has already decreased by 49.8%, which indicates the poor resistance of AGM batteries to high temperatures.

Studies of the cyclic life of batteries conducted at a temperature of 20 °C showed that an increase in the depth of discharge of a battery, both AGM and GEL, leads to a significant reduction in charge-discharge cycles.

To minimize capacity loss, batteries should be stored in a cool, dry place with a charge level of at least 50% for lithium batteries or 80% for lead-acid batteries.

Keywords: car, battery, production, operation, capacity, storage, temperature.

ABSTRAKT

Die Masterarbeit untersuchte die Betriebskennzahlen von Blei-Säure-Batterien und deren Einfluss auf die Lebensdauer unter den Bedingungen der Werkstatt „Arsen - Auto“.

Den Ergebnissen zufolge sind Blei-Säure-Batterien (AGM, GEL) und Lithium-Ionen-Batterien weit verbreitet, darunter Lithium-Kobalt-, Lithium-Mangan- und Lithium-Eisenphosphat-Batterien.

Die Untersuchung ergab, dass GEL-Batterien bei einer Temperatur von 50 °C einen deutlich höheren Entladewiderstand aufweisen. Nach 350 Lade-Entlade-Zyklen reduzierte sich die Entladezeit der GEL-Batterie im Vergleich zum Ausgangswert um 44,3 %. Bei der 12-V-100-Ah-AGM-Batterie sank die Entladezeit bereits nach 30 Lade-Entlade-Zyklen um 49,8 %, was auf die geringe Hitzebeständigkeit von AGM-Batterien hinweist.

Untersuchungen zur Zyklenlebensdauer von Batterien bei einer Temperatur von 20 °C zeigten, dass eine Erhöhung der Entladetiefe sowohl bei AGM- als auch bei GEL-Batterien zu einer deutlichen Reduzierung der Lade-Entlade-Zyklen führt.

Um den Kapazitätsverlust zu minimieren, sollten Batterien kühl und trocken gelagert werden, mit einem Ladezustand von mindestens 50 % (Lithiumbatterien) bzw. 80 % (Bleiakkumulatoren).

Schlüsselwörter: Auto, Batterie, Produktion, Betrieb, Kapazität, Lagerung, Temperatur

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТО «АРСЕН АВТО».....	9
1.1 Загальні дані про СТО «АРСЕН АВТО».....	9
2 ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	13
2.1 Огляд стану використання свинцево-кислотних АКБ.....	13
2.2 Стан використання літій-іонних АКБ.....	15
3 ОСНОВНІ ВИДИ АКБ ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ НА АВТОМОБІЛЯХ. ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ.....	20
3.1 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків свинцево-кислотних АКБ...20	20
3.2 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків літій-іонних АКБ.....22	22
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ.....	27
4.1 Типи свинцево-кислотних АКБ, їх класифікація, принцип роботи, відмінності.....	27
4.2 Рекомбінація при заряді VRLA – AGM та GEL акумуляторів.....	36
4.3 Дослідження стійкості АКБ до високої температури в прискореному циклі розряду.....	38
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТОК А – ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ.....	58

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження експлуатаційних показників ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та їх вплив на термін служби в умовах Станції технічного обслуговування "Арсен - Авто"	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Черепаха О.О.						
Перевір.		Мельник В.М.					6	77
Реценз.						ІФНТУНГ, АТм-24-2		
Н. контр.		Прунько І.Б.						
Затверд.		Криштопа С.І.						

ВСТУП

Актуальність. Акумулятор – це пристрій, що зберігає енергію для подальшого використання. Він працює завдяки хімічним реакціям: коли його заряджають, електрична енергія перетворюється на хімічну. Потім, за розряджання, ця хімічна енергія знову перетворюється на електричну.

Потреба в акумуляторах залежить від їх призначення: для автономного живлення побутових приладів потрібна ємність, розрахована за формулою, яка враховує сумарну потужність та необхідний час роботи.

Для автомобілів, підбір здійснюється за об'ємом двигуна та рекомендаціями виробника.

Сучасні автомобільні акумулятори мають термін служби до 5 років, але правильний догляд може продовжити його до 7-10 років.

Мета роботи полягає в теоретичних та експериментальних дослідженнях експлуатаційних показників ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та забезпечення підвищення їх терміну служби.

Завдання дослідження:

1. Виконати аналіз літературних джерел у сфері експлуатації та утилізації АКБ.
2. Описати будову та принцип роботи основних типів АКБ їх переваги та недоліки.
3. Дослідити експлуатаційні показники ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та їх вплив на термін служби.
4. Узагальнити та сформулювати висновки.

Об'єкт дослідження – свинцево-кислотні акумуляторні батареї виготовлені за технологією AGM та GEL.

Предмет дослідження – вплив експлуатаційних показників роботи свинцево-кислотних АКБ на їх термін служби.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Здійснено аналіз літературних джерел у сфері експлуатації та утилізації АКБ.
2. Описано будову та принцип роботи основних типів АКБ їх переваги та недоліки.
3. Досліджено експлуатаційні показники ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та встановлено їх вплив на термін служби.
4. Узагальнено та сформульовано висновки.

Наукова новизна. Теоретично та експериментально досліджено вплив умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ та встановлено їх вплив на термін служби.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження впливу умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ.

Особистий внесок автора. Автором визначено основні завдання роботи, обрано та опановано методи їх вирішення, підібрано та опрацьовано літературні джерела, здійснено аналіз і теоретичне обґрунтування зібраного матеріалу, в тому числі досліджено вплив умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ, узагальнено та сформульовано висновки.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТО «АРСЕН АВТО»

1.1 Загальні дані про СТО «Арсен Авто».

СТО «Арсен Авто» надає професійні послуги з ремонту та обслуговування автомобілів. Для якісної діагностики електронних систем застосовується найсучасніше обладнання, що дозволяє з точністю визначити вузли й агрегати, що вимагають термінової заміни.

На СТО «Арсен Авто» працюють тільки професіонали, кваліфікація яких підтверджена багаторічним досвідом успішної роботи і великою кількістю постійних клієнтів.

СТО розміщено на окремій огороженій території по вул. Тисменицькій, 249 б, м. Івано-Франківськ. Розташування підприємства є дуже зручним з погляду ефективності, оскільки поруч рух великого потоку транспортних засобів по вул. Тисменицькій (рис. 1.1).

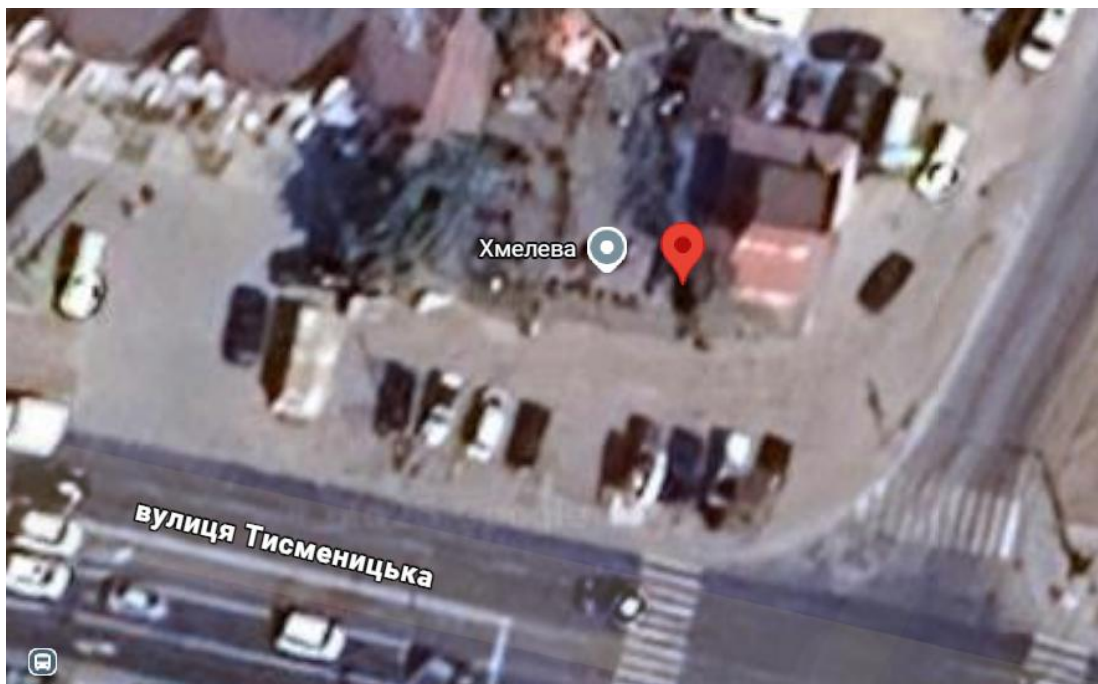


Рисунок 1.1 – Місце розташування СТО «Арсен Авто»

Зона очікування автомобілів на території розташована з врахуванням умов заїзду в зону обслуговування автомобілів та виїзду їх у зону зберігання.

Схема загальної організаційної структури наведена на рис. 1.2.

					МР.АТ-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

На станції технічного обслуговування працюють: 8 працівники, 1 чол. адміністративні працівники, 7 чол. виробничий персонал.

Директор крім виконання своїх прямих обов'язків повинен координувати дії своїх підлеглих, а також стежити за якістю виконання робіт, оформляти листок обліку, здійснюють загальне керівництво роботою виробничих ділянок, регулюють їх діяльність. Директор організовує видачу премій в залежності від обсягу та якості виконаної роботи, стежить за правильністю витрат матеріалів і робочих ресурсів.

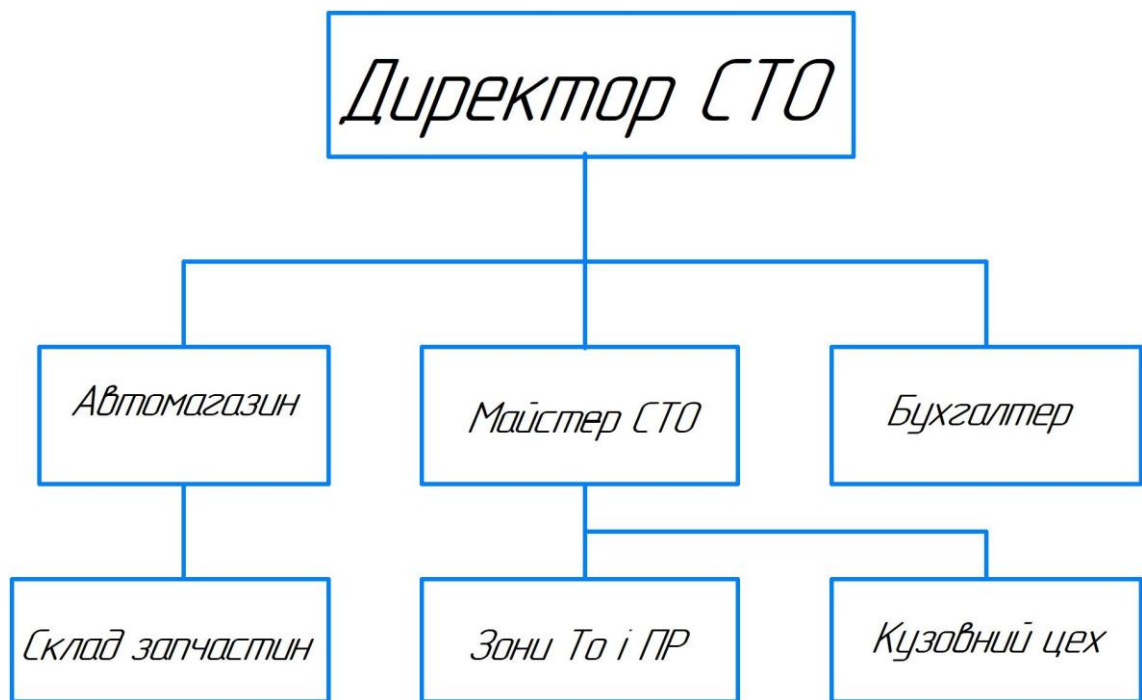


Рисунок 1.2 – Схема загальної структури управління СТО «Арсен Авто»

В організації чіткого розділені повноваження. Кожен співробітник виконує конкретно позначені види діяльності, зазначені в трудовому договорі.

Структура управління та штатна чисельність працівників визначаються директором станції в залежності від обсягу, характеру та складності виконуваної роботи. Управління може бути реорганізовано або ліквідовано на підставі наказу директора станції.

Якщо при прийманні і в процесі діагностики автомобіля будуть виявлені несправності, що загрожують безпеці руху, то вони підлягають усуненню на СТО за узгодженням з власником автомобіля.

Після приймання автомобіль спрямовують на відповідну виробничу ділянку. У випадку зайнятості робочих постів, на яких повинні виконуватися роботи згідно наряд-замовлення, автомобіль поступає на автомобілемісце очікування або зберігання, а звідти, у міру звільнення постів, прямує на ту або іншу виробничу ділянку. Після завершення робіт автомобіль поступає на ділянку видачі.

При оформленні замовлення – наряду СТО водночас складає акт комплекtnості транспортного засобу. При видачі ТЗ з ТО і ремонту замовник повинен перевірити комплекtnість одержуваного засобу згідно з актом.

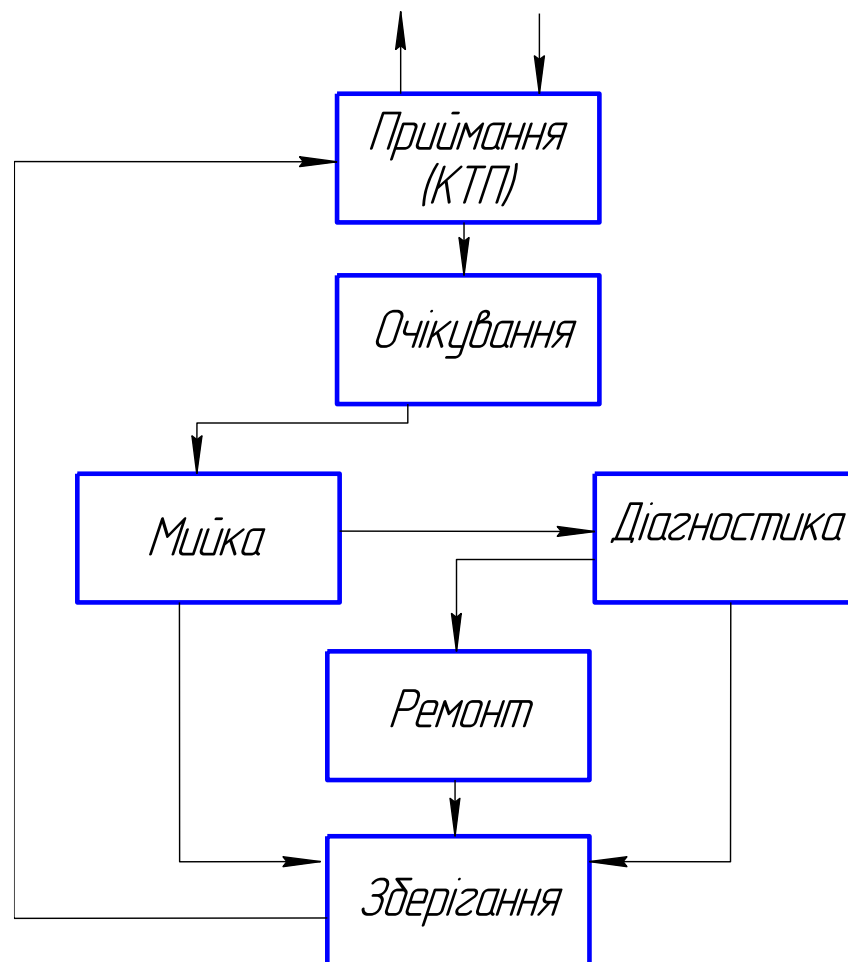


Рисунок 1.3 – Схема технологічного процесу на ТО і ПР на СТО «Арсен Авто»

Після приймання автомобіль спрямовують на відповідну виробничу ділянку. У випадку зайнятості робочих постів, на яких повинні виконуватися роботи згідно наряд-замовленню, автомобіль поступає на автомобіле-місце очікування або зберігання, а звідти, у міру звільнення постів, прямує на ту або іншу виробничу ділянку. Після завершення робіт автомобіль поступає на ділянку видачі.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

2 ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Огляд стану використання свинцево-кислотних АКБ.

Широке споживання викопного палива може призвести до глобальної енергетичної кризи [1, 2]. Крім того, екологічні наслідки використання викопного палива, такі як забруднення повітря, парниковий ефект та кислотні дощі, становлять значну загрозу для крихкої екосистеми Землі [3-5].

