

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Волосянський Андрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.10
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для установок накопичення енергії з використанням вживаних LiFePO₄ акумуляторів»

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня А.В. Волосянський
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Райтер Петро Михайлович, док. тех. н., професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

В. С. Цих
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Волосянському Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для установок накопичення енергії з використанням вживаних $LiFePO_4$ акумуляторів

керівник роботи Райтер Петро Михайлович, док. тех. н., професор,

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

затверджені наказом ІФНТУНГ від “29” квітня 2025 року № 268/7

2. Строк подання студентом роботи “13” червня 2025 року _____

3. Вихідні дані до роботи тип акумуляторів установки – літійферофосфатні, максимальна потужність установки 5 кВт, напруга на виході в діапазоні 45-55 В, заряджання батареї з електромережі або гібридної СЕС, вимірювання і реєстрація заряду батареї та стану деградації окремих комірок _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Визначити переваги батарей типу $LiFePO_4$ у порівнянні з іншими типами АКБ.

2. Які чинники найсильніше впливають на деградацію акумуляторів під час експлуатації?

3. Як реалізувати алгоритми моніторингу, захисту та балансування в системі АКБ.

4. Визначити економічну доцільність використання акумуляторів другого циклу життя

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>1-3</i>	<i>професор Райтер П.М.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		

7. Дата видачі завдання “29” квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	29.04.2025 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ АКУМУЛЯТОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВДЕ».	31.04.2025 – 10.05.2025 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВЖИВАНИХ АКУМУЛЯТОРІВ LiFePO ₄ ».	10.05.2025 – 26.05.2025 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «РОЗРОБКА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЇЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ».	27.05.2025 – 29.05.2025 р.	
5	Оформлення роботи.	30.05.2025 – 13.06.2025 р.	

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Волосянський А. В. «Розроблення інформаційно-виміральної системи для установок накопичення енергії з використанням вживаних LiFePO₄ акумуляторів». Дипломна робота освітнього рівня - бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність - 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». - Івано-Франківськ, 2025.

Дипломна робота присвячена розробці інформаційно-виміральної системи, яка використовується в енергетичних установках для накопичення електроенергії на основі вживаних акумуляторів типу LiFePO₄. У роботі проведено аналіз сучасного стану розвитку акумуляторних технологій, особливостей фотоелектричних станцій, вимог до систем акумуляування енергії та обґрунтовано доцільність використання вторинних батарей у відновлюваній енергетиці.

Робота структурно поділена на вступ, три основні розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг документа становить 74 сторінки, містить 15 рисунків і 5 таблиць. Бібліографія охоплює 28 джерел.

У першому розділі розглянуто розвиток технологій накопичення енергії у відновлюваній енергетиці, а також виконано порівняння основних типів акумуляторів, їхніх характеристик, переваг та недоліків. Детально проаналізовано особливості акумуляторів типу LiFePO₄, які демонструють високу безпеку, екологічність, тривалий термін служби та сумісність із фотоелектричними системами.

Другий розділ присвячено аналізу доцільності вторинного використання акумуляторів LiFePO₄. Вивчено механізми деградації вживаних акумуляторів, вплив температури, глибини розряду, а також умови експлуатації на збереження ємності. Окрему увагу приділено можливостям інтеграції вживаних батарей із транспортних засобів у стаціонарні енергосистеми.

У третьому розділі запропоновано технічне рішення з розроблення інформаційно-виміральної системи, до складу якої входять плата керування

SMART JK BMS, інтерфейси моніторингу, а також результати моделювання та проектування електричних схем у програмному середовищі SPlan7. Пояснено алгоритми роботи системи, схеми підключення, захисту та управління.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розробленої системи у проектуванні автономних або резервних енергетичних установок для приватного, комерційного або промислового використання. Отримані результати сприяють підвищенню ефективності та надійності відновлюваних джерел енергії, зменшенню залежності від зовнішніх джерел живлення, а також екологічній утилізації вживаних акумуляторів.

Ключові слова: накопичення енергії, LiFePO_4 , LFP, вторинне використання, акумуляторні батареї, фотоелектрична станція, BMS, відновлювана енергетика, інформаційно-вимірювальна система, деградація, ефективність.

ABSTRACT

Volosyanskyi A. V. "Development of an Information and Measurement System for Energy Storage Installations Using Second-Life LiFePO₄ Batteries." Bachelor's Thesis, manuscript form. Field of Study – 152 "Metrology and Information-Measuring Technologies". – Ivano-Frankivsk, 2025.

This thesis is devoted to the development of an information and measurement system used in energy storage installations based on second-life LiFePO₄ batteries. The study analyzes the current state of battery storage technologies, the features of photovoltaic power stations, energy storage system requirements, and substantiates the feasibility of using secondary batteries in renewable energy applications.

The thesis is structured into an introduction, three main chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the document is 74 pages, including 15 figures and 5 tables. The bibliography comprises 28 sources.

The first chapter examines the development of energy storage technologies in renewable energy and compares key types of batteries, their characteristics, advantages, and disadvantages. Special attention is given to the features of LiFePO₄ batteries, which demonstrate high safety, environmental friendliness, long service life, and compatibility with photovoltaic systems.

The second chapter focuses on the feasibility analysis of reusing LiFePO₄ batteries. It explores degradation mechanisms of used batteries, the impact of temperature, depth of discharge, and operating conditions on capacity retention. It also highlights the potential for integrating batteries from electric vehicles into stationary energy systems and provides an overview of international experience.

The third chapter presents a technical solution for the development of the information and measurement system, which includes a SMART JK BMS control board, monitoring interfaces, and electrical circuit design and modeling in the SPlan7 software environment. The operational algorithms of the system, connection schemes, protection, and control functions are explained.

The practical significance of the thesis lies in the potential application of the developed system in designing autonomous or backup energy installations for private, commercial, or industrial use. The obtained results contribute to improving the efficiency and reliability of renewable energy systems, reducing dependence on external power sources, and promoting the ecological reuse of used batteries.

Keywords: energy storage, LiFePO_4 , LFP second-life use, battery systems, photovoltaic station, BMS, renewable energy, information and measurement system, degradation, efficiency.

Зміст

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ	10
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ АКУМУЛЯТОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВДЕ	13
1.1.Визначення акумуляторної батареї	15
1.2 Особливості та властивості акумуляторів типу LiFePO ₄	18
1.3. Фотоелектричні станції: принципи роботи, будова та особливості енергозберігання	24
1.3.1 Будова фотоелектричної станції	25
1.3.2 Особливості акумуляції електроенергії в ФЕС	28
1.3.3 Вимоги до систем акумуляування електричної енергії	30
1.4 Економічні та екологічні аспекти вторинного використання акумуляторів	31
Висновок до розділу	33
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВЖИВАНИХ АКУМУЛЯТОРІВ LiFePO₄	34
2.1. Деградація акумуляторів LiFePO ₄ після першого циклу життя: основні чинники	34
2.2. Технічні параметри вживаних акумуляторів у порівнянні з новими	39
2.3 Оцінка ефективності використання вживаних LFP акумуляторів для акумуляування енергії з ФЕС	40
2.4 Моделі прогнозування залишкового ресурсу акумуляторів	42
Висновок до розділу	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЇЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	46

3.1 Інформаційно-вимірювальний контроль та моніторинг	46
3.2 Проектування системи накопичення енергії на базі LiFePO ₄	59
3.3 Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи контролю стану та заряду акумуляторної батареї	63
3.4 Економічний аналіз використання вживаних акумуляторів у гібридній ФЕС	65
Висновок до розділу	67
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

АКБ – акумуляторна батарея

BMS – Battery Management System (система керування акумулятором)

LiFePO₄ / LFP – літій-залізо-фосфат

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ФЕС – фотоелектрична станція

JK BMS – система Smart-керування акумулятором від JK

SPlan7 – програмне середовище проєктування електричних схем

SOC – State of Charge (стан заряду)

DoD – Depth of Discharge (глибина розряду)

SoH – State of Health (стан зносу акумулятора)

DC / AC – постійний / змінний струм

OPzS – свинцево-кислотна батарея з трубчастим анодом

OPzV – герметизована батарея з гелем

AGM – Absorbent Glass Mat (технологія свинцевих батарей)

GEL – гелевий АКБ

NMC – нікель-марганцево-кобальтовий АКБ

NCA – нікель-кобальт-алюмінієвий АКБ

Li-Ion – літій-іонний АКБ

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЕМ – електромобіль

ОЕС – Об'єднана енергетична система

UART, CAN, RS485, I2C, Wi-Fi, Bluetooth – цифрові інтерфейси, що використовуються у Smart BMS

ВСТУП

Актуальність роботи

Після повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України, терористичного бомбардування Об'єднаної Енергосистеми України з метою знищення ОЕС України, повстало питання щодо акумулювання електроенергії, як для приватних осіб, так і для підприємств, задля продовження роботи виробничих ліній.

Вирішенням проблеми є використання акумулюючі станції другого циклу життя, заради масовості й доступності електроенергії. Коли автомобільні акумулятори досягають завершення експлуатаційного періоду, вони зберігають від 60% до 80% первісної енергетичної ємності. Вторинне застосування відпрацьованих батарей з електричних транспортних засобів створює можливість використати цей залишковий потенціал для накопичення електроенергії в різних сферах, зокрема як мобільні енергонакопичувачі чи стаціонарні батарейні системи.

Такий підхід до утилізації автомобільних енергонакопичувачів дозволяє скоротити викиди вуглекислого газу та зменшити споживання матеріалів, необхідних для створення нових акумуляторних батарей на початковому етапі. Крім того, це підвищує економічну вартість акумуляторів електротранспорту, стимулюючи їх масове впровадження.

З огляду на зростаючу популярність електричних автомобілів, обсяг батарей, придатних для вторинного застосування, постійно збільшується. Відтак загальною метою дипломної роботи є впровадження технологій продовження застосування відпрацьованих акумуляторних систем, зокрема у системі гібридних фотоелектричних станцій

Мета і задачі дослідження

Мета і ціль дослідження спрямовані на розв'язання прикладного завдання у сфері управління енергетичними ресурсами – вивчення результативності впровадження відпрацьованих акумулюючих систем на базі LiFePO_4 у систему гібридних фотоелектричних станцій та розроблення інформаційно-вимірювальної системи контролю стану вказаних систем акумуляції електроенергії.

Досягнення визначеної мети потребує розв'язання наступних завдань:

1. Вивчення систем безперебійним енергозабезпеченням на основі фотоелектричних станцій.
2. Розгляд категорій акумуляторних пристроїв для накопичення електричної енергії.
3. Визначення можливостей експлуатації відпрацьованих акумуляторних батарей з електротранспорту.
4. Здійснення технічного аналізу доцільності використання вторинних акумуляторів електроавтомобілів.
5. Створення схеми застосування відпрацьованих батарей електротранспорту в систему акумуляування гібридної фотоелектростанції та розробка інформаційно-вимірювальної системи контролю її стану.

Об'єктом дослідження є процес зберігання електроенергії у відпрацьованих акумуляторних батареях, які застосовуються як резервне джерело живлення для гібридної фотоелектричної станції.

Предметом дослідження є створення резервного джерела електроживлення на базі вторинних акумуляторів електротранспорту та відповідної інформаційно-вимірювальної системи їх стану.