Для вирішення цих проблем ідеальним рішенням стало впровадження відновлюваних джерел енергії. Відновлювані джерела енергії, включаючи сонячну енергію, енергію вітру, геотермальну енергію та енергію припливів, можуть бути використані для виробництва електроенергії для споживання людиною. У цьому контексті пристрої накопичення енергії відіграють вирішальну роль у сприянні застосуванню відновлюваної енергії [6-9].

Серед різних технологій накопичення енергії свинцево-кислотні акумулятори (СКА) стали помітним та широко використовуваним варіантом завдяки низькій вартості, добре зарекомендованій технології, високій доступності, функціям безпеки, адаптивності до різних середовищ та ефективним процесам переробки [9-14].

Винайдені Гастоном Планте у 1859 році [15, 16], СКА відіграли вирішальну роль у багатьох галузях, включаючи автомобільну промисловість, системи накопичення енергії, джерела безперебійного живлення (ДБЖ), електричні велосипеди, резервні джерела живлення та невелику побутову техніку [10, 11].

Примітно, що СКА залишаються незамінними в гібридних та електричних транспортних засобах, оскільки вони служать незалежними джерелами живлення 12 В, забезпечуючи безперебійну роботу навіть за несприятливих погодних умов або у разі виходу з ладу високовольтного акумулятора [17, 18].

Отже, СКА зробили значний внесок у прогрес та розвиток людського суспільства, сприяючи зручному та надійному способу життя. У 2018 році СКА

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

становили приблизно 70% світового ринку енергії [16, 19]. Особливої уваги заслуговує суттєва роль СКА у індустрії електровелосипедів.

Як видно з досліджень, незважаючи на поступову заміну літєвими батареями, електровелосипеди на базі СКА все ще домінують на ринку, займаючи 72% ринку електровелосипедів станом на 2020 рік [20].

Крім того, СКА зберігають значну частку ринку в 20,6% у сфері мережевого накопичення енергії, поступаючись лише літій-іонним батареям (53,8%) у 2021 році [21].

Сектор мережевого накопичення енергії представляє багатообіцяючі перспективи для СКА, а прогнозований розмір ринку в майбутньому досягне трильйонів доларів [16]. Хоча СКА можуть мати нижчу щільність енергії, яка становить 50 ват-годин на кілограм, порівняно з літій-сірчаними батареями (505 ват-годин на кілограм), літій-іонними батареями (265 ват-годин на кілограм) та натрій-іонними батареями (150 ват-годин на кілограм) [22], їхня конкурентна перевага полягає в їхній економічній ефективності.

Враховуючи фактор вартості, СКА демонструють теоретичну ємність, порівнянну з багатьма катодними матеріалами, що використовуються в літій-іонних акумуляторах [16]. Тому в тих випадках, коли обсяг продукції не є обмеженням, СКА все ще є раціональним вибором. Більше того, їхні функції безпеки та низька вартість роблять СКА привабливим варіантом.

Як результат, СКА привернули значну увагу та знайшли широке застосування, що свідчить про багатообіцяюче майбутнє. Однак обмежений термін служби СКА та їх широке використання призводять до утворення значної кількості відходів. Ці відходи СКА містять небезпечні речовини, такі як сірчана кислота та свинець, які, якщо з ними не поводитися належним чином, можуть забруднювати навколишнє середовище, включаючи повітря, ґрунт та водойми, створюючи ризики для екосистем та здоров'я людини [23-25].

Отже, належна утилізація відходів СКА має першорядне значення. Крім того, відходи СКА є цінним вторинним ресурсом [26].

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Переробка відходів СКА зменшує попит на первинну свинцеву руду, зменшує забруднення навколишнього середовища та економить енергетичні та водні ресурси, що споживаються під час видобутку та переробки.

Зокрема, переробка свинцю може заощадити приблизно від 55% до 65% енергії порівняно з видобутком свинцю [25].

На завершення, активна переробка та використання відходів СКА служить ефективними стратегіями для повторного використання ресурсів, підвищення ефективності використання матеріалів та зменшення забруднення навколишнього середовища. Ці заходи мають вирішальне значення для сприяння сталому та екологічному розвитку [27].

А, отже, глибоке дослідження технологій переробки відходів СКА дозволять дослідити стан поточної проблеми та запропонувати її вирішення.

2.2 Стан використання літій-іонних АКБ.

Літій-іонні акумулятори (ЛІА) отримали значний розвиток з початку 1990-х років, головним чином завдяки їхній можливості перезаряджання, високій щільності енергії та відносній безпеці. Такі бажані характеристики сприяли широкому впровадженню та розвитку технології ЛІА [28].

ЛІА швидко розширилися, головним чином у портативній електроніці, електромобілях (EV) та пристроях накопичення енергії [29].

Електромобілі становлять найбільшу частку – до 90% споживання ЛІА [30], на які, як очікується, припадатиме 58% усіх автомобілів, проданих у світі до 2040 року [31].

Отже, ЛІА стають надзвичайно привабливими завдяки зростанню ринку електромобілів [32]. Очікуваний прогноз світового ринку акумуляторів передбачає 360–410 мільярдів доларів США протягом наступного десятиліття, при цьому світовий ринок електромобілів зросте до 35% у 2030 році [33].

Прогнози McKinsey показують, що зростання ЛІА збережеться, оцінюючись щорічно приблизно на 30% протягом наступного десятиліття. Ринок знач-

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

но зросте до 2030 року завдяки поширенню електромобілів та електрифікації суспільства, потенційно досягнувши приблизно 4500 ГВт·год [30].

З економічної точки зору, світова кількість портативних електронних пристроїв досягла приблизно 10 мільярдів. Ринок ЛПА зріс з 12 мільярдів доларів до 50 мільярдів доларів протягом 2010-х років і перевищив 77 мільярдів доларів до 2024 року, а до 2031 року зросте до 116 мільярдів доларів [34].

Причина такої різкої тенденції пов'язана з зобов'язанням, яке багато країн взяли на себе під час Паризької угоди [35]: скоротити викиди на 45% до 2030 року та досягти нульового рівня викидів до 2050 року [33].

Отже, існує гострий попит на сировину для задоволення цих очікувань. Наприклад, кожна упаковка акумулятора на основі літій-залізофосфату (ЛЗФ) ємністю 60 кВт·год вимагає 5,7 кг Li, 41 кг Fe та 25,5 кг P [36, 37, 38, 39].

Тільки прогнозований попит на електромобілі на основі ЛЗФ, з його 60% часткою ринку, потребуватиме 0,72 мільйона тонн (Мт) Li/рік до 2050 року [37].

Зростаючий попит на сировину та її дефіцит призвели до зростання ціни, з обмеженими джерелами в окремих країнах [39].

Наявні світові запаси літію, кобальту та інших металів обмежені та розподілені нерівномірно, а їх видобуток вимагає значних енергетичних та трудових витрат, а також значного забруднення навколишнього середовища [40,41].

За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), світовий попит на енергію зросте на 17 мільярдів тон енергетичного еквіваленту до 2035 року, що призведе до збільшення викидів вуглекислого газу . Незважаючи на постійну залежність від невуглецевих джерел енергії, вирішення кліматичних проблем вимагає зосередження на ефективності, збереженні енергії та декарбонізації. Оскільки транспортний та стаціонарний сектори відіграють важливу роль в енергетичній системі, джерела енергії повинні бути інтегровані з електричною інфраструктурою [45].

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Промисловість, транспорт та будівлі є основними споживачами енергії, тоді як значна частина викидів надходить з енергетичного сектору, промисловості та транспорту. Тим не менш, викиди повинні досягти нульових показників до 2050 року, з різким зниженням у 2030 та 2040 роках, щоб забезпечити нульовий попит до 2050 року.

Враховуючи транспортні аспекти, електромобілі стали гарним рішенням для декарбонізації. Однак, незважаючи на чисту електроенергію, яку можуть запропонувати електромобілі, виробництво акумуляторів є надзвичайно вуглецевомістким [46].

Приблизно 40% викидів від виробництва електромобілів пов'язано з ЛПА [47], які значною мірою залежать від видобутку та переробки сировини [48].

Повідомлялося, що виробництво нових акумуляторів з первинних матеріалів споживає приблизно 36 МДж енергії на кг катода ЛЗФ, що в дев'ять разів більше, ніж переробка. Автори також виявили загальні викиди парникових газів (ПГ) приблизно 4,8 кг/кг вхідних ресурсів катода, з яких 2,5 кг – це матеріали, а 2,3 кг – енергія. Для порівняння, переробка призводить до майже 2,4 кг/кг вхідних ресурсів катода, 1,3 – від технологічних викидів, 0,8 – від матеріалів та 0,3 – від споживання енергії [49].

Переробка акумуляторів може зменшити вплив на ресурси та навколишнє середовище на 5–30%, ефективно зменшуючи проблеми з ресурсами та екологією для досягнення сталого розвитку [50].

Переробка акумуляторів призвела до зменшення утворення дрібних твердих частинок в електромобілях на 17% , покращивши якість повітря за рахунок зменшення спалювання відходів та їх захоронення на сміттєзвалищах. Крім того, перероблені матеріали продемонстрували 25% зниження потенціалу дефіциту мінеральних ресурсів, що підтверджує їхню важливість у пом'якшенні використання первинних матеріалів та зменшенні виснаження ресурсів.

ReCiPe 2016 (стаття, що розглядає гармонізований метод оцінки життєвого циклу) [51] виявили суттєве зниження канцерогенної токсичності та неканце-

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

рогенної токсичності для людини на 14% та 22% відповідно, що підкреслює екологічні переваги переробки.

Вищезгадані проблеми включають величезний попит на електромобілі, а також вплив на навколишнє середовище – перехід до переробки хімікатів [52,53].

Переробка надає можливість відновити притаманну цінність металів акумуляторів, створюючи додаткове джерело доходу та встановлюючи циклічний ланцюг поставок, стійкий до коливань цін на компоненти акумуляторів [54].

Крім того, переробка відкриває нові можливості в міському видобутку корисних копалин, де цінні ресурси відновлюються з викинутих електронних виробів, що сприяє більш сталому та ресурсоефективному майбутньому [55].

Недавні дослідження показують, що міська гірничодобувна промисловість буде економічно життєздатною. Наприклад, мідь та алюміній видобуваються з лому за значно нижчою вартістю.

Ці результати також ілюструють, що міський видобуток має економічну перевагу у вартості порівняно з первинним видобутком та конкурентну цінність на ринку. Це вказує на більші макроекономічні переваги міського видобутку, що розширює його роль від простої переробки електронних відходів [56].

Вживаються зусилля щодо зниження вартості акумуляторів та зменшення використання кобальту в катодах літій-іонних акумуляторів, наприклад, розробка безкобальтових акумуляторів та їх переробка. До 2039 року замкнутий цикл переробки може задовольнити 45,1–59,3% річного попиту на кобальт, що сприятиме зростанню виробництва електромобілів та цілям розвитку зеленої енергетики [57].

Також вони повідомили, що постачання переробленого кобальту досягло 11,5 кт у 2023 році та склало 5,2% від загального обсягу, але, ймовірно, зросте в 16 разів до 2040 року [58].

Для порівняння, для видобутку однієї тонни літєвої сировини для видобутку корисних копалин потрібно 250 тонн літєвої руди або 750 тонн розсолу.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Натомість для вилуговування потрібно лише 28 тонн відпрацьованих літій-іонних акумуляторів [59].

Переробка може відновити від 0% до 80% літію з акумуляторів, термін служби яких завершився. Прогнозується, що до 2030 року вторинна переробка становитиме трохи більше 6% від загального виробництва літію [60].

Більше того, у ланцюжку поставок переваги включають відновлення дефіцитної сировини, зниження попиту на цю продукцію та зменшення залежності від імпорту. Всесвітній економічний форум оцінює, що до 2030 року акумулятори вироблятимуться з нижчими витратами, зі зменшенням потреб у сировині, меншими викидами та покращенням соціальних результатів [61].

Отже, за оцінками, переробка металу сама по собі знижує вартість ЛІА за кіловат-годину (кВт·год) на >13%. Однак поточний глобальний рівень переробки ЛІА може бути набагато вищим, оскільки переробляється <3% ЛІА [62].

Цей огляд вказує на широке застосування свинцево-кислотних та літій-іонних батарей і велику проблему продовження їх терміну служби та необхідності їх переробки.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

3 ОСНОВНІ ВИДИ АКБ ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ НА АВТОМОБІЛЯХ. ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

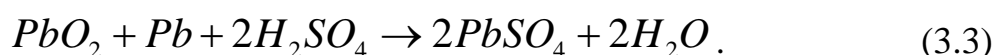
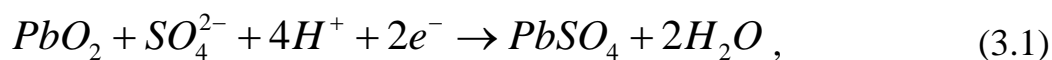
3.1 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків свинцево-кислотних АКБ.

Принцип роботи СКА, що складається переважно з катодів, анодів, пористого середовища з електролітами, корпусів акумулятора, вентиляційних клапанів та струмознімачів.

Катод переважно складається з активного матеріалу діоксиду свинцю (PbO_2), тоді як анод складається з чистого свинцю (Pb).

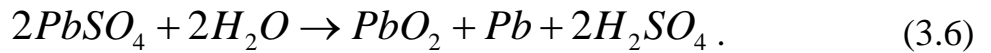
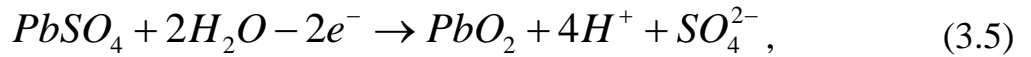
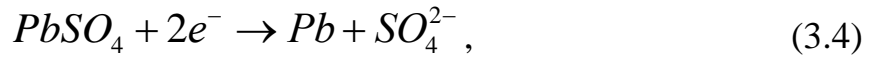
Як електроліт використовується концентрований розчин сірчаної кислоти (H_2SO_4), що сприяє переносу іонів між катодом та анодом.

Для збільшення ємності акумуляторів під час виробництва, кілька катодних та анодних пластин з'єднуються паралельно. Таке розташування ефективно збільшує ємність, що є однією з головних причин великого накопичення енергії та стабільної електричної потужності. Наприклад, типовий 12-вольтовий СКА транспортного засобу складається з шести окремих банок, з'єднаних послідовно, що призводить до загальної напруги, яка в шість разів перевищує напругу кожного окремого елемента. У процесі розрядки хімічна енергія, що зберігається в сполуках свинцю, перетворюється на електричну енергію шляхом анодного окислення свинцю (Pb) та катодного відновлення діоксиду свинцю (PbO_2) до сульфату свинцю ($PbSO_4$) (рівняння (3.1) - (3.3) [9, 17]:



Під час процесу заряджання СКА сульфат свинцю ($PbSO_4$) з електроліту перетворюється назад на діоксид свинцю (PbO_2) на аноді та на свинець (Pb) на катоді (рівняння (3.4) - (3.6) [17]:

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Переваги свинцево-кислотних АКБ.

Низька вартість: свинцево-кислотні АКБ є одними з найдоступніших за ціною.

Надійність: вони витримують великі навантаження та зберігають ефективність протягом тривалого часу.

Довговічність: при правильній експлуатації термін служби може сягати 10 років.

Низький саморозряд: мають низький рівень саморозрядження.

Простота обслуговування: сучасні AGM-акумулятори (з абсорбованим електролітом) майже не потребують обслуговування.

Недоліки свинцево-кислотних АКБ.

Велика вага і розмір: вони важкі та громіздкі.

Токсичність: містять отруйні речовини (свинець) та виділяють небезпечні гази під час заряджання (водень).

Обмежений термін служби: кількість циклів заряд-розряд обмежена, і з часом ємність зменшується.

Необслуговуваність (для певних типів): обслуговувані моделі потребують контролю рівня електроліту та його щільності.

Вимогливість до умов експлуатації свинцево-кислотних АКБ.

Неприпустимі для встановлення в салоні автомобіля через випаровування сірчаної кислоти.

Не можна зберігати в розрядженому стані.

Можливість замерзання при сильному розряді в холодну пору року.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

3.2 Огляд принципу роботи, переваг та недоліків літій-іонних АКБ.

Електричний акумулятор, який широко поширений в сучасній побутовій електронній техніці і знаходить своє застосування в якості джерела енергії в електромобілях і накопичувачах енергії в енергетичних системах.

Це найпопулярніший тип акумуляторів в таких пристроях, як мобільні телефони, ноутбуки, цифрові фотоапарати, відеокамери і електромобілі.

Перший літій-іонний акумулятор випустила корпорація Sony в 1991 році.

Літій-іонний акумулятор складається з електродів (катодного матеріалу на алюмінієвій фользі і анодного матеріалу на мідній фользі), розділених просоченими електролітом пористими сепараторами. Пакет електродів поміщений в герметичний корпус, катоди і аноди приєднані до клем-струмознімача. Корпус має запобіжний клапан, що скидає внутрішній тиск при аварійних ситуаціях і порушенні умов експлуатації. Літій-іонні акумулятори розрізняються за типом використовуваного катодного матеріалу. Переносником заряду в літій-іонному акумуляторі є позитивно заряджений іон літію, який має здатність впроваджуватися в кристалічну решітку інших матеріалів (наприклад, в графіт, оксиди і солі металів), наприклад, в графіт з утворенням LiC_6 , утворювати оксиди ($LiMnO_2$) і солі ($LiMnRON$) металів.

Спочатку в якості негативних пластин застосовувався металевий літій, потім - кам'яновугільний кокс. Надалі почали застосовувати графіт.

Застосування оксидів кобальту дозволяє акумуляторам працювати на значно нижчих температурах, підвищує кількість циклів заряду-розряду одного акумулятора. Поширення літій-ферум-фосфатних акумуляторів обумовлено їх відносно низькою вартістю.

Літій-іонні акумулятори застосовуються в комплекті з системою контролю і управління та спеціальним пристроєм заряду-розряду.

В даний час в масовому виробництві літій-іонних акумуляторів використовуються три класи катодних матеріалів:

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- Кобальтат літію LiCoO_2 і тверді розчини на основі ізоструктурні йому нікелата літію;

- Літій-марганцева шпінель LiMn_2O_4 ;

- Літій-ферофосфат LiFePO_4 .

Переваги:

- Висока енергетична щільність (ємність);

- Низький саморозряд;

- Не вимагають обслуговування.

Недоліки:

- Акумулятори Li-іон першого покоління були схильні до вибухового ефекту. Це пояснювалося тим, що в них використовувався анод з металевого літію, на якому в процесі багаторазових циклів заряду-розряду виникали просторові відростки (дендрити), що призводять до замикання електродів і, як наслідок, пожежі або вибуху. Цю проблему вдалося остаточно вирішити заміною матеріалу анода на графіт. Подібні процеси відбувалися і на катодах літій-іонних акумуляторів на основі оксиду кобальту при порушенні умов експлуатації (перезарядці). Літій-ферум-фосфатні акумулятори повністю позбавлені цих недоліків. Крім того, всі сучасні зарядні пристрої для літій-іонних акумуляторів запобігають перезаряд і перегрів внаслідок занадто інтенсивного заряду.

Літій-іонні акумулятори втрачають свою ємність, якщо вони не використовуються.

Літій-полімерний акумулятор (Li-pol, Li-polymer, LiPo, LiP, Lipoly). Такий акумулятор є вдосконаленою конструкцією літій-іонного акумулятора. В якості електроліту в ньому використовується полімерний матеріал. Його застосовують в мобільних телефонах, цифровій техніці, радіокерованих моделях тощо.

Звичайні побутові літій-полімерні акумулятори не здатні віддавати великий струм, але існують спеціальні силові літій-полімерні акумулятори, здатні віддавати струм, в 10 - 30 разів перевищує чисельне значення ємності в ампер-

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

годинах. Вони широко застосовуються як акумулятори для радіокерованих моделей, портативного електроінструменту, деяких сучасних електромобілів.

Літій-полімерні акумулятори при однаковій вазі перевершують по енергоємності нікель-кадмієві в 4-5 разів, нікель метал-гідридні в 3-4 рази.

Кількість робочих циклів становить 500-600. При розрядних токах в 2С втрата ємності складає 20% (для порівняння - у нікель-кадмієвих - 1000 циклів, у нікель-метал-гідридних - 500).

Як і всі акумулятори, літій-полімерні батареї схильні до старіння.

Через два роки батарея втрачає близько 20% ємності.

Переваги:

- Велика густина енергії на одиницю об'єму і маси (в порівнянні з літій-іонними);
- Низький струм саморозряду;
- Товщина елементів від 1 мм;
- Можливість отримувати різні форми;
- Відсутність ефекту пам'яті;
- Незначний перепад напруги в міру розряду;
- Досить широкий діапазон робочих температур: від -20 до +40 ° С (за даними виробників).

Недоліки:

- Акумулятори пожежонебезпечні, особливо при перезаряді і перегрів.
- Для боротьби з цим явищем все побутові акумулятори забезпечуються вбудованою електронною схемою, яка вимикає процес заряду після закінчення зарядки (з цієї ж причини необхідні спеціальні алгоритми роботи зарядних пристроїв).

Ресурс становить 800-900 циклів при розрядних токах до 2С і втрати ємності не нижче 20% (для порівняння, у NiCd акумуляторів - 1000 циклів, у NiMH акумуляторів - 600 циклів, а у LiFePO4 акумуляторів - 2000 циклів заряду-розряду).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO₄, LFP). Такий тип електричного акумулятора є видом літій-іонного акумулятора, в якому використовується LiFePO₄ в якості катода. Також даний тип акумулятора активно застосовується в електромобілях.

Переваги:

- Забезпечує більш тривалий термін служби, ніж інші літій-іонні батареї;
- Мають дуже стабільну напругу розряду (напруга на виході залишається близько до 3,2 В поки заряд акумулятора не буде вичерпаний повністю, що може значно спростити або навіть усунути необхідність регулювання напруги в ланцюгах);

- У зв'язку з постійною напругою 3,2 В на виході, чотири акумулятора можуть бути з'єднані послідовно для отримання номінальної напруги на виході в 12,8 В, що наближається до номінальної напруги свинцево-кислотних акумуляторів з шістьма осердями, що, поряд з хорошими характеристиками безпеки, робить їх доброю потенційною заміною для свинцево-кислотних акумуляторних батарей в багатьох галузях, наприклад в автомобілебудуванні і сонячної енергетики;

- Використання фосфатів дозволяє уникнути витрат кобальту і екологічних проблем, зокрема, при попаданні кобальту в навколишнє середовище при неправильній утилізації;

- Більш високий піковий струм (а з огляду на стабільність напруги, більш висока пікова потужність), ніж, наприклад, у LiCoO₂;

- Малий струм саморозряду;

- Більш повільна втрата ємності, ніж у літій-іонних або літій-полімерних акумуляторів;

- Термічна і хімічна стабільність, що істотно підвищує безпеку батареї.

Недоліки:

- Питома щільність енергії (енергія / обсяг) нового акумулятора LFP приблизно на 14% нижче, ніж у нових літій-іонних акумуляторів.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Літій-марганцеві акумулятори (LiMn_2O_4 , LMR). У аноді акумуляторів LMR використовується марганець, а іони літію розташовані більш щільно один до одного. Завдяки цим особливостям, LMR більш безпечні, стійкі до швидкого заряду великими струмами і здатні віддавати струми до 5С. Такі акумулятори використовуються в пристроях, які споживають великий струм: потужні ліхтарі, радіокеровані моделі.

Вихідна напруга становить від 2,5 до 4,2 В.

Внаслідок низького внутрішнього опору акумулятори LMR менше нагріваються при використанні, більш безпечні, і зазвичай не оснащуються вбудованою захисною електронікою. При перезаряді елемент «потече» або він просто зіпсується, без додаткових піротехнічних ефектів. Обов'язково є захисна електроніка в зарядному пристрої.

Переваги:

- Здатність переносити великі струми заряду-розряду;
- Найбільш безпечні з усіх літійових акумуляторів;
- Термін служби складає більше 500 циклів.

Недоліки:

- Відносно низька ємність;
- Велика чутливість до низьких температур (охолоджувати нижче -10°C не рекомендується).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ

4.1 Типи свинцево-кислотних АКБ, їх класифікація, принцип роботи, відмінності.

Свинцево-кислотні АКБ поділяють на два основних типи рис. 4.1:

- заливні (WET), які вимагають обслуговування та доливання електроліту;
- герметичні (VRLA/SLA), які поділяються на AGM (з абсорбуючим скловолоконним матом) та GEL (з гелеподібним електролітом).



Рисунок 4.1 – Загальна класифікація свинцево-кислотних АКБ

Заливні АКБ дешевші, але потребують вентиляції, тоді як герметичні – не-обслуговувані та безпечніші для встановлення в житлових приміщеннях.

В свою чергу пластини СКА класифікуються наступним чином рис. 4.2:

- плоскі;
- трубчасті.

Технологія VRLA – це свинцево-кислотні акумулятори з клапанним регулюванням, які не потребують обслуговування (доливання води) протягом усього терміну служби завдяки процесу рекомбінації газів. Вони широко застосовуються в джерелах безперебійного живлення (ДБЖ), системах безпеки та альтернативній енергетиці.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

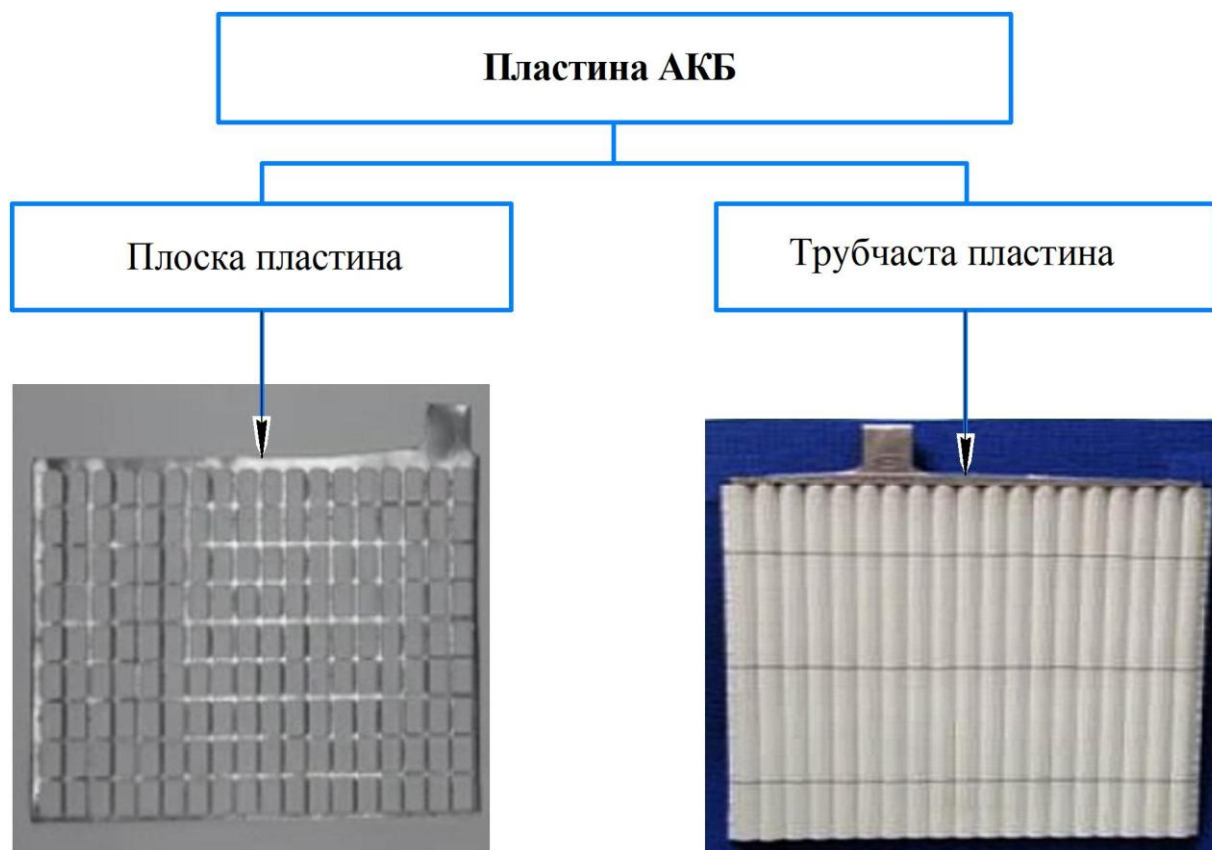


Рисунок 4.2 – Класифікація свинцево-кислотних АКБ в залежності від типу пластин

Особливість акумуляторів типу VRLA - відсутність необхідності доливання води протягом усього терміну служби і практично повна відсутність виділення газів (водню і кисню) - продуктів електролізу води, що входить до складу електроліту. Тому їх нерідко називають герметизованими необслуговуваними. Незначне обслуговування, тим не менш, необхідно: перш за все, візуальний огляд, протирання від пилу, підтяжка з'єднань і контроль напруги.

Завдяки особливостям конструкції і складу матеріалів пластин, сепараторів і електроліту продукти електролізу води - молекули водню і кисню - в акумуляторах даного типу рекомбінують, перетворюючись в молекули води і повертаючись до складу електроліту.

Коефіцієнт рекомбінації при нормальних умовах експлуатації досить високий і може досягати > 99%. Тому лише дуже незначна частина не рекомбінова-

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

них газів накопичується всередині корпусу акумулятора і потім при перевищенні заданого рівня тиск стравлюється в атмосферу через спеціальні клапани.

Тому в більшості випадків акумулятори VRLA експлуатуються в складі електроживлення та ін. обладнання в приміщеннях без примусової вентиляції - буде достатньо лише природної. Проте існують нормативи розміщення акумуляторів в шафах і приміщеннях, що розраховуються за формулами виробників.

Акумулятори VRLA поділяються на два основні типи, які відрізняються технологією електроліту:

AGM (Absorbed Glass Mat): У цих акумуляторах електроліт абсорбується в спеціальних сепараторах зі скловолокна. Вони характеризуються високою ефективністю рекомбінації газів (понад 99% за нормальних умов) і відносно стійкі до глибоких розрядів. Термін служби в буферному режимі зазвичай становить 5-6 років.

GEL (Гелеві): У гелевих акумуляторах електроліт змішується з діоксидом кремнію до стану гелю. Вони більш витривалі та стійкі до глибоких розрядів, ніж AGM, і мають менший внутрішній опір. Ці батареї часто рекомендують для використання в циклічному режимі (наприклад, у сонячних енергосистемах).

AGM (Absorbent Glass Mat) - це технологія виготовлення свинцево-кислотних акумуляторів, створена інженерами Gates Rubber Company на початку 1970-х років. Відмінність батарей AGM від класичних в тому, що в них міститься абсорбований електроліт, а не рідкий, що дає ряд змін у властивостях акумулятора.

Що стосується назви, то причиною назвати даний клас необслуговуваних акумуляторів AGM послужила саме інноваційна особливість їх внутрішньої конструкції.

AGM - скловолоконний пористий матеріал, з якого виконаний сепаратор, що заповнює простір між пластинами акумулятора. Сепаратор насичений, як губка, рідким електролітом (водним розчином сірчаної кислоти).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

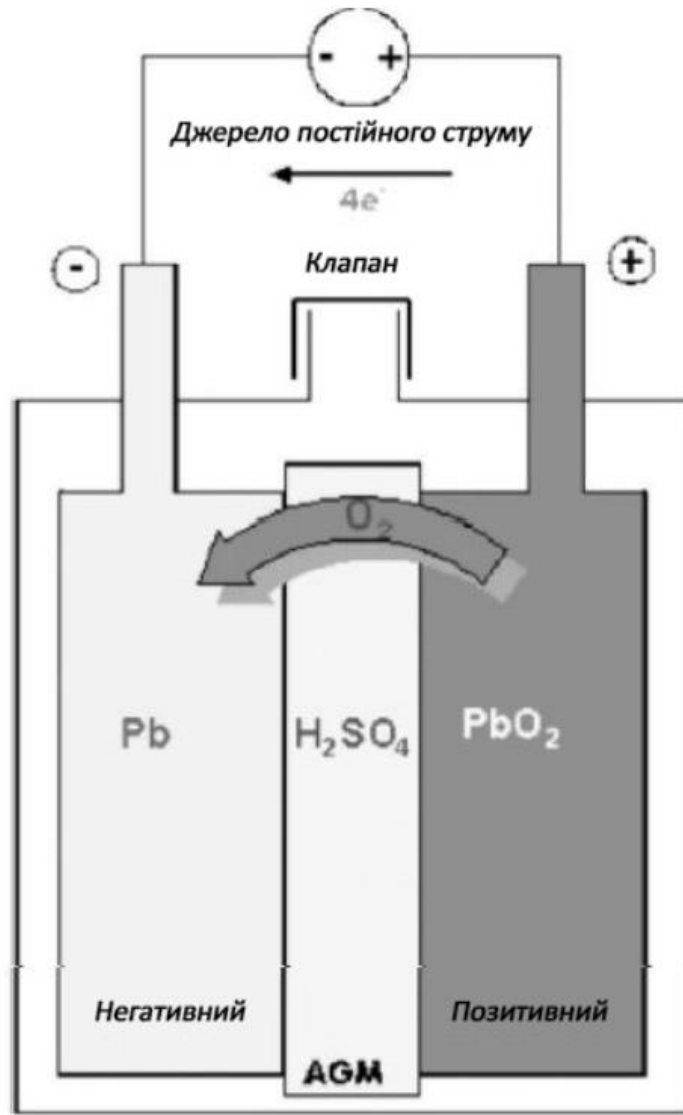


Рисунок 4.3 – Конструкція свинцево-кислотного акумулятора виготовленого за технологією AGM

Завдяки такій конструкції сепаратора досягається кілька цілей:

- висока якість ізоляції пластин;
- ускладнюється вихід за межі капілярної системи сепаратора газів, полегшується їх рекомбінація із максимальною ефективністю (понад 99% при нормальних умовах);
- рухливість іонів в рідкому електроді залишається високою, забезпечуючи відмінні динамічні розрядні і зарядні характеристики;
- легко забезпечується прискорений заряд величиною до $0,3C_{10}$, а короткочасно - до $0,5C_{10}$;

						MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			30

- помірні вимоги до якості зарядного напруги (стабільність, пульсації);
- температурні неоднорідності вирівнюються завдяки рухливості рідкого електроліту всередині склокапілярного матеріалу;
- електроліт пов'язаний в сепараторі завдяки капілярним ефектам, не впливає за межі сепаратора, акумулятори можуть експлуатуватися в будь-якому положенні (крім перевернутого);
- скловолоконний сепаратор додатково фіксує активний матеріал пластин, запобігаючи їх осипання через корозію в процесі експлуатації.