Методи дослідження

У процесі виконання дослідження застосовувалися як теоретичні, так і практичні методи. До теоретичних належать аналіз наукових статей щодо системи акумуляування на базі LiFePO_4 , оцінки деградації під час першого циклу життя, вивчення принципу роботи SMART JK BMS. До практичних методів належать розрахункові роботи задля отримання результатів акумуляуючої потужності, проектування схем підключення SMART JK BMS до акумуляторної батареї в робочому середовищі SPlan7.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення роботи полягає у створенні цілісного підходу до оцінки використання акумуляторних батарей другого циклу життя. Отримані результати можуть бути використані для проектування акумуляторної станції, спрощеного монтажу й користування програмним забезпеченням.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ АКУМУЛЯТОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВДЕ

Зважаючи на збільшення небезпеки глобального потепління й пришвидшення кліматичних змін, держави активно заохочують розбудову відновлюваних джерел енергії, зокрема, сонячної та вітрової. Це частина загального енергетичного переходу, який має на меті зменшити викиди вуглекислого газу. В той же час, через нерівномірність виробництва енергії з таких джерел, з'являється потреба у надійних технологіях її накопичення, що дають змогу збалансувати виробництво та споживання електроенергії протягом доби.

Застосування природних ресурсів для виробництва електроенергії - таких як морська, вітрова й сонячна енергія - є головним напрямком розвитку відновлюваної енергетики. Ці джерела сприяють зниженню викидів вуглекислого газу й уповільненню темпів глобального потепління. Окрім екологічної вигоди, вони посилюють енергетичну безпеку, послаблюють негативний вплив на довкілля й здоров'я населення, а також зменшують залежність від звичайних викопних джерел енергії.

Водночас, відмінність у виробництві електроенергії з відновлюваних джерел спричинює нестабільність енергозабезпечення та зумовлює ризики для надійності енергосистем. У цьому розрізі важлива роль належить системам накопичення енергії, заснованим на акумуляторних батареях. Вони забезпечують швидке реагування на зміни частоти та напруги в мережі, таким чином сприяючи її стабільній роботі.

Акумулятори привертають пильну увагу через високу щільність енергії, ефективність та здатність до багаторазового використання. На сьогодні широкого застосування набули літій-іонні, літій-ферум-фосфатні, нікель-металогідридні, свинцево-кислотні та інші типи акумуляторів - у побутовій електроніці, транспортних засобах, системах накопичення відновлюваної енергії, медичній техніці та інших сферах.

Під час дослідження різних видів акумуляторів енергії необхідно враховувати безліч їхніх властивостей. Для транспортних засобів визначальним показником є питома енергія, тобто кількість енергії, що вміщується в одному кілограмі активного матеріалу акумулятора. У ситуаціях, де простір обмежений, особливої ваги набуває об'ємна щільність енергії – кількість енергії, яку можна зберегти на одиницю об'єму. Ще одним суттєвим параметром є втрати енергії під час зберігання та загальна здатність акумулятора до тривалого утримання енергії. В деяких системах накопичення енергії передбачає кілька стадій перетворення. В таких випадках ключовим є загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) всієї системи - від процесу накопичення до кінцевої видачі енергії у зручному для використання вигляді.

Для великогабаритних накопичувачів суттєвим є також показник питомої вартості, що охоплює вартість активної речовини, конструктивних елементів, допоміжних систем та інші витрати. Крім того, важливими залишаються експлуатаційні характеристики: діапазон робочих температур і тисків, стійкість до електричних та магнітних полів, рівень безпеки, простота обслуговування та інші параметри.

Головною перевагою акумуляторних технологій є здатність ефективно накопичувати й вивільняти електроенергію, що робить їх універсальним рішенням для різноманітних сфер - від електротранспорту до балансування енергосистем. Завдяки високій гнучкості, широкому спектру застосування та здатності забезпечувати надійне енергопостачання навіть за умов нестабільного виробництва електроенергії, ці системи дедалі більше привертають увагу науковців, інженерів та інвесторів.

Завдяки своїм характеристикам, акумуляторні батареї стають ключовим елементом у сучасних системах зберігання енергії, демонструючи високий рівень надійності, ефективності та адаптивності. Їхня здатність до багаторазового циклу заряджання й розряджання без суттєвої втрати продуктивності, а також стійкість до зовнішніх впливів робить такі системи зберігання енергії привабливими як для індивідуального користування, так і для

промислових та транспортних застосувань. Зокрема, акумулятори знайшли широке використання в електроінструментах, портативній електроніці, медичному обладнанні, електричних транспортних засобах та інших сферах, що вимагають стабільного й потужного джерела живлення.

Окрім технічної ефективності, акумуляторні батареї також вважаються економічно доцільними та екологічно прийнятними рішеннями, адже сприяють зменшенню залежності від викопного палива та викидів парникових газів. Висока питома енергетична щільність, тривалий строк служби, безпека експлуатації та стійкість до змін навколишнього середовища лише підсилюють їхню роль у глобальному енергетичному переході.

Разом із тим, повноцінне використання потенціалу акумуляторних батарей потребує уважного підходу до їх експлуатації та обслуговування. До потенційних недоліків слід віднести ризики перегріву в процесі інтенсивного заряджання або розряджання, що може спричинити витік електроліту, коротке замикання або навіть займання. Неправильна експлуатація, включаючи перезаряд, надмірний розряд, тривале зберігання без підзарядки, а також вибір невідповідного режиму зарядки, негативно впливають на загальну продуктивність і довговічність акумулятора.

Таким чином, попри численні переваги, ефективність і надійність використання акумуляторних батарей значною мірою залежать від дотримання технічних вимог і стандартів безпеки. Тільки комплексний підхід до впровадження, експлуатації та контролю дозволяє реалізувати потенціал цієї технології у забезпеченні сталого енергетичного майбутнього.

1.1. Визначення акумуляторної батареї

Акумуляторні батареї - це електрохімічні пристрої, які здатні багаторазово накопичувати та віддавати електричну енергію завдяки циклам заряджання і розряджання. Їхня робота базується на процесах, що відбуваються між

електродами в присутності електроліту. У процесі заряджання батарея накопичує енергію, а при розряджанні - передає її зовнішньому споживачу.

Хімічна батарея: це прилад, що здійснює трансформацію хімічної енергії на електричну, використовуючи хімічні реакції. Її ключові складники - позитивний і негативний електроди та електроліт.

За конструкцією, хімічні акумулятори можна розділити на дві основні категорії: первинні та вторинні елементи.

Первинні батареї призначені для одноразового використання. Активні речовини в них не відновлюються, вони мають низький саморозряд, великий внутрішній опір, та, водночас, велику питому масову і об'ємну ємність.