Забезпечені завдяки такій конструкції і особливостям роботи переваги зробили акумулятори типу AGM одними з найпоширеніших у світі.

Їх застосовують в системах безперебійного живлення (ДБЖ), телекомунікації, приймально-передавальному устаткуванні для зв'язку, системах аварійної подачі електроенергії на електростанціях і підстанціях, системах сигналізації, охоронних і протипожежних системах, електронних касових апаратах, системах аварійного освітлення, автономному обладнанні (мийні машини, вантажна техніка, коляски для інвалідів).

AGM акумулятори не вимагають обслуговування протягом всього терміну служби (який, до речі, у AGM акумуляторів EverExceed може досягати 18 - 20 років, Практично не виділяють газів в процесі своєї роботи, дозволяють розвивати високі розрядні струми.

Сучасні AGM акумулятори EverExceed до того ж мають високий циклічний ресурс - до 800 циклів глибокого 100% розряду, що вдвічі більше, ніж у більшості акумуляторів-аналогів інших виробників.

GEL VRLA (SLA), або гелеві акумулятори (електроліт - гелеобразний) - підвид свинцево-кислотних необслуговуваних герметичних акумуляторів, в яких іммобілізація електроліту на пластинах досягається шляхом додавання до сірчаної кислоти силіконового наповнювача (нагадаємо, що крім гелевих акумуляторів, існує також другий підвид необслуговуваних VRLA батарей - AGM акумулятори).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

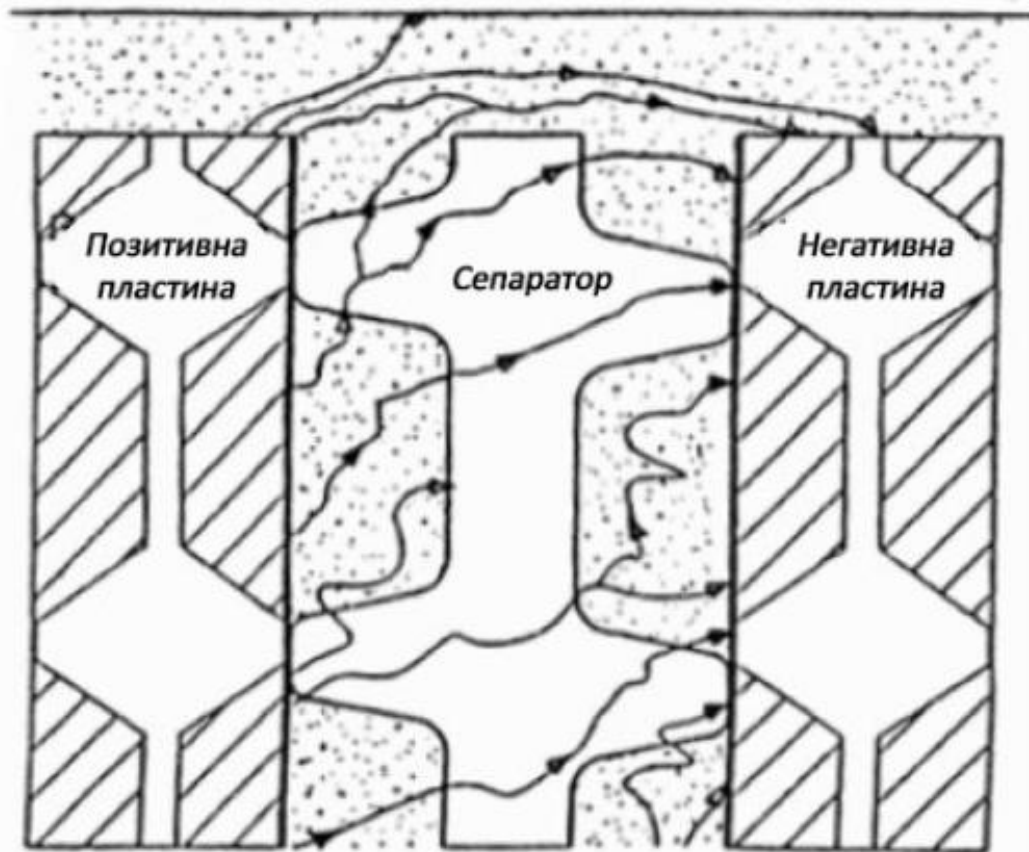


Рисунок 4.4 – Конструкція свинцево-кислотного акумулятора виготовленого за технологією GEL

В основі технології GEL - гелевий електроліт рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Німецький матеріал - EVONIK - AEROSIL 200 для гелевого електроліту

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Сучасна трубчаста позитивна пластина (рис. 4.6) для батарей Tubular OPzV/OPzS має розрахунковий термін служби більше 20 років.



Рисунок 4.6 – Сучасна трубчаста позитивна пластина для батарей Tubular OPzV/OPzS

Гелевий електроліт має наступні переваги:

- дрібнопориста трубчаста структура позитивних пластин ефективно утримує активний матеріал і значно збільшує термін служби в циклічному режимі;
- велика ємність і швидкий заряд завдяки низькому електричному опору;
- мінімальні втрати активного матеріалу;
- постійна щільна взаємодія активного матеріалу зі свинцевими пластинами навіть в циклічному режимі роботи;
- максимальне перенесення іонів через пори сепаратора;
- дрібнопориста трубчаста структура.

В сучасних GEL батареях реалізовано ефективне рішення – трубка з бічним захистом для запобігання коротких замикань через тертя рис. 4.7.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



Рисунок 4.7 – Трубка з бічним захистом для запобігання коротких замикань через тертя в GEL акумуляторах

Особливості гелевих акумуляторів:

-гелевий електроліт заповнює простір між пластинами АКБ, але сепаратор не виключається.

-рекомбінація газів в гелевих акумуляторах має дещо меншу ефективність (до 97%), ніж в AGM типі (в яких вона понад 99%).

-в гелевому електроліті іони мають гірші показники рухливості (в силу більшої щільності середовища), що негативно позначається на динамічних розрядних і зарядних характеристиках гелевих акумуляторів (відштовхувальні струми, що розвиваються, на 20-40% нижче, ніж у AGM). Більш того, може спостерігатися тимчасовий провал в напрузі при набиранні навантаження, що може призводити до спрацьовування автоматики і захистів і неадекватній поведінці обладнання в цілому; тому слід з обережністю застосовувати гелеві акумулято-

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

ри в системах управління струмом і подібних пристроях з комутацією швидкоплинних струмів;

-зарядка гелевих акумуляторів обмежується струмом не більше $0,2C_{10}$, в іншому випадку виникає небезпека "спучування" гелю надлишковими газами через меншу ефективність рекомбінації і обмеженою теплопровідністю;

-гелеві акумулятори краще жити від зарядних пристроїв з високою якістю напруги (стабільність, мінімум пульсацій), щоб уникнути перезаряду і перегріву;

-гелеві акумулятори не переносять навіть короточасних коротких замикань - будь-яке КЗ (наприклад, при установці акумулятора Ви випадково замкнули на частку секунди два полюси металевим гайковим ключем) моментально виводить акумулятор з ладу.

-гель ефективніше фіксує матеріал пластин, знижуючи їх знос в режимах глибоких розрядів, тому циклічний ресурс гелевих акумуляторів в 2-3 рази вище, ніж у звичайних AGM (але не AGM-акумуляторів нового покоління!); це головна (і, мабуть, практично єдина) перевага гелевих акумуляторів, тому їх доцільно застосовувати в тих випадках, де таке застосування (циклічний режим з глибоким розрядом) затребуване;

-гелеві акумулятори також можуть експлуатуватися в будь-якому положенні (крім перевернутого)

АКБ з гелеподібним електролітом мають дещо менший саморозряд, ніж їх AGM-аналоги, тому гелеві АКБ краще використовувати в тих режимах, де розряд проводиться малим струмом протягом тривалого часу (7 днів і вище).

Як бачимо, гелеві акумулятори кращі, тільки в плані підвищеного циклічного ресурсу і трохи меншого % саморозряду.

Порівняльна оцінка AGM та GEL акумуляторів ємністю 100 А · год наведено у табл. 4.1.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Таблиця 4.1 – Порівняльна оцінка AGM та GEL акумуляторів ємністю 100 А · год.

Назва показника	Значення параметр для акумулятора	
	AGM	GEL
Швидкість саморозряду, %/місяць	<3	<2
Внутрішній опір, Ом	5,6	3,5
Максимальна сила струму розряду, А	до 1000	до 1200
Стійкість до високих температур, °С	до 40	до 50
Циклічний ресурс при повному розряді	280-300	300-400
Тип сепаратора	пористе скловолокно	силікагель
Електроліт	H ₂ SO ₄	GEL
Об'єм електроліту	AGM = 60-70 % GEL	
Густина електроліту, г/см ³	1,30-1,32	1,26-1,28

4.2 Рекомбінація при заряді VRLA – AGM та GEL акумуляторів.

Принцип рекомбінації АКБ – це процес, при якому газу (кисень і водень), що утворюються під час заряду свинцево-кислотної батареї, перетворюються назад на воду в герметичному корпусі, замість того, щоб виходити назовні. Цей процес значно зменшує втрату води та унеможливає утворення вибухонебезпечних сумішей газів, роблячи батарею необслуговуваною.

Рекомбінація (при заряді) рис. 4.8.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

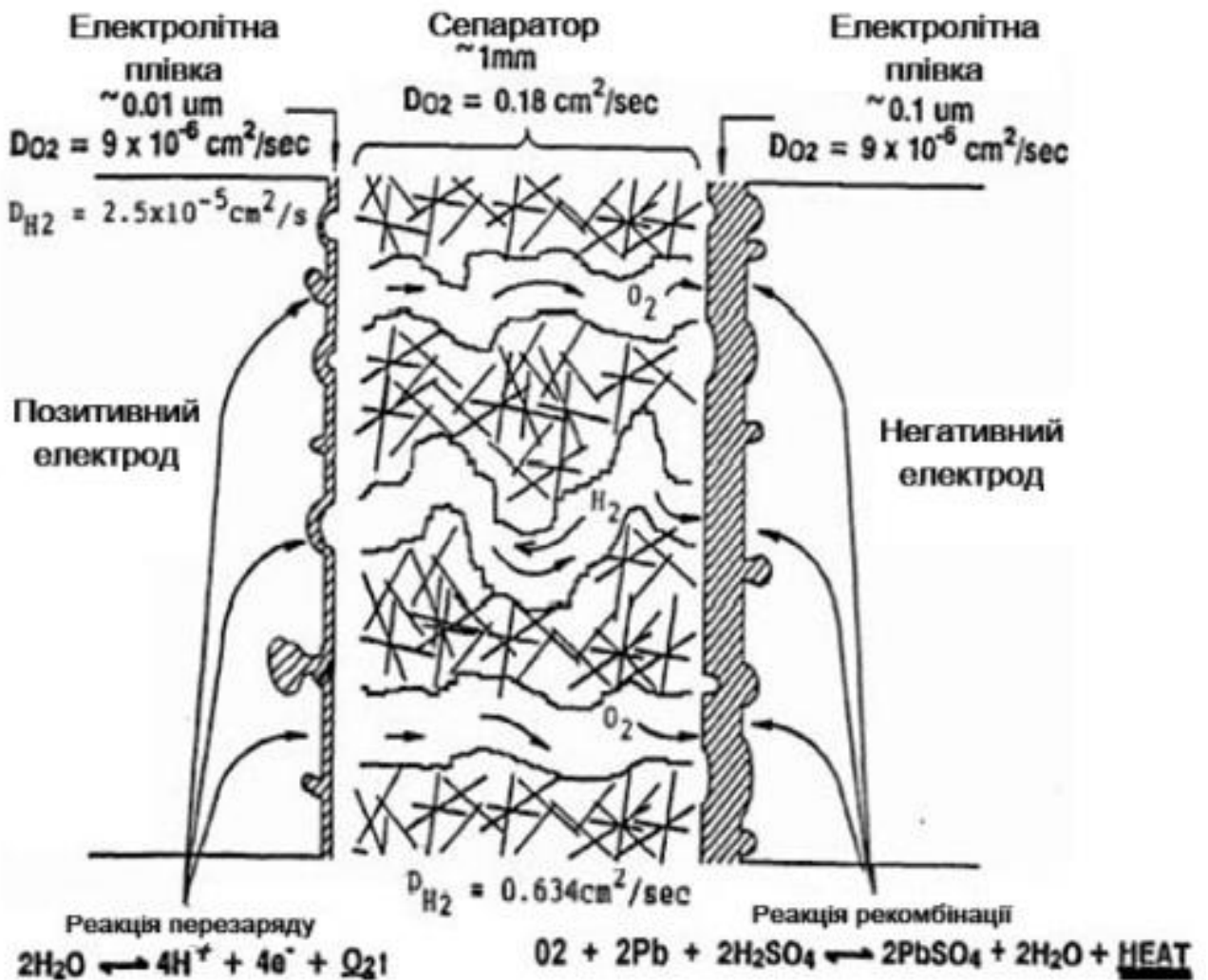
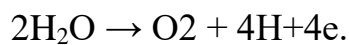


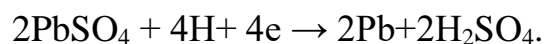
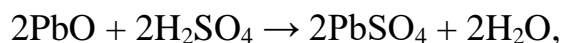
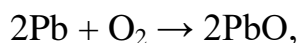
Рисунок 4.8 – Рекомбінація при заряді VRLA – AGM та GEL акумуляторів

Позитивна реакція:



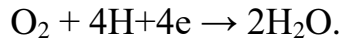
Вода розкладається (електроліз) з утворенням кисню, що переміщується через сепаратор до поверхні негативної пластини.

Негативна реакція:



Загальна реакція:

										Арк.
										37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP.AT-94.00.00.000 ПЗ					



4.3 Дослідження стійкості АКБ до високої температури в прискореному циклі розряду.

Висока температура прискорює хімічні реакції в акумуляторі, що призводить до його швидшого старіння та втрати ємності, а також пошкоджує захисний шар, скорочуючи термін служби. Деякі типи акумуляторів, як-от літій-залізо-фосфатні, мають кращу стійкість до високих температур (від -30 до +50 °C) і можуть безпечно використовуватися поза приміщеннями, тоді як для інших, наприклад, свинцево-кислотних, оптимальна робоча температура становить від -10 °C до +40 °C.

Для встановлення даного показника для AGM та GEL ємністю 100 А · год, умови випробовування були наступні:

- температура випробування становила 50 °C;
- метод випробування: один цикл розряду струмом до 2-10 А до 1,75 В;
- заряд 14 годин при постійній напрузі 2,275 В з обмеженням струму 2-10 А;
- умова завершення випробування: час розряду менше 3 години.

До основних приладів що використовувалися в процесі випробувань відносяться тестер для АКБ моделі KW650 та мультиметр UT30C. Коротка технічна характеристика та зовнішній вигляд приладів наведено в табл. 4.2, 4.3 та на рис. 4.9, 4.10.

Таблиця 4.2 – Коротка технічна характеристика тестера для АКБ моделі KW650

Назва параметра	Значення
1	2
Температура робочого середовища	0-50 °C
Температура зберігання	від -20 до 70 °C

Закінчення табл. 4.2

Діапазон вимірювання ємності акумулятора, А · год	2-220
Напруга застосування, В	6; 12
Вхідна напруга, В	6-16
Країна виробник	Китай

Таблиця 4.3 – Коротка технічна характеристика цифрового мультиметра моделі UT30C

Назва параметра	Значення
Змінна напруга, (AC)	200 В / 500 В; $\pm(1.2\%+10)$
Постійна напруга, (DC)	200 мВ / 2000мВ / 20 В / 200 В / 500 В; $\pm(0.5\%+2)$
Постійний струм (DC)	200 мА / 2000 мА / 20мА/ 200 мА/ 20А; $\pm(1\%+2)$
Опір	200 Ом / 2000 Ом / 20кОм/ 200 кОм/ 20 МОм; $\pm(0,8\%+2)$
Температура	-40°C ~1000°C; $\pm(1\%+3)$
Країна виробник	Китай

Тестер Konnwei KW650 (рис. 4.9) – це оновлена версія вже популярної моделі KW600. Завдяки вдосконаленій електроніці цей пристрій має ті ж можливості, що й дорогі професійні тестери для майстерень, що підходять для діагностики акумуляторів, як автомобілів, так і мотоциклів.

Тестер автомобільних акумуляторів KW650 може відображати результати тесту у текстовому та графічному вигляді, відображаючи в реальному часі напругу акумулятора у вигляді хвилі. Завдяки інтелектуальному РК-екрану з діагоналлю 2,4 дюйми та основному чіпу STM-32, перегляд інформації про тестування стає дуже швидким! У програмі KONNWEI BTlink можна інсталиювати

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

доступні оновлення. Для того щоб роздрукувати дані та графіки необхідно підключити тестер до комп'ютера.



Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд тестера автомобільних акумуляторів моделі KW650

Прилад моделі KW650 здатний:

- швидко та точно вимірювати струм пуску холодного двигуна;
- оцінювати рівень зарядженості акумулятора;
- визначати основні несправності у системі пуску двигуна.

Оцінюються як стан АКБ, зарядженість, пусковий струм, відсоток деградації, так і пускову та зарядну електричні системи автомобіля. При цьому тести проводяться без навантаження, тому не можуть пошкодити АКБ.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Таблиця 4.4 – Результати випробувань акумулятора AGM 12V 100Ah

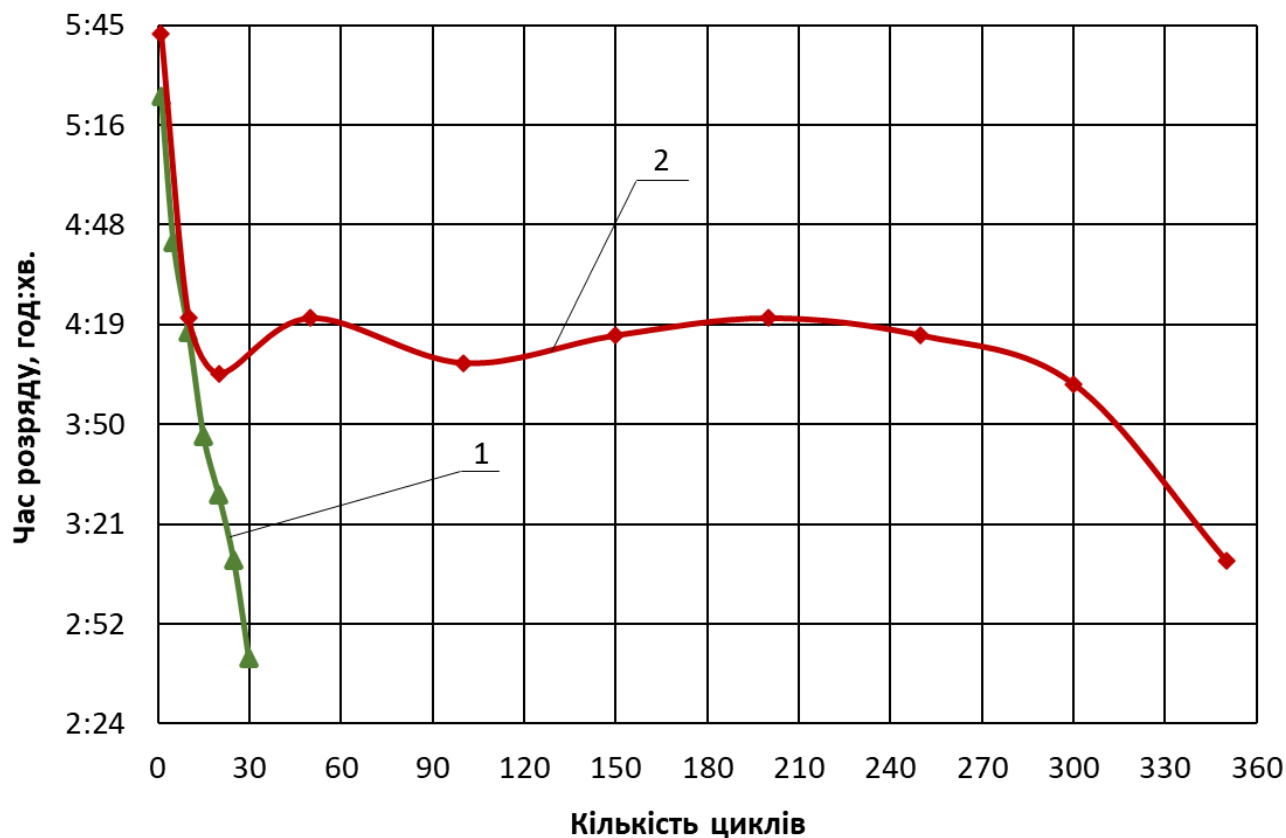
Кількість циклів	Час розряду, год
1	5:25
5	4:43
10	4:17
15	3:47
20	3:30
25	3:11
30	2:43

Результати випробувань акумулятора GEL 12В 100Ah наводимо у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати випробувань акумулятора GEL 12В 100Ah

Кількість циклів	Час розряду, год
1	5:43
10	4:21
20	4:05
50	4:21
100	4:08
150	4:16
200	4:21
250	4:16
300	4:02
350	3:11

Графічно результати випробувань стійкості акумулятора AGM 12V 100Ah та GEL 12В 100Ah наводимо на рис. 4.11.



аккумулятор: 1 – AGM; 2 – GEL

Рисунок 4.11 – Результати випробувань стійкості аккумулятора AGM та GEL 12V 100Ah

Як бачимо з результатів відображених на рис. 4.11 за температури 50 °C стійкість АКБ до розряду значно вища в аккумуляторах GEL. За результатами досліджень, 350 циклів заряду-розряду аккумулятора GEL зменшило час розряду на 44,3 % у порівнянні з початковим часом. Для аккумулятора AGM 12V 100Ah при 30 циклах заряду-розряду час розряду вже знизився 49,8 %, що свідчить про погану стійкість AGM аккумуляторів до високих температур.

Висока температура має суттєвий вплив на аккумулятори, а саме:

- прискорене старіння: висока температура прискорює хімічні процеси, що призводить до швидшого розрядження та деградації аккумулятора;

зменшення терміну служби: висока температура пошкоджує захисний шар на аноді, що значно скорочує термін служби акумулятора;

зниження ефективності: особливо це помітно в акумуляторах для камер безпеки, де висока температура призводить до зниження продуктивності та прискореного саморозряду.

Зменшити негативний вплив високої температури можна використавши відповідні типи акумуляторів: літій-залізо-фосфатні акумулятори LiFePO мають кращу стійкість до високих температур в діапазоні до +50 °С.

Забезпечити захист акумуляторів від прямих сонячних променів: забезпечити акумулятору затінене або захищене місце, що допоможе підтримувати його ефективність та подовжити термін служби.

Уникати екстремальних коливань температури: уникати розміщення акумуляторів у місцях, де температура може значно змінюватися.

При виборі АКБ звертати особливу увагу на діапазон робочих температур конкретного акумулятора для забезпечення його надійної роботи.

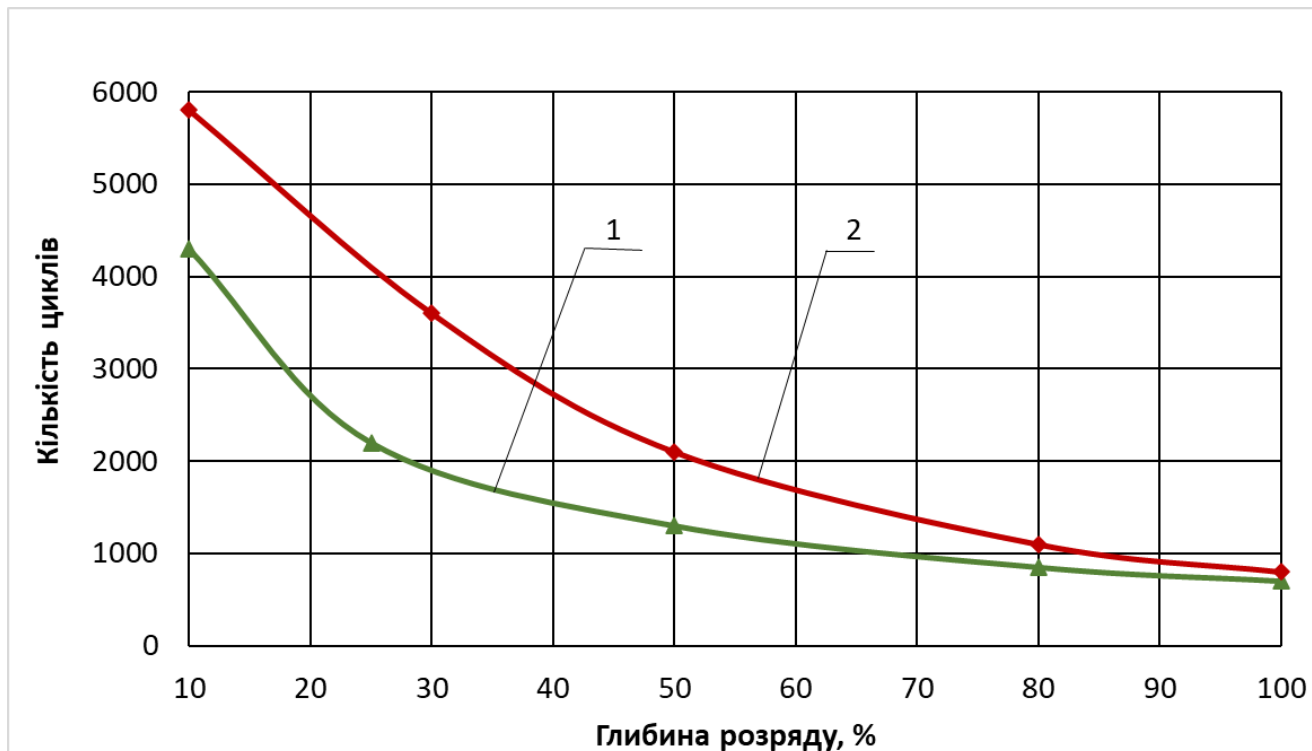
Важливими показниками акумуляторів є зміна кількості циклів від глибини розряду батареї.

Глибина розряду (DoD) має прямий вплив на кількість циклів: чим глибше розряджається акумулятор, тим менше циклів він витримує. Це пов'язано з тим, що часті глибокі розряди (особливо нижче 20 % прискорюють знос внутрішніх компонентів, тоді як часті короткі цикли з меншим рівнем розрядки значно подовжують термін служби акумулятора.

Дослідження циклічного ресурсу акумуляторів проводили за температури 20 °С.

Результати дослідження циклічного ресурсу акумулятора AGM 12V 100Ah та батареї GEL 12V 100Ah в залежно від глибини розряду акумуляторної батареї наведено на рис. 4.12.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



акумулятор: 1 – AGM; 2 – GEL

Рисунок 4.12 – Результати дослідження циклічного ресурсу акумулятора AGM та GEL 12V 100Ah

Як бачимо з рис. 4.12 із зростанням глибини розряду акумуляторної батареї як AGM та GEL призводить до значного скорочення циклів заряду-розряду.

Так для AGM батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник знижується на 83,7 %.

Для дослідної GEL батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник циклів знижується на 86,2 %.

Глибокий розряд >80 % призводить до швидшої деградації хімічного складу батареї. Значного скорочення загальної кількості циклів, що витримує акумулятор.

Щоб подовжити термін служби акумулятора, рекомендовано підтримувати його рівень заряду в діапазоні від 20 % до 80 %, слід уникати повних розрядів (нижче 10 % і повних зарядів вище 95 %, оскільки це створює додаткове наван-

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень, на сьогодні широко використовуються свинцево-кислотні (AGM, GEL) акумулятори та літій-іонні серед яких широкого поширення набули літій-кобальтові, літій-марганцеві та літій-ферофосфатні.

До основних переваг свинцево-кислотних (AGM, GEL) АКБ відноситься: низька вартість, надійність; довговічність; низький саморозряд; простота обслуговування.

Недоліки свинцево-кислотних (AGM, GEL) АКБ: велика вага і розмір; токсичність; обмежений термін служби; необслуговуваність (для певних типів).

Поширення літій-ферум-фосфатних акумуляторів обумовлено їх відносно низькою вартістю.

Літій-іонні акумулятори мають ряд переваг: висока енергетична щільність (ємність); низький саморозряд; не вимагають обслуговування.

До недоліки літій-іонних АКБ відноситься те, що Li-ion АКБ першого покоління були схильні до вибухового ефекту. Це пояснювалося тим, що в них використовувався анод з металевого літію, на якому в процесі багаторазових циклів заряду-розряду виникали просторові відростки (дендрити), що призводять до замикання електродів і, як наслідок, пожежі або вибуху. Цю проблему вдалося остаточно вирішити заміною матеріалу анода на графіт. Подібні процеси відбувалися і на катодах літій-іонних акумуляторах на основі оксиду кобальту при порушенні умов експлуатації (перезарядці).

Літій-феро-фосфатні акумулятори повністю позбавлені цих недоліків. Крім того, всі сучасні зарядні пристрої для літій-іонних акумуляторів запобігають перезаряд і перегрів внаслідок занадто інтенсивного заряду.

Досить ефективними є літій-полімерні акумулятори ресурс яких становить 800-900 циклів при розрядних токах до 2С і втрати ємності не нижче 20% (для

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

порівняння, у NiCd акумуляторів - 1000 циклів, у NiMH акумуляторів - 600 циклів, а у LiFePO4 акумуляторів - 2000 циклів заряду-розряду).

Висока температура прискорює хімічні реакції в акумуляторі, що призводить до його швидшого старіння та втрати ємності, а також пошкоджує захисний шар, скорочуючи термін служби.

Деякі типи акумуляторів, як-от літій-залізо-фосфатні, мають кращу стійкість до високих температур (від -30 до +50 °C) і можуть безпечно використовуватися поза приміщеннями, тоді як для інших, наприклад, свинцево-кислотних, оптимальна робоча температура становить від -10 °C до +40 °C.

Для встановлення стійкості до високих температур нами виконано дослідження AGM та GEL батарей ємністю 100 А · год з наступними умовами випробування:

- температура випробування становила 50 °C;
- метод випробування: один цикл розряду струмом до 2-10 А до 1,75 В;
- заряд 14 годин при постійній напрузі 2,275 В з обмеженням струму 2-10 А;
- умова завершення випробування: час розряду менше 3 години.

Результати досліджень показали, що за температури 50 °C стійкість АКБ до розряду значно вища в акумуляторах GEL. За результатами досліджень, 350 циклів заряду-розряду акумуляторі GEL зменшило час розряду на 44,3 % у порівнянні з початковим часом. Для акумулятора AGM 12V 100Ah при 30 циклах заряду-розряду час розряду вже знизився 49,8 %, що свідчить про погану стійкість AGM акумуляторів до високих температур.

За результатами дослідження циклічного ресурсу акумуляторів проведеного за температури 20 °C встановлено, що зростання глибини розряду акумуляторної батареї як AGM та GEL призводить до значного скорочення циклів заряду-розряду.

Так для AGM батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник знижується на 83,7 %.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Для дослідної GEL батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник циклів знижується на 86,2 %.

Глибокий розряд >80 % призводить до швидшої деградації хімічного складу батареї. Значного скорочення загальної кількості циклів, що витримує батарея.

Щоб подовжити термін служби акумулятора, рекомендовано підтримувати його рівень заряду в діапазоні від 20 % до 80 %, слід уникати повних розрядів (нижче 10 % і повних зарядів вище 95 %, оскільки це створює додаткове навантаження на хімічний склад елементів. Навіть зниження DoD з 80 % до 50 % може суттєво збільшити термін служби.