Вторинні батареї можна заряджати і розряджати багато разів завдяки оборотності активних матеріалів. Вони широко використовуються у пристроях, що мають функцію заряджання. Більшість сучасних моделей транспортних засобів використовують саме вторинні акумулятори.

Стандартна конструкція акумулятора включає позитивний і негативний електроди, а також електроліт, що забезпечує перенесення іонів. Як матеріали для позитивного електрода часто застосовуються оксиди металів або фосфати, тоді як для негативного - графіт або металевий літій. Електроліти можуть мати рідкий, гелевий або твердий агрегатний стан, і саме вони забезпечують рух іонів між електродами.

Порівняння АКБ та звичайної батареї наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 Різниця між акумуляторними батареями та звичайними батарейками [1].

Елементи	Акумуляторні батареї	Звичайні батарейки
Компонент	Діоксид літію як позитивний фактор платформа, губчастий чистий свинець як негативна платформа	Позитивна речовина (кисень або водень), негативна речовина (цинк або свинець)
Заявка	Високоенергоємні електронні пристрої, включаючи цифрові камери, ноутбуки та мобільні телефони.	Пристрої, що вимагають постійної напруги та струму, включаючи ліхтарі, годинники та інші.
Перезаряджається чи ні	Перезаряджається	Не підлягає зарядці

Сильні сторони	Велика ємність, що відповідає високим енергетичним потребам, мінімізує частоту заміни батарей.	Стабільний струм і напруга, легке транспортування, надійна робота, не піддається впливу навколишнього середовища.
Слабкість	Значна вартість, обмежена кількість зарядок, розрядок і саморозряду.	Його не можна поповнювати і після використання необхідно замінити.
Вплив на навколишнє середовище	Придатний для багаторазового використання, що мінімізує вплив відходів на навколишнє середовище.	Його потрібно відкидати відразу, створюючи величезну кількість відходів з потенційним забрудненням навколишнього середовища.

В таблиці 1.2 наведені основні типи акумуляторів, а також їхні переваги та недоліки.

Таблиця 1.2 Типи хімічних акумуляторів[2]

Тип акумулятора	Переваги	Недоліки
Свинцево-кислотні акумулятори необслуговувані, AGM	Герметична конструкція. - Простота і безпека використання. Ціна. Невеликий саморозряд. - Відмінна робота в буферному режимі.	- Низька щільність енергії. - Нелінійний графік розряду. - Низькі зарядні струми - 0,1-0,2С. - Чутливість до високих напруг заряду. - Ресурс - до 350 циклів. - Непристосованість для підтримки постійного навантаження.
Свинцево-кислотні необслуговувані, GEL	- Герметична конструкція. - Можливість використання в похилому положенні та на боці. - Простота і безпека використання. - Невеликий саморозряд.	- Низька щільність енергії. - Нелінійний графік розряду. - Низькі зарядні струми - 0,1-0,2С. - Ресурс - до 500 циклів.
Свинцево-кислотні обслуговувані, з рідким електролітом, типу OPzS (панцирні)	- Ресурс – до 1500 циклів, завдяки використанню трубчастого анода. - Висока надійність.	- Низька щільність енергії. - Нелінійний графік розряду. - Ризик витoku рідкого електроліту. - Висока ціна. - Невеликі струми заряду - до 0,3С.
Свинцево-кислотні герметичні типу OPzV (панцирні, з електролітом у формі гелю)	Герметична необслуговувана конструкція. - Ресурс – до 1500 циклів. - Висока надійність.	- Низька щільність енергії. - Нелінійний графік розряду. - Невеликі струми заряду - до 0,3 С. - Висока ціна – порівнянна з вартістю літій-залізо-фосфатних батарей.
Li-ion	- Легка вага, висока щільність енергії, компактність, простота і комфорт експлуатації. - Ресурс понад 1000 циклів. - Відмінні робочі параметри.	- У разі порушення герметичності та виходу зі штатного режиму роботи - ризик займання. Для унеможливлення таких ситуацій використовуються BMS плати захисту і контролю.

LiFePO ₄	<ul style="list-style-type: none"> - Ресурс - понад 3000 циклів. - Стійкість до високих струмів і глибоких розрядів. - Лінійні характеристики розряду. - Можливість використання АКБ меншої ємності при великих струмах розряду. - Здатність приймати великі струми заряду - до 2С. - Незначний саморозряд. - Широкий діапазон робочих температур. 	<ul style="list-style-type: none"> - Високі початкові вкладення, але в перерахунку на вартість 1 циклу - чудовий вибір.
LTO	<ul style="list-style-type: none"> - На додаток до всіх переваг LFP акумуляторів - величезні струми заряду (до 10С), ресурс 16000 і вище. 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока ціна, але в перерахунку на вартість 1 циклу – навпаки. - Велика вага (низька питома енергоємність).

1.2 Особливості та властивості акумуляторів типу LiFePO₄

В даний час на ринку найбільш поширеними вторинними батареями є свинцево-кислотні акумулятори, а також літєві батареї, такі як літій-кадмієві, нікель-металогідридні, літій-кобальтові та LiFePO₄ акумулятори. Свинцево-кислотні акумулятори завдяки широкій робочій температурі, простій структурі, розвиненій технології та низьким ціновим характеристикам мають вищий коефіцієнт використання але нижчий термін служби та коефіцієнт розряду, вищий внутрішній опір та високу токсичність, спричинені високим рівнем забруднення, що призводить до заміни їх іншими хімічними акумуляторними батареями.

Ми розглядаємо літій-ферум-фосфатні акумуляторні батареї, які мають переваги високої ємності, низької токсичності та відсутності забруднення, високотемпературне середовище та хороші кровообігу в умовах високих , а також широкі джерела сировини. У порівнянні з іншими літєвими батареями, батареї LiFePO₄ мають високу ефективність перетворення енергії до 95% і мають більший життєвий цикл до 2000 разів, ніж інші літєві батареї, життєвий цикл яких становить приблизно від 400 до 500 разів. Акумуляторні батареї LiFePO₄

також дуже добре підходять для живлення електродвигунів і для управління живленням, наприклад, електроскутерів, чисто електричних скутерів, гібридних автомобілів тощо, і в майбутньому стануть основним видом електромобілів.

Компоненти батареї LiFePO_4 включають позитивний електрод, негативний електрод, електроліт, діафрагму, виводи позитивного і негативного електродів, центральну клему, запобіжний клапан, ущільнювальне кільце, корпус і т.д. Матеріал позитивного електрода літій-залізо-фосфатних акумуляторів зазвичай називають літій-залізо-фосфатом, а матеріалом негативного електрода зазвичай є вуглець.

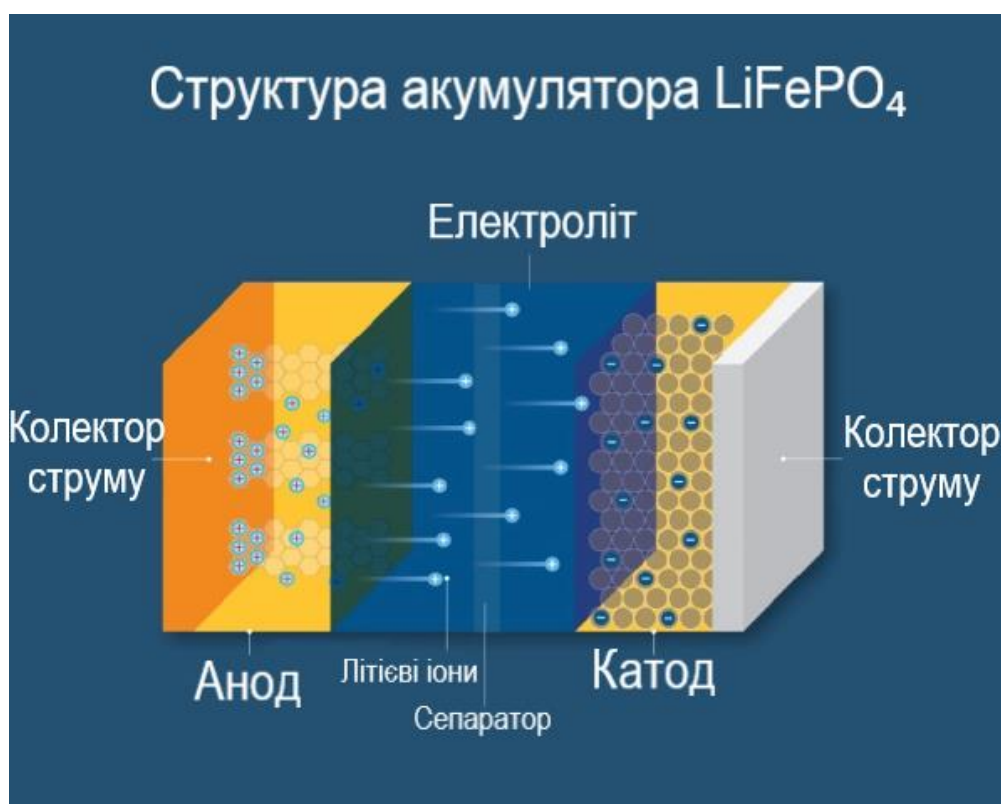


Рисунок 1.2. – будова акумулятора LiFePO_4 [3]

Зліва - LiFePO_4 з олівіновою структурою в якості позитивного електрода батареї, який з'єднаний з позитивним електродом батареї за допомогою алюмінієвої фольги. Посередині - полімерний сепаратор, який розділяє позитивний і негативний електроди. Іони літію Li^+ можуть проходити крізь нього, але електрони e^- не можуть. Праворуч - негативний електрод батареї, що

складається з вуглецю (графіту) і з'єднаний з негативним електродом батареї мідною фольгою.

Позитивний електрод літійової батареї - це сполука, що містить металевий літій, як правило, фосфат літію заліза (наприклад, фосфат літію, заліза LiFePO_4 , фосфат літію, кобальту LiCoO_2 тощо), негативний електрод - графіт або деревне вугілля (зазвичай використовується графіт), і між позитивним і негативним електродами в якості електроліту використовуються органічні розчинники. Під час заряджання батареї іони літію аналізуються на позитивному електроді для генерації іонів літію, які потрапляють на негативний електрод батареї через електроліт і вбудовуються в мікропори вугільного шару негативного електрода.

У той же час електрони надходять до колектора з алюмінієвої фольги позитивного електрода через провідник і до колектора з мідної фольги негативного електрода через виступ, полюс батареї, зовнішній ланцюг, негативний полюс і негативний виступ. Потім він протікає через провідник до графітового негативного електрода, щоб збалансувати заряд на негативному електроді.[3]

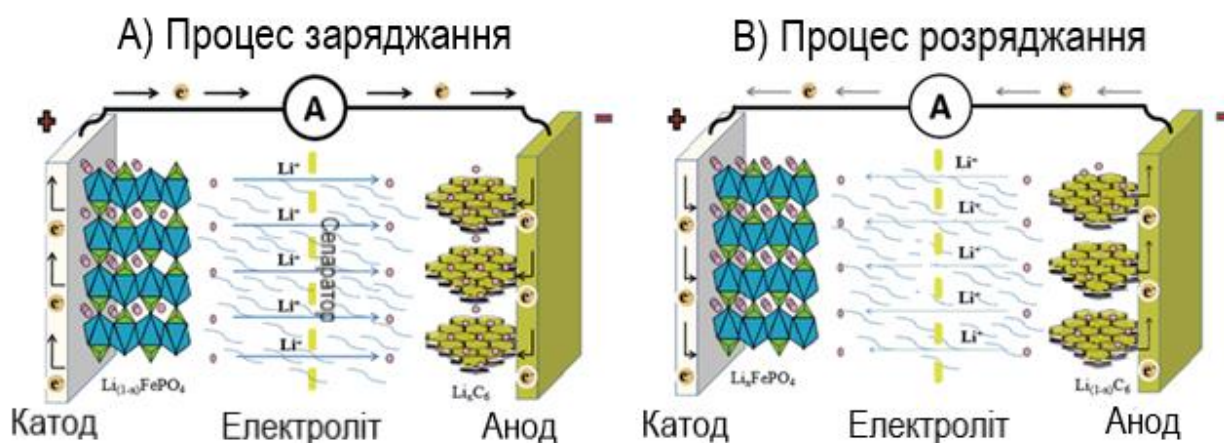


Рисунок 1.3. - процес заряду і розряду акумуляторної батареї[3]