З результатів дослідження впливу температури зберігання батарей на втрату ємності AGM 12V 100Ah батарей встановлено, що із зростанням температури зберігання від 20 до 40 °C втрата ємності відбувається швидше і вже за 40 0C до 50 % він розряджається через 9 місяців.

Аналогічні результати отримані для акумулятора GEL 12V 100Ah. Де при зростанні температури зберігання від 8 до 40 °C втрата ємності прискорюється і при 40 °C становитиме 50 % через 10 місяців.

Отже, щоб мінімізувати втрату ємності, акумулятори слід зберігати в прохолодному, сухому місці з рівнем заряду не нижче 50% для літєвих або 80% для свинцево-кислотних батарей.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Manieniyan, V., M. Thambidurai, and R. Selvakumar, Study on energy crisis and the future of fossil fuels. Proceedings of SHEE, 2009. 10: p. 2234-3689.
2. Kreps, B.H., The rising costs of fossil-fuel extraction: an energy crisis that will not go away. American journal of economics and sociology, 2020. 79(3): p. 695-717.
3. Muradov, N.Z. and T.N. Veziroğlu, “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: an overview of carbon-neutral technologies. International journal of hydrogen energy, 2008. 33(23): p. 6804-6839.
4. Din, M.I., et al., Microbial fuel cells—A preferred technology to prevail energy crisis. International Journal of Energy Research, 2021. 45(6): p. 8370-8388.
5. Awan, A.B. and Z.A. Khan, Recent progress in renewable energy—Remedy of energy crisis in Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 33: p. 236-253.
6. Vanitha, M. and N. Balasubramanian, Waste minimization and recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries—a review. Environmental Technology Reviews, 2013. 2(1): p. 101-115.
7. Maddukuri, S., et al., On the challenge of large energy storage by electrochemical devices. Electrochimica Acta, 2020. 354: p. 136771.
8. Liu, C., et al., Advanced materials for energy storage. Advanced materials, 2010. 22(8): p. E28-E62.
9. May, G.J., A. Davidson, and B. Monahov, Lead batteries for utility energy storage: A review. Journal of energy storage, 2018. 15: p. 145-157.
10. Li, M., J. Liu, and W. Han, Recycling and management of waste lead-acid batteries: A mini-review. Waste Management & Research, 2016. 34(4): p. 298-306.
11. Bashir, N., et al. Lifetime maximization of lead-acid batteries in small scale UPS and distributed generation systems. in 2017 IEEE Manchester PowerTech. 2017. IEEE.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

12. Murariu, T. and C. Morari, Time-dependent analysis of the state-of-health for lead-acid batteries: An EIS study. Journal of Energy Storage, 2019. 21: p. 87-93.

13. Lavety, S., R.K. Keshri, and M.A. Chaudhari, A dynamic battery model and parameter extraction for discharge behavior of a valve regulated lead-acid battery. Journal of Energy Storage, 2021. 33: p. 102031.

14. Yu, Y., J. Mao, and X. Chen, Comparative analysis of internal and external characteristics of lead-acid battery and lithium-ion battery systems based on composite flow analysis. Science of The Total Environment, 2020. 746: p. 140763.

15. Kandeegan, R., et al., Battery economy: Past, present and future. Materials Today: Proceedings, 2022. 48: p. 143-147.

16. Lopes, P.P. and V.R. Stamenkovic, Past, present, and future of lead-acid batteries. Science, 2020. 369(6506): p. 923-924.

17. Treptow, R.S., The lead-acid battery: Its voltage in theory and in practice. Journal of chemical education, 2002. 79(3): p. 334.

18. Kumar, R.V., A low-cost green technology for recovering lead paste and lead-alloy grid materials for spent lead acid batteries. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2017. 126(1-2): p. 89-93.

19. Machado Santos, S., J. Cabral Neto, and M. Mendonça Silva, Forecasting model to assess the potential of secondary lead production from lead acid battery scrap. Environmental Science and Pollution Research, 2019. 26: p. 5782-5793.

20. Statista. Market Share of Battery materials for electric two-wheelers in China from 2016 to 2020. 2023; Available from:

<https://www.statista.com/statistics/1300248/china-market-share-electric-two-wheeler-battery/>.

21. Statista. Gravimetric energy density of different types of batteries in 2020. 2023; Available from:

<https://www.statista.com/statistics/1249539/gravimetric-energy-density-of-batteries/>.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

22. Statista. Distribution of the global market for grid-scale batteries in 2021, by type. 2023; Available from:

<https://www.statista.com/statistics/1339858/share-of-the-global-grid-scale-battery-market-by-type/>.

23. Kumar, S., et al., Lead and other elements-based pollution in soil, crops and water near a lead-acid battery recycling factory in Bangladesh. Chemosphere, 2022. 290: p. 133288.

24. Zeng, Z., et al., Lead exposure is associated with risk of impaired coagulation in preschool children from an e-waste recycling area. Environmental Science and Pollution Research, 2018. 25: p. 20670-20679.

25. Organization, W.H., Recycling used lead-acid batteries: health considerations. 2017.

26. Schriener, D., P. Taylor, and J. Grogan. A review of slag chemistry in lead recycling. in Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016. 2016. Springer.

27. Yu, J., et al., Energy based sustainability evaluation of spent lead acid batteries recycling. Journal of Cleaner Production, 2020. 250: p. 119467.

28. Y. Bai, N. Muralidharan, Y.-K. Sun, S. Passerini, M. Stanley Whittingham, I. Belharouak Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: concept of battery identity global passport Mater. Today, 41 (2020), pp. 304-315, 10.1016/j.mattod.2020.09.001

29. M. Ram, A. Aghahosseini, C. Breyer Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050 Technol. Forecast. Soc. Change, 151 (2020), Article 119682, 10.1016/j.techfore.2019.06.008

30. A. Breiter, E. Horetsky, M. Linder, R. Rettig Power spike: how battery makers can respond to surging demand from EVs <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/power-spike-how-battery-makers-can-respond-to-surging-demand-from-evs> (2022)

31. BloombergNEF Electric Vehicle Outlook 2021 (2021).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

32. F. Degen, O. Krätzig Future in battery production: an extensive benchmarking of novel production technologies as guidance for decision making in engineering IEEE Trans. Eng. Manag., 71 (2024), pp. 1038-1056.

33. Canada's new economic engine, modelling Canada's EV battery supply chain potential—and how best to seize it Clean Energy Canada Trillium (2022), pp. 0-28.

34. N. Akhmetov, A. Manakhov, A.S. Al-Qasim Li-ion battery cathode recycling: an emerging response to growing metal demand and accumulating battery waste Electronics, 12 (2023), p. 1152, 10.3390/electronics12051152.

35. The Paris Agreement Climate Action United Nations (2015).

36. B.M. Spears, W.J. Brownlie, D. Cordell, L. Hermann, J.M. Mogollón Concerns about global phosphorus demand for lithium-iron-phosphate batteries in the light electric vehicle sector Commun. Mater., 3 (2022), p. 14, 10.1038/s43246-022-00236-4.

37. L. Mathieu, C. Mattea From Dirty Oil to Clean Batteries European Federation for Transport & Environment (2021).

38. Bhutada, G.: The key minerals in an EV battery, <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>.

39. C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker, B. Steubing Future material demand for automotive lithium-based batteries Commun. Mater., 1 (2020), p. 99, 10.1038/s43246-020-00095-x.

40. S.H. Farjana, N. Huda, M.A.P. Mahmud Life cycle assessment of cobalt extraction process J. Sustain. Min., 18 (2019), pp. 150-161, 10.1016/j.jsm.2019.03.002.

41. R.B. Kaunda Potential environmental impacts of lithium mining J. Energy Nat. Resour. Law, 38 (2020), pp. 237-244, 10.1080/02646811.2020.1754596.

42. Net zero by 2050 data explorer <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/net-zero-by-2050-data-explorer> (2021).

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

43. A. Beaudet, F. Larouche, K. Amouzegar, P. Bouchard, K. Zaghbi Key challenges and opportunities for recycling electric vehicle battery materials Sustainability, 12 (2020), p. 5837, 10.3390/su12145837.

44. NREL NAATBatt Lithium-Ion Battery Supply Chain Database (2024).

45. S. Chu, A. Majumdar Opportunities and challenges for a sustainable energy future Nature, 488 (2012), pp. 294-303, 10.1038/nature11475.

46. R. Zhang, X. Ma, X. Shen, Y. Zhai, T. Zhang, C. Ji, J. Hong Life cycle assessment of electrolytic manganese metal production J. Clean. Prod., 253 (2020), Article 119951, 10.1016/j.jclepro.2019.119951.

47. Z. Yang, H. Huang, F. Lin Sustainable electric vehicle batteries for a sustainable world: perspectives on battery cathodes, environment, supply chain, manufacturing, life cycle, and policy Adv. Energy Mater., 12 (2022), Article 2200383, 10.1002/aenm.202200383.

48. X. Lai, Q. Chen, X. Tang, Y. Zhou, F. Gao, Y. Guo, R. Bhagat, Y. Zheng Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: a lifespan perspective Transportation, 12 (2022), Article 100169, 10.1016/j.etrans.2022.100169.

49. S. Al-Asheh, A. Aidan, T. Allawi, F. Hammoud, H. Al Ali, M. Al Khamiri Treatment and recycling of spent lithium-based batteries: a review J. Mater. Cycles Waste Manag., 26 (2024), pp. 76-95, 10.1007/s10163-023-01842-1

50. T. Feng, W. Guo, Q. Li, Z. Meng, W. Liang Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide batteries and lithium iron phosphate batteries for electric vehicles in China J. Energy Storage, 52 (2022), Article 104767, 10.1016/j.est.2022.104767

51. M.S. Koroma, D. Costa, M. Philippot, G. Cardellini, M.S. Hosen, T. Coosemans, M. Messagie Life cycle assessment of battery electric vehicles: implications of future electricity mix and different battery end-of-life management Sci. Total Environ., 831 (2022), Article 154859, 10.1016/j.scitotenv.2022.154859.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

52. M. Philippot, G. Alvarez, E. Ayerbe, J. Van Mierlo, M. Messagie Eco-efficiency of a lithium-ion battery for electric vehicles: influence of manufacturing country and commodity prices on GHG emissions and costs Batteries, 5 (2019), p. 23, 10.3390/batteries5010023.

53. S. Windisch-Kern, E. Gerold, T. Nigl, A. Jandric, M. Altendorfer, B. Rutrecht, S. Scherhauser, H. Raupenstrauch, R. Pomberger, H. Antrekowitsch, F. Part Recycling chains for lithium-ion batteries: a critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies Waste Manag., 138 (2022), pp. 125-139, 10.1016/j.wasman.2021.11.038.

54. C. Hagelüken, D. Goldmann Recycling and circular economy towards a closed loop for metals in emerging clean technologies Miner. Econ., 35 (2022), pp. 539-562, 10.1007/s13563-022-00319-1.

55. L.H. Xavier, E.C. Giese, A.C. Ribeiro-Duthie, F.A.F. Lins Sustainability and the circular economy: a theoretical approach focused on e-waste urban mining Resour. Pol., 74 (2021), Article 101467, 10.1016/j.resourpol.2019.101467.

56. X. Zeng, T. Xiao, G. Xu, E. Albalghiti, G. Shan, J. Li Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining J. Manag. Sci. Eng., 7 (2022), pp. 98-106, 10.1016/j.jmse.2021.05.002.

57. L. Chen, X. Li, Y. Luo, W. Tan, Q. Ma, M. Wang, J. Yang Impact of cobalt recycling on China's electrification process: assessing the potential reduction in cobalt demand from battery recycling J. Clean. Prod., 434 (2024), Article 139917, 10.1016/j.jclepro.2023.139917.

58. Cobalt market 2023.pdf.

59. D. Larcher, J.-M. Tarascon Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage Nat. Chem., 7 (2015), pp. 19-29, 10.1038/nchem.2085.

60. Marcelo Azevedo, Magdalena Baczyńska, Ken Hoffman, Aleksandra Krauze McKinsey & Company (2022) <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/lithium-mining-how-new-production-technologies-could-fuel-the-global-ev-revolution>.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

61. M.C.C. Lima, L.P. Pontes, A.S.M. Vasconcelos, W. de Araujo Silva Junior, K. Wu Economic aspects for recycling of used lithium-ion batteries from electric vehicles *Energies*, 15 (2022), 10.3390/en15062203.

62. E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodríguez, J.M. Pérez, M. Colledani Lithium-ion batteries towards circular economy: a literature review of opportunities and issues of recycling treatments *J. Environ. Manag.*, 264 (2020), Article 110500, 10.1016/j.jenvman.2020.110500.

					MP.AT-94.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

**Комплект ілюстративного матеріалу до захисту
магістерської роботи**

**студент групи АТм-24-2
Черепаша Олег Олегович**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ ТА
ЇХ ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ В УМОВАХ СТАНЦІЇ
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ "АРСЕН - АВТО"**

Науковий керівник: доц. Мельник В.М.

**Івано-франківськ
2025р.**

МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1

Актуальність. Акумулятор – це пристрій, що зберігає енергію для подальшого використання. Він працює завдяки хімічним реакціям: коли його заряджають, електрична енергія перетворюється на хімічну. Потім, за розряджанні, ця хімічна енергія знову перетворюється на електричну. Потреба в акумуляторах залежить від їх призначення: для автономного живлення побутових приладів потрібна ємність, розрахована за формулою, яка враховує сумарну потужність та необхідний час роботи. Для автомобілів, підбір здійснюється за об'ємом двигуна та рекомендаціями виробника. Сучасні автомобільні акумулятори мають термін служби до 5 років, але правильний догляд може продовжити його до 7-10 років.

Мета роботи полягає в теоретичних та експериментальних дослідженнях експлуатаційних показників ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та забезпечення підвищення їх терміну служби.

Завдання дослідження:

1. Виконати аналіз літературних джерел у сфері експлуатації та утилізації АКБ.
2. Описати будову та принцип роботи основних типів АКБ їх переваги та недоліки.
3. Дослідити експлуатаційні показники ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та їх вплив на термін служби.
4. Узагальнити та сформулювати висновки.

Об'єкт дослідження – свинцево-кислотні акумуляторні батареї виготовлені за технологією AGM та GEL.

Предмет дослідження – вплив експлуатаційних показників роботи свинцево-кислотних АКБ на їх термін служби.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Здійснено аналіз літературних джерел у сфері експлуатації та утилізації АКБ.
2. Описано будову та принцип роботи основних типів АКБ їх переваги та недоліки.
3. Досліджено експлуатаційні показники ефективності роботи свинцево-кислотних АКБ та встановлено їх вплив на термін служби.
4. Узагальнено та сформульовано висновки.

Наукова новизна.

Теоретично та експериментально досліджено вплив умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ та встановлено їх вплив на термін служби.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження впливу умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ.