Після того, як іони літію деінтеркалюють з літій-залізофосфату, літій-залізофосфат перетворюється на фосфат заліза. Коли LFP акумулятор розряджається, іони літію деінтеркалюють з кристала графіту, потрапляють в

електроліт і проходять через сепаратор. Потім він мігрує на поверхню кристала літій-залізо-фосфату через електроліт, а потім знову вбудовується в кристалічну решітку літій-залізо-фосфату через поверхню.

У той же час батарея через провідник надходить до колектора з мідної фольги негативного електрода. Через виступ, негативний полюс акумулятора, зовнішній ланцюг, позитивний полюс і позитивний виступ він надходить до алюмінієвого фольгованого струмоприймача позитивного електрода акумулятора. Потім він тече по провіднику до літій-залізо-фосфатного позитивного електрода, щоб збалансувати заряд позитивного електрода.[3]

Таблиця 1.3 напруги літій-залізо-фосфатної батареї відображає стан заряду 1 елемента на основі різних напруг, таких як 12 В, 24 В і 48 В.

Таблиця 1.3 Стан заряду батареї LiFePO₄ 12 В, 24 В і 48 В[4].

Відсоток (SOC)	1 комірка	12V	24V	48V
100% Зарядка	3.65	14.6	29.2	58.4
100% Спокій	3.40	13.6	27.2	54.4
90%	3.35	13.4	26.8	53.6
80%	3.32	13.3	26.6	53.1
70%	3.30	13.2	26.4	52.8
60%	3.27	13.1	26.1	52.3
50%	3.26	13.0	26.1	52.2
40%	3.25	13.0	26.0	52.0
30%	3.22	12.9	25.8	51.5
20%	3.20	12.8	25.6	51.2
10%	3.00	12.0	24.0	48.0
0%	2.50	10.0	20.0	40.0

3.2В графік напруги LFP

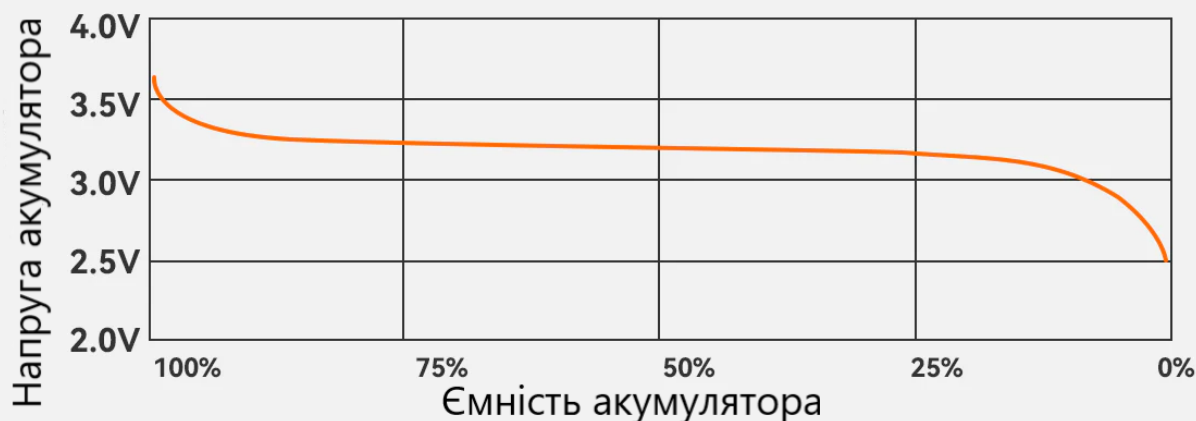


Рисунок 1.4 - графік напруги елемента LFP 3.2 В[5]

На початку процесу розряду, коли акумулятор повністю заряджений, напруга знаходиться на рівні приблизно 3.4-3.5 В (рис 1.4). Цей рівень спостерігається дуже короткий час і швидко знижується до стабільного плато. Основна частина розрядного циклу характеризується майже постійною напругою близько 3.2 В. Це плато - одна з головних переваг LiFePO₄-хімії, адже в такому режимі акумулятор забезпечує стабільне енергоживлення при незмінній вихідній напрузі. Тривалість цієї фази залежить від навантаження, температури, стану акумулятора та рівня залишкової ємності.

При подальшому розряді, коли залишкова ємність акумулятора наближається до 10-15%, напруга починає різко знижуватись. Це називається фазою завершення розряду. Рівень нижньої межі безпечної розряду зазвичай становить близько 2.5 В. Зниження нижче цього рівня призводить до деградації комірки та скорочення її життєвого циклу.

Переваги використання LiFePO₄:

1. **Високий рівень безпеки.** Завдяки термічній і хімічній стабільності матеріалу катоду LiFePO₄, ці батареї стійкі до перегріву, перезаряду та

механічного впливу. Це знижує ризики займання або вибуху навіть у разі фізичного пошкодження.

2. **Плоский розрядний профіль.** У більшості випадків LiFePO_4 забезпечує майже постійну напругу в межах 3.2-3.3 В протягом усього циклу розряду. Це сприяє стабільній роботі споживачів та дозволяє уникнути пошкодження обладнання через падіння напруги.

3. **Тривалий термін служби.** Здатність витримувати понад 3000 повних циклів заряджання-розряджання без значної втрати ємності дозволяє використовувати їх у системах з високою інтенсивністю роботи (наприклад, в електромобілях чи автономних системах з ВДЕ).