Особистий внесок автора. Автором визначено основні завдання роботи, обрано та опановано методи їх вирішення, підбрано та опрацьовано літературні джерела, здійснено аналіз і теоретичне обґрунтування зібраного матеріалу, в тому числі досліджено вплив умов експлуатації на ефективність роботи свинцево-кислотних АКБ, узагальнено та сформульовано висновки.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТО «АРСЕН АВТО»

3



Рисунок 1 – Місце розташування СТО «Арсен Авто»

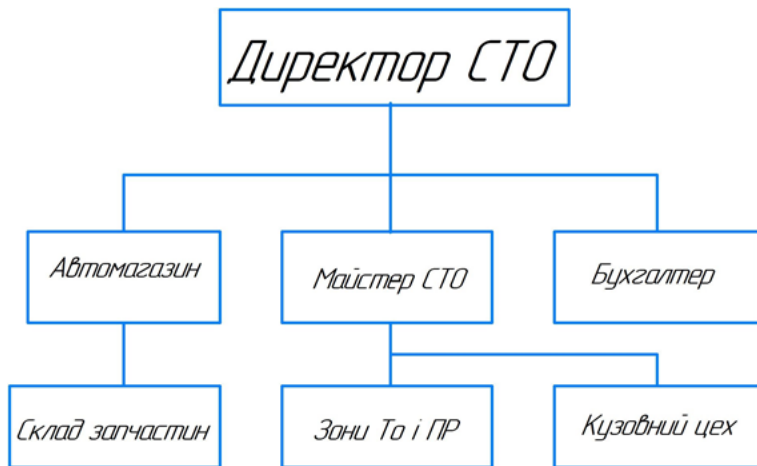


Рисунок 2 – Схема загальної структури управління СТО «Арсен Авто»

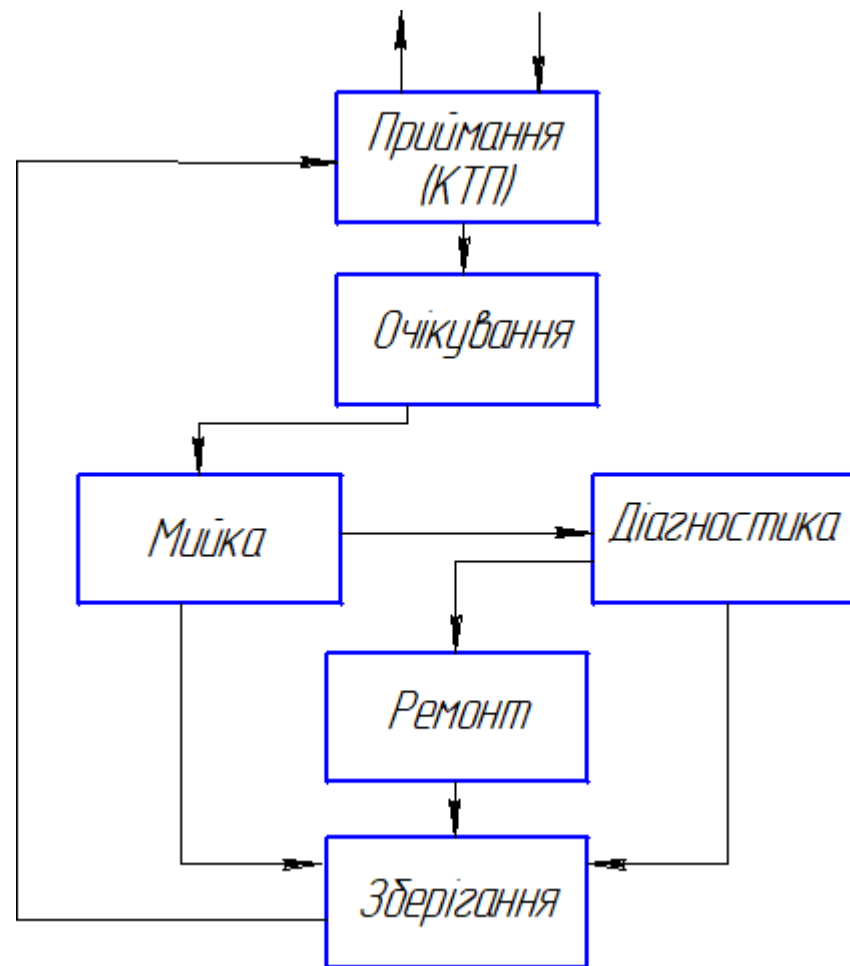
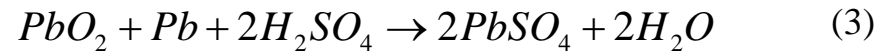
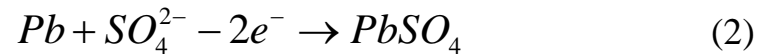
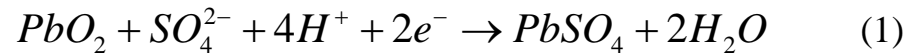


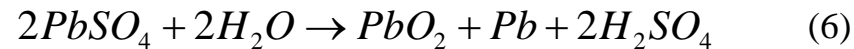
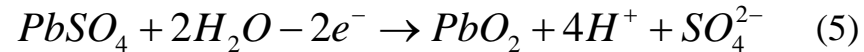
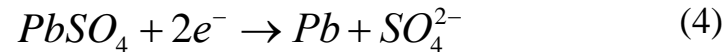
Рисунок 3 – Схема технологічного процесу на ТО і ПР на СТО «Арсен Авто»

ПРИНЦИП РОБОТИ, ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ

Перетворення хімічної енергії, що зберігається в сполуках свинцю, на електричну енергію шляхом анодного окислення свинцю (Pb) та катодного відновлення діоксиду свинцю (PbO₂) до сульфату свинцю (PbSO₄) у процесі розрядки АКБ [9, 17]:



Процес перетворення сульфату свинцю (PbSO₄) з електроліту на діоксид свинцю (PbO₂) на аноді та на свинець (Pb) на катоді у процесі зарядки АКБ [17]:



Переваги свинцево-кислотних АКБ

Низька вартість: свинцево-кислотні АКБ є одними з найдоступніших за ціною.

Надійність: вони витримують великі навантаження та зберігають ефективність протягом тривалого часу.

Довговічність: при правильній експлуатації термін служби може сягати 10 років.

Низький саморозряд: мають низький рівень саморозрядження.

Простота обслуговування: сучасні AGM-акумулятори (з абсорбованим електролітом) майже не потребують обслуговування.

Недоліки свинцево-кислотних АКБ

Велика вага і розмір: вони важкі та громіздкі.

Токсичність: містять отруйні речовини (свинець) та виділяють небезпечні гази під час заряджання (водень).

Обмежений термін служби: кількість циклів заряд-розряд обмежена, і з часом ємність зменшується.

Необслуговуваність (для певних типів): обслуговувані моделі потребують контролю рівня електроліту та його щільності.

Вимогливість до умов експлуатації свинцево-кислотних АКБ

Неприпустимі для встановлення в салоні автомобіля через випаровування сірчаної кислоти.

Не можна зберігати в розрядженому стані.

Можливість замерзання при сильному розряді в холодну пору року.

ТИПИ, ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ЛІТІЄВИХ АКБ

В даний час в масовому виробництві літій-іонних акумуляторів використовуються три класи катодних матеріалів:

- Кобальтат літію LiCoO_2 і тверді розчини на основі ізоструктурні йому нікелата літію;
- Літій-марганцева шпінель LiMn_2O_4 ;
- Літій-ферофосфат LiFePO_4 .

Переваги літій-іонних АКБ

- Висока енергетична щільність (ємність);
- Низький саморозряд;
- Не вимагають обслуговування.

Недоліки літій-іонних АКБ

- Li-іон акумулятори першого покоління були схильні до вибухового ефекту.
- Втрачають свою ємність, якщо вони не використовуються.
- Висока вартість.

Переваги літій-полімерний акумулятор (Li-pol, Li-polymer, LiPo, LIP, Lipoly)

- Велика густина енергії на одиницю об'єму і маси (в порівнянні з літій-іонними);
- Низький струм саморозряду;
- Товщина елементів від 1 мм;
- Можливість отримувати різні форми;
- Відсутність ефекту пам'яті;
- Незначний перепад напруги в міру розряду;
- Досить широкий діапазон робочих температур: від -20 до $+40$ ° C (за даними виробників).

Недоліки літій-полімерний акумулятор

- Акумулятори пожежонебезпечні, особливо при перезаряді і перегрів.

Переваги літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4 , LFP)

- Забезпечує більш тривалий термін служби, ніж інші літій-іонні батареї;
- Мають дуже стабільну напругу розряду;
- У зв'язку з постійною напругою 3,2 В на виході, чотири акумулятора можуть бути з'єднані послідовно для отримання номінальної напруги на виході в 12,8 В;
- Використання фосфатів дозволяє уникнути витрат кобальту і екологічних проблем;
- Більш високий піковий струм (а з огляду на стабільність напруги, більш висока пікова потужність), ніж, наприклад, у LiCoO_2 ;
- Малий струм саморозряду;
- Більш повільна втрата ємності, ніж у літій-іонних або літій-полімерних акумуляторів;
- Термічна і хімічна стабільність, що істотно підвищує безпеку батареї.

Недоліки літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4 , LFP)

- Питома густина енергії (енергія / обсяг) нового акумулятора LFP приблизно на 14% нижче, ніж у нових літій-іонних акумуляторів.

Переваги літій-марганцеві акумулятори (LiMn_2O_4 , LMR)

- Здатність переносити великі струми заряду-розряду;
- Найбільш безпечні з усіх літійових акумуляторів;
- Термін служби складає більше 500 циклів.

Недоліки літій-марганцеві акумулятори (LiMn_2O_4 , LMR)

- Відносно низька ємність;
- Велика чутливість до низьких температур (охолоджувати нижче -10°C не рекомендується).

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКБ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ



Рисунок 4 – Загальна класифікація свинцево-кислотних АКБ

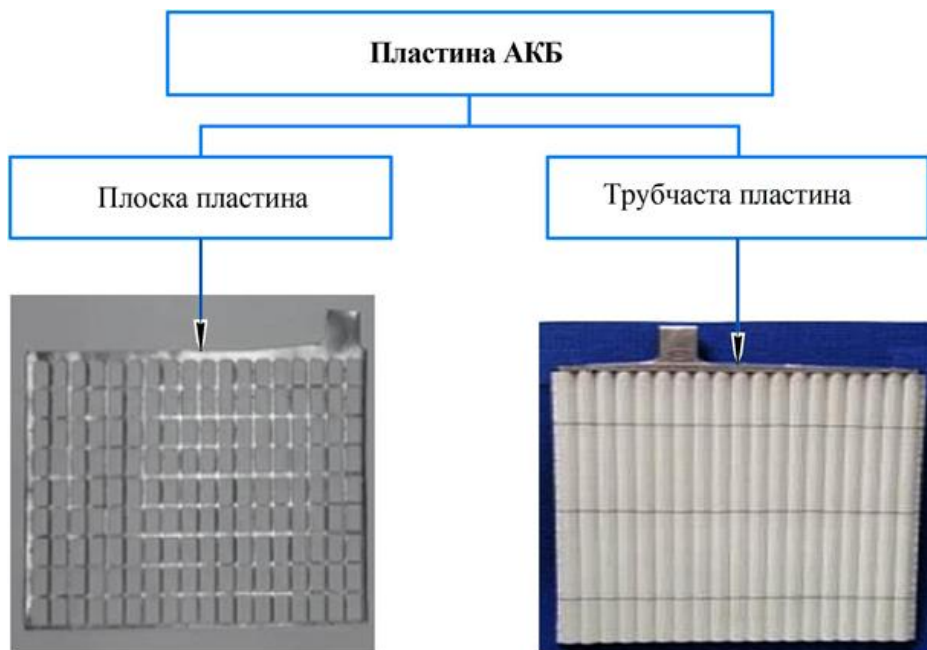


Рисунок 5 – Класифікація свинцево-кислотних АКБ в залежності від типу пластин

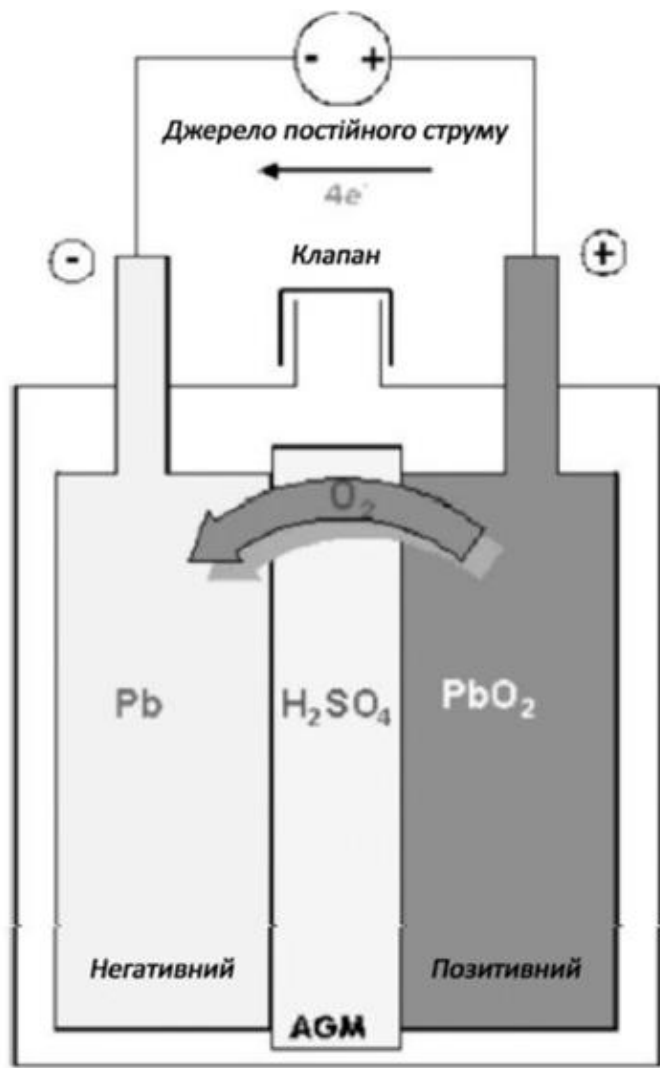


Рисунок 6 – Конструкція свинцево-кислотного акумулятора виготовленого за технологією AGM

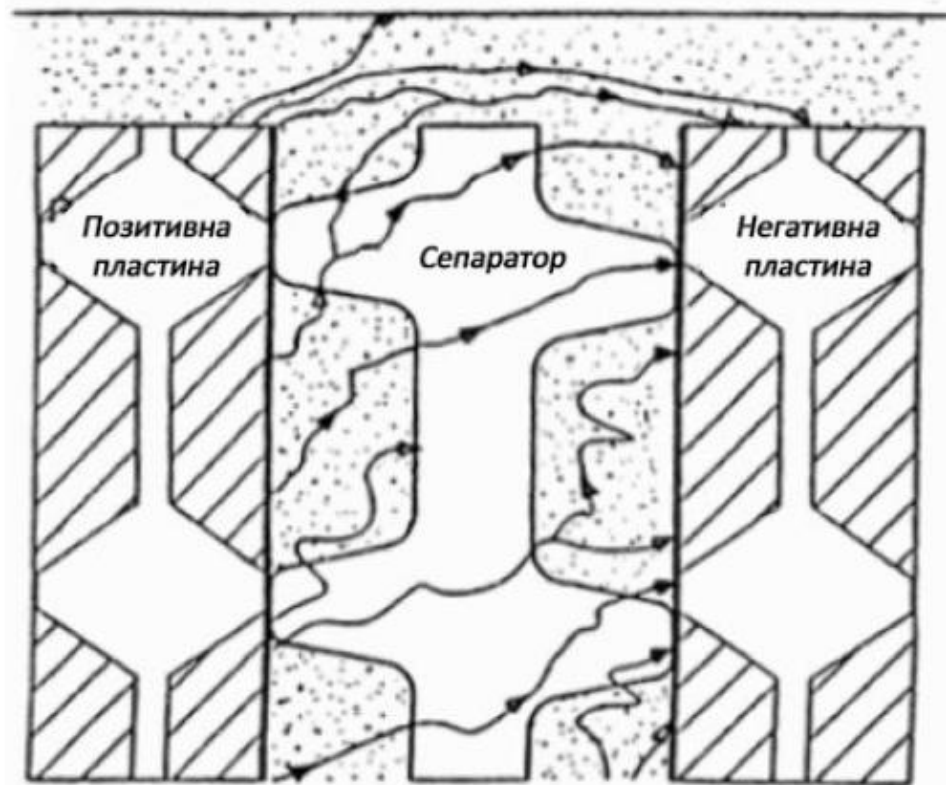


Рисунок 7 – Конструкція свинцево-кислотного акумулятора виготовленого за технологією GEL



Рисунок 8 – Німецький матеріал - EVONIK - AEROSIL 200 для гелевого електроліту



Рисунок 9 – Сучасна трубчаста позитивна пластина для батарей Tubular OPzV/OPzS



Рисунок 10 – Трубка з бічним захистом для запобігання коротких замикань через тертя в GEL акумуляторах

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка AGM та GEL акумуляторів ємністю 100 А · год.