4. **Низький рівень саморозряду.** LiFePO_4 акумулятори втрачають менше ніж 3% заряду на місяць, що ідеально підходить для резервних систем живлення.

5. **Екологічна відповідність.** Відсутність токсичних і важких металів, таких як кобальт або нікель, робить ці акумулятори менш шкідливими для навколишнього середовища як під час експлуатації, так і під час утилізації.

6. **Сумісність із ВДЕ.** Швидке реагування на зміни потужності та можливість глибокого розряду робить їх оптимальним вибором для гібридних та автономних енергетичних систем на основі сонячної або вітрової генерації.

Недоліки:

1. **Нижча енергетична щільність.** У порівнянні з іншими літійовими батареями, зокрема LiCoO_2 або NMC (нікель-манган-кобальт), LiFePO_4 має нижчу питому енергію, що може бути критичним у додатках, де маса і габарити мають значення.

2. **Висока початкова вартість.** Попри меншу вартість у розрахунку на цикл, ці батареї залишаються дорожчими на етапі впровадження, що може бути бар'єром для домашніх користувачів або малих підприємств.

3. **Складність управління.** Необхідність точного моніторингу напруги кожної комірки та обов'язкове використання BMS (Battery Management System) ускладнює систему та підвищує витрати на обслуговування.

4. **Зниження продуктивності при низьких температурах.** Хоча LiFePO_4 і працює в ширшому температурному діапазоні, при температурах нижче -10°C спостерігається помітне зниження здатності до заряджання, що потребує використання додаткових систем підігріву в холодному кліматі.

5. **Обмежена доступність на ринку.** Попри активний розвиток виробництва, ці акумулятори поки що менш поширені, ніж свинцево-кислотні або інші типи літієвих АКБ, що обмежує варіанти постачальників та інфраструктуру підтримки.

1.3. Фотоелектричні станції: принципи роботи, будова та особливості енергозберігання

Фотоелектрична станція, що відома також як сонячна електростанція, представляє собою комплексне технічне спорудження, спроектоване для перетворення сонячного світла в електричну енергію. Цей процес здійснюється за допомогою фотоелектричних елементів, що складаються з напівпровідникових матеріалів, які, взаємодіючи з сонячним випромінюванням, генерують електричний струм.

Фотоелектричні станції можуть бути розміщені в різних локаціях, включаючи земельні ділянки та дахи будівель. Це відкриває можливості для ефективного використання доступного простору та максимізації потенціалу сонячного випромінювання. Вони стають все більш популярним рішенням як стійке та відновлюване джерело енергії, що враховує екологічні та економічні переваги в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії. В основі роботи фотоелектричних станцій лежить так званий фотоелектричний ефект - процес перетворення сонячного випромінювання (фотонів) на електричний струм в речовинах, званих напівпровідниками.

Основний компонент фотоелектричних станцій - це сонячні батареї або панелі. Вони складаються з окремих сонячних елементів, з'єднаних послідовно та паралельно для отримання необхідних параметрів струму та напруги.

Більшість комерційних сонячних панелей зроблено з монокристалічного або полікристалічного кремнію. Переріз сонячних елементів зображено на рисунку 1.5.

Коли сонячні промені потрапляють на сонячну панель, фотони поглинаються атомами кремнію, внаслідок чого відбувається перехід електронів до збудженого стану. Це порушує баланс у матеріалі і створює ненульовий потенціал – різницю потенціалів між верхньою та нижньою площинами панелі. Цієї різниці потенціалів достатньо, щоб примусити електрони переміщуватися по зовнішньому ланцюгу, створюючи постійний електричний струм DC.

Далі цей струм проходить через контролер заряду або інвертор для перетворення в змінний струм AC, який уже може бути використаний споживачами або надійти в загальну електромережу. Є також опції акумулювання енергії в батареях для подальшого використання при недостатній сонячній активності.

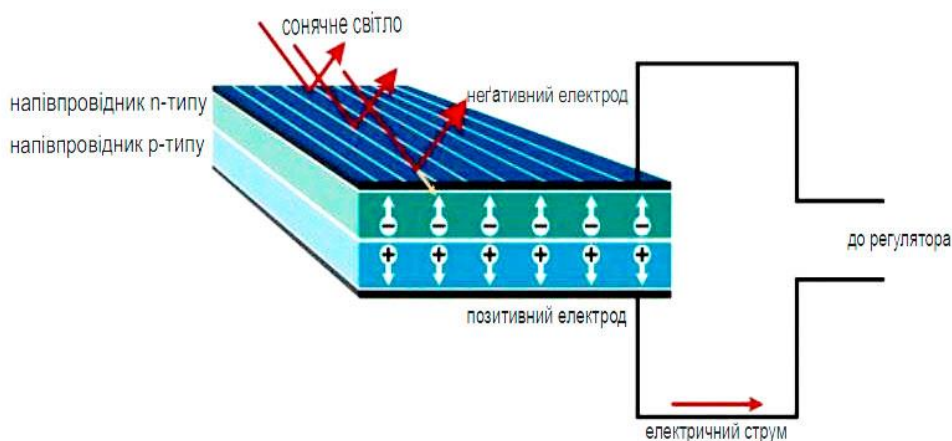


Рисунок 1.5. – Поперечний переріз сонячного елемента[6]

1.3.1 Будова фотоелектричної станції

Сонячні фотоелектричні системи включають низку компонентів, кожен з яких виконує певну функцію. Склад елементів залежить від типу системи та її призначення. Наприклад, найпростіша система прямого підключення

складається з сонячного модуля або масиву (декількох з'єднаних між собою модулів) і навантаження - пристрою, що споживає вироблену енергію.

У таких системах генерується постійний струм DC, тобто електроенергія, що рухається лише в одному напрямку. Відповідно, і навантаження в таких системах розраховане на постійний струм. Якщо система є автономною і має енергонакопичувач (наприклад, акумулятор), то вона містить більше компонентів порівняно з базовою схемою прямого з'єднання.