Назва показника	Значення параметр для акумулятора	
	AGM	GEL
Швидкість саморозряду, %/місяць	<3	<2
Внутрішній опір, Ом	5,6	3,5
Максимальна сила струму розряду, А	до 1000	до 1200
Стійкість до високих температур, °С	до 40	до 50
Циклічний ресурс при повному розряді	280-300	300-400
Тип сепаратора	пористе скловолокно	силікагель
Електроліт	H ₂ SO ₄	GEL
Об'єм електроліту	AGM = 60-70 % GEL	
Густина електроліту, г/см ³	1,30-1,32	1,26-1,28

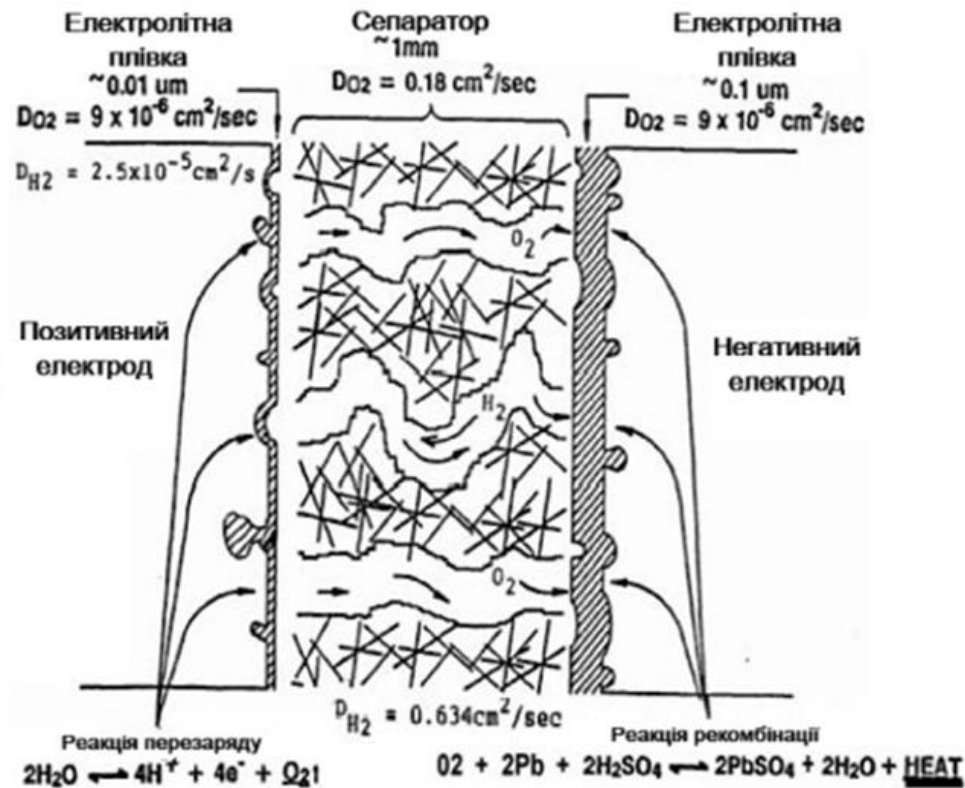
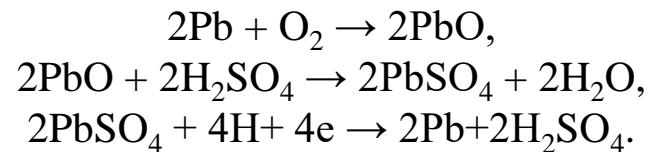


Рисунок 11 – Рекомбінація при заряді VRLA – AGM та GEL акумуляторів

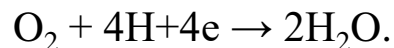
Позитивна реакція:



Негативна реакція:



Загальна реакція:



ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ АКБ ДО ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРИСКОРЕНОМУ ЦИКЛІ РОЗРЯДУ

13

Таблиця 2 – Коротка технічна характеристика тестера для АКБ моделі KW650

Назва параметра	Значення
Температура робочого середовища	0-50 °С
Температура зберігання	від -20 до 70 °С
Діапазон вимірювання ємності акумулятора, А · год	2-220
Напруга застосування, В	6; 12
Вхідна напруга, В	6-16
Країна виробник	Китай

Таблиця 3 – Коротка технічна характеристика цифрового мультиметра моделі UT30С

Назва параметра	Значення
Змінна напруга, (AC)	200 В / 500 В; $\pm(1.2\%+10)$
Постійна напруга, (DC)	200 мВ / 2000мВ / 20 В / 200 В / 500 В; $\pm(0.5\%+2)$
Постійний струм (DC)	200 мА / 2000 мА / 20мА/ 200 мА/ 20А; $\pm(1\%+2)$
Опір	200 Ом / 2000 Ом / 20кОм/ 200 кОм/ 20 мОм; $\pm(0,8\%+2)$
Температура	-40°С ~1000°С; $\pm(1\%+3)$
Країна виробник	Китай



Рисунок 12 – Зовнішній вигляд тестера автомобільних акумуляторів моделі KW650

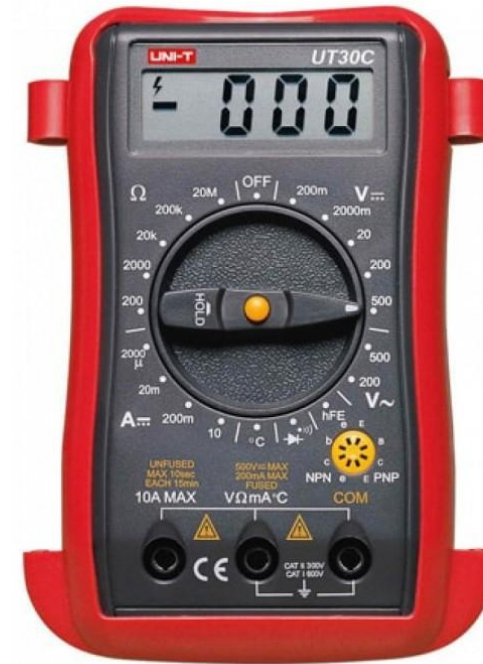
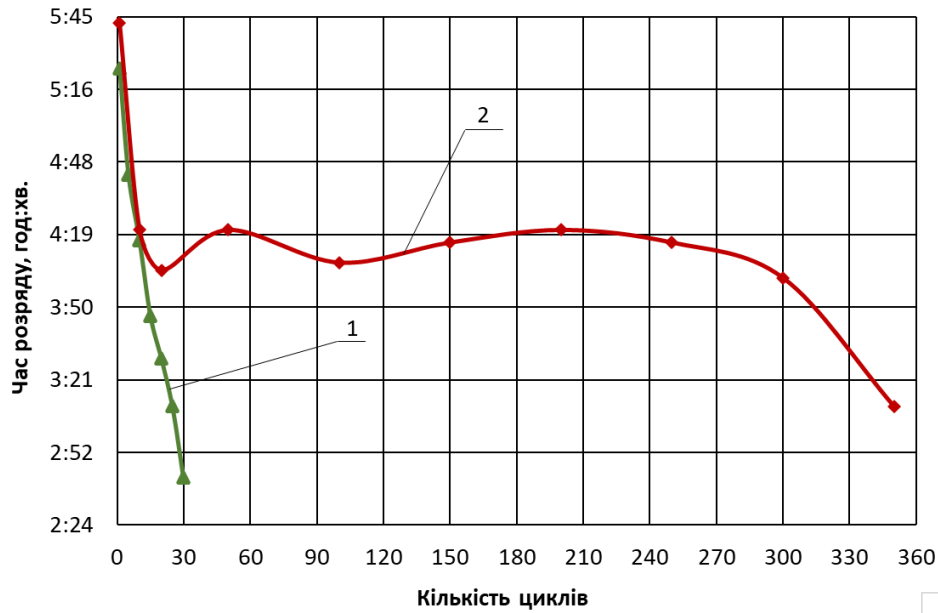
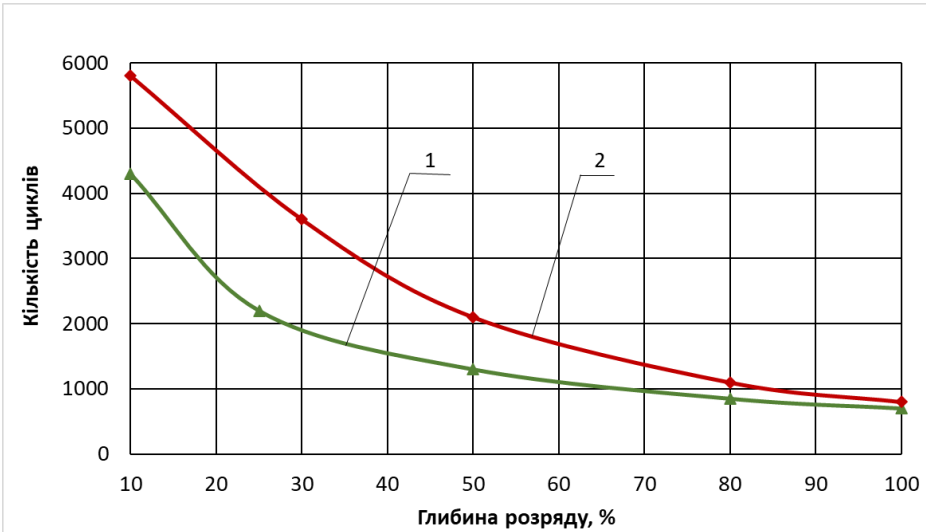


Рисунок 13 – Зовнішній вигляд мультиметра моделі UT30C



1 – AGM; 2 – GEL

Рисунок 14 – Результати випробувань стійкості акумулятора AGM та GEL 12V 100Ah



1 – AGM; 2 – GEL

Рисунок 15 – Результати дослідження циклічного ресурсу акумулятора AGM та GEL 12V 100Ah

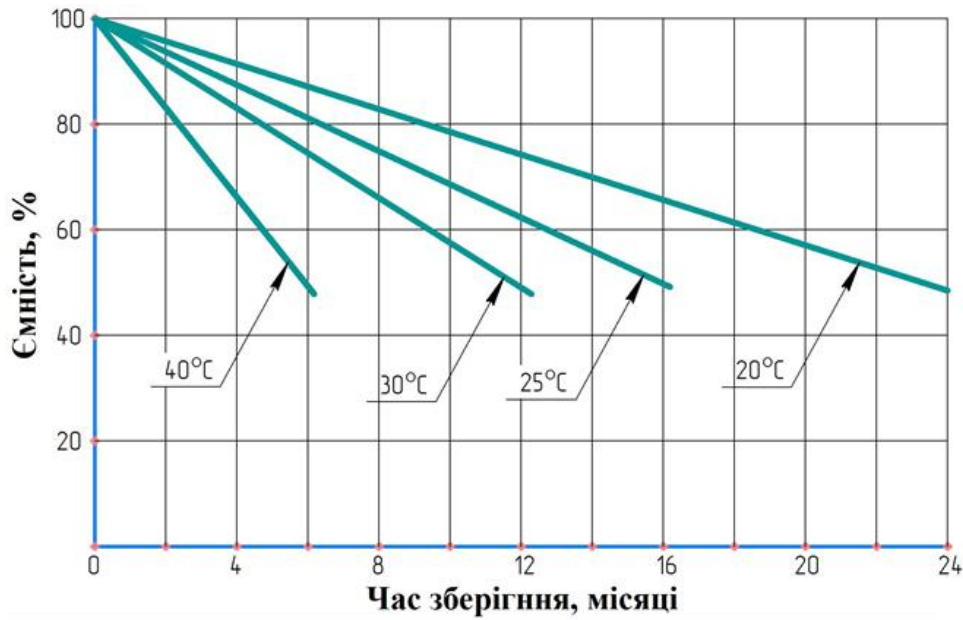


Рисунок 16 – Результати дослідження втрати ємності при зберіганні акумулятора AGM 12V 100Ah за різних температур

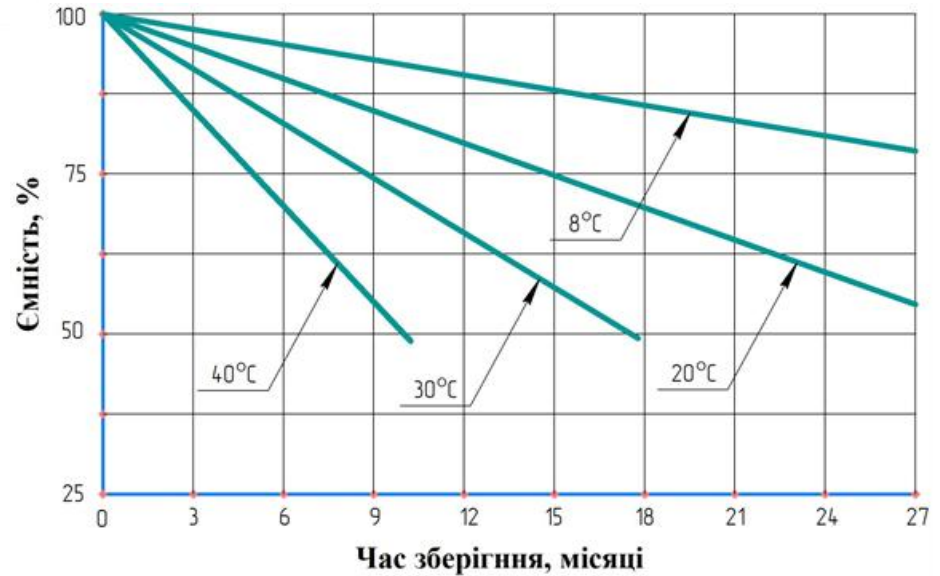


Рисунок 15 – Результати дослідження втрати ємності при зберіганні акумулятора GEL 12V 100Ah за різних температур

За результатами проведених досліджень, на сьогодні широко використовуються свинцево-кислотні (AGM, GEL) акумулятори та літій-іонні серед яких широкого поширення набули літій-кобальтові, літій-марганцеві та літій-ферофосфатні.

До основних переваг свинцево-кислотних (AGM, GEL) АКБ відноситься: низька вартість, надійність; довговічність; низький саморозряд; простота обслуговування.

Недоліки свинцево-кислотних (AGM, GEL) АКБ: велика вага і розмір; токсичність; обмежений термін служби; необслуговуваність (для певних типів).

Поширення літій-ферум-фосфатних акумуляторів обумовлено їх відносно низькою вартістю.

Літій-іонні акумулятори мають ряд переваг: висока енергетична щільність (ємність); низький саморозряд; не вимагають обслуговування.

До недоліки літій-іонних АКБ відноситься те, що Li-ion АКБ першого по-коління були схильні до вибухового ефекту. Це пояснювалося тим, що в них використовувався анод з металевого літію, на якому в процесі багаторазових циклів заряду-розряду виникали просторові відростки (дендрити), що призводять до замикання електродів і, як наслідок, пожежі або вибуху. Цю проблему вдалося остаточно вирішити заміною матеріалу анода на графіт. Подібні процеси відбувалися і на катодах літій-іонних акумуляторах на основі оксиду кобальту при порушенні умов експлуатації (перезарядці).

Літій-феро-фосфатні акумулятори повністю позбавлені цих недоліків. Крім того, всі сучасні зарядні пристрої для літій-іонних акумуляторів запобігають перезаряд і перегрів внаслідок занадто інтенсивного заряду.

Досить ефективними є літій-полімерні акумулятори ресурс яких становить 800-900 циклів при розрядних токах до 2С і втрати ємності не нижче 20% (для порівняння, у NiCd акумуляторів - 1000 циклів, у NiMH акумуляторів - 600 циклів, а у LiFePO₄ акумуляторів - 2000 циклів заряду-розряду).

Висока температура прискорює хімічні реакції в акумуляторі, що призводить до його швидшого старіння та втрати ємності, а також пошкоджує захисний шар, скорочуючи термін служби.

Деякі типи акумуляторів, як-от літій-залізо-фосфатні, мають кращу стійкість до високих температур (від -30 до +50 °C) і можуть безпечно використовуватися поза приміщеннями, тоді як для інших, наприклад, свинцево-кислотних, оптимальна робоча температура становить від -10 °C до +40 °C.

Результати досліджень показали, що за температури 50 °C стійкість АКБ до розряду значно вища в акумуляторах GEL. За результатами досліджень, 350 циклів заряду-розряду акумуляторі GEL зменшило час розряду на 44,3 % у порівнянні з початковим часом. Для акумулятора AGM 12V 100Ah при 30 циклах заряду-розряду час розряду вже знизився 49,8 %, що свідчить про погану стійкість AGM акумуляторів до високих температур.

За результатами дослідження циклічного ресурсу акумуляторів проведеного за температури 20 °C встановлено, що зростання глибини розряду акумуляторної батареї як AGM та GEL призводить до значного скорочення циклів заряду-розряду.

Так для AGM батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник знижується на 83,7 %.

Для дослідної GEL батареї при зростанні глибини розряду з 10 до 100% цей показник циклів знижується на 86,2 %.

Глибокий розряд >80 % призводить до швидшої деградації хімічного складу батареї. Значного скорочення загальної кількості циклів, що витримує батарея.

Щоб подовжити термін служби акумулятора, рекомендовано підтримувати його рівень заряду в діапазоні від 20 % до 80 %, слід уникати повних розрядів (нижче 10 % і повних зарядів вище 95 %, оскільки це створює додаткове навантаження на хімічний склад елементів. Навіть зниження DoD з 80 % до 50 % може суттєво збільшити термін служби.

З результатів дослідження впливу температури зберігання батарей на втрату ємності AGM 12V 100Ah батарей встановлено, що із зростанням температури зберігання від 20 до 40 °C втрата ємності відбувається швидше і вже за 40 °C до 50 % він розряджається через 9 місяців.

Аналогічні результати отримані для акумулятора GEL 12V 100Ah. Де при зростанні температури зберігання від 8 до 40 °C втрата ємності прискорюється і при 40 °C становитиме 50 % через 10 місяців.

Отже, щоб мінімізувати втрату ємності, акумулятори слід зберігати в про-холодному, сухому місці з рівнем заряду не нижче 50% для літєвих або 80% для свинцево-кислотних батарей.