Сонячний модуль

Більшість сонячних модулів, доступних на ринку та використовуваних для житлових та комерційних сонячних систем, є кристалічними кремнієвими. Ці модулі складаються з кількох рядів сонячних елементів, з'єднаних послідовно (позитивний полюс з'єднаний з негативним), і закріплені в алюмінієвому каркасі. Кожен сонячний елемент здатний виробляти 0,5 вольт. Модуль із 36 елементів оцінюється на виробництво 18 вольт. У великих модулів може бути 60 або 72 елементи в одному каркасі. Розмір або площа елемента визначає кількість амперажу. Чим більший елемент, тим вищий ампераж.

Контролер заряду

Зарядний контролер регулює кількість заряду, що подається в акумулятор від сонячного модуля, щоб уникнути перезарядки акумулятора. Зарядні контролери можуть відрізнитися за обсягом амперажу, який вони можуть регулювати. Деякі моделі можуть включати додаткові функції, такі як підключення та робота зі споживачами постійного струму DC, а також регулювання енергії, яка подається до споживача на основі рівня заряду в акумуляторі. Протягом дня масив постачає енергію контролеру та акумулятору. Контролер веде моніторинг рівня енергії для того, щоб тримати акумулятор повністю зарядженим. Вночі, коли масив не постачає енергію, контролер дозволяє акумулятору живити споживача відповідно до потреби.

Акумулятор

Коли сонячна енергія повинна бути накопичена для подальшого використання в періоди низької або нульової генерації (наприклад, вночі чи в

похмуру погоду), використовуються системи зберігання енергії на основі акумуляторних батарей. Найпоширенішим рішенням для житлових сонячних систем стали літій-залізо-фосфатні акумулятори завдяки їхній високій надійності, довгому терміну служби, безпеці та низькому рівню саморозряду. В деяких бюджетних варіантах використовують літій-іонні, свинцево-кислотні акумулятори. Напруга акумуляторів у сучасних системах зазвичай становить 12, 24 або 48 вольт, а вибір залежить від архітектури енергосистеми та потреб користувача.

Інвертор

Енергія з масиву або батарейного банку є постійним струмом DC. Це може задовольнити потреби споживачів постійного струму, таких як лампи, вентилятори, насоси, мотори та деяке спеціалізоване обладнання. Однак якщо енергія має бути використана для живлення навантажень, що працюють на змінний струм AC, як у будинку, то потрібно конвертувати струм. Інвертор перетворює енергію DC в енергію AC. Інвертори доступні в різних розмірах для різноманітних навантажень. Невеликий інвертор можна підключити до невеликого навантаження, а більші інвертори доступні для живлення великих навантажень.

Моніторинг системи

Існують кілька інструментів, які допомагають власникам сонячних систем стежити за їхніми системами. У самостійних або системах сонячних елементів, що не підключені до мережі, використовується вимірювач акумулятора для вимірювання енергії, що надходить і виходить з батарейного банку. Заряджання та розрядка акумуляторів, а також правильна робота системи заряду, є важливими для сповіщення власника про неповне заряджання, зниження заряду акумулятора або можливий вимкнення системи. Моніторинг системи за допомогою веб-інструментів та додатків дозволяє власникам сонячних систем спостерігати за активністю своєї системи, використовуючи мобільний телефон чи планшет з віддаленої локації.

1.3.2 Особливості акумуляції електроенергії в ФЕС

Однією з основних причин обмеженого застосування відновлюваних джерел енергії є непостійність енергетичних потоків, що проявляється у змінності та періодичності їх надходження. Така особливість тривалий час ускладнювала їх ефективне використання та не відповідала сучасним вимогам до надійного енергопостачання. До того ж, у процесі масштабного впровадження технологій відновлюваної енергетики виникає потреба у створенні резервних потужностей на основі традиційних джерел для забезпечення стабільної подачі енергії в періоди відсутності генерації. Хоча в окремих випадках це є виправданим, сьогодні існують різноманітні технічні рішення для подолання цих викликів, зокрема використання накопичувачів електричної та теплової енергії.

Досягнення високих техніко-економічних результатів при використанні відновлюваних джерел енергії, стабільної роботи енергетичного обладнання та безперебійного енергопостачання споживачів забезпечується шляхом комбінованого виробництва теплової й електричної енергії, її комплексного акумулювання, а також інтеграцією ВДЕ як між собою, так і з традиційними енергетичними технологіями. Формування ефективних комбінованих енергетичних систем із використанням різноманітних типів акумуляторів енергії сприяє підвищенню ефективності застосування ВДЕ на 30-50%, покращує якісні характеристики виробленої енергії та забезпечує її стабільне постачання споживачам. Сучасне обладнання і технології, а також принципи раціонального використання ВДЕ, що ґрунтуються на їх поєднанні з системами акумулювання, фактично усунули бар'єри на шляху до широкомасштабного впровадження таких джерел.[8]

Основними завданнями під час створення комбінованих енергетичних систем на базі ВДЕ є забезпечення їх надійними засобами акумулювання енергії, впровадження ефективного допоміжного обладнання для зменшення коливань параметрів енергосистем і підтримки необхідних режимів роботи, а також розроблення систем автоматизованого управління їх функціонуванням.

Під час експлуатації електрогенеруючого обладнання на базі відновлюваних джерел енергії системи накопичення електроенергії, працюючи в режимі постійного підзарядження, згладжують добові коливання, що виникають у процесі роботи, та забезпечують стабільне електропостачання споживачів. У разі роботи з промисловою електромережею такі системи накопичують електроенергію в нічний (позапіковий) період і подають її споживачам під час відключення від мережі.

Середній коефіцієнт використання потужностей сонячних і вітряних електростанцій у світі становить 20%, тоді як вугільних перевищує 55%. Це свідчить про необхідність застосування засобів накопичення електроенергії та підняття коефіцієнта використання встановленої потужності ВДЕ до рівня вугільних. Найпоширеніший сьогодні спосіб - це хімічні акумулятори. Схема використання акумуляторів такого типу з модулем сонячних батарей наведена на рисунку 1.6. [2]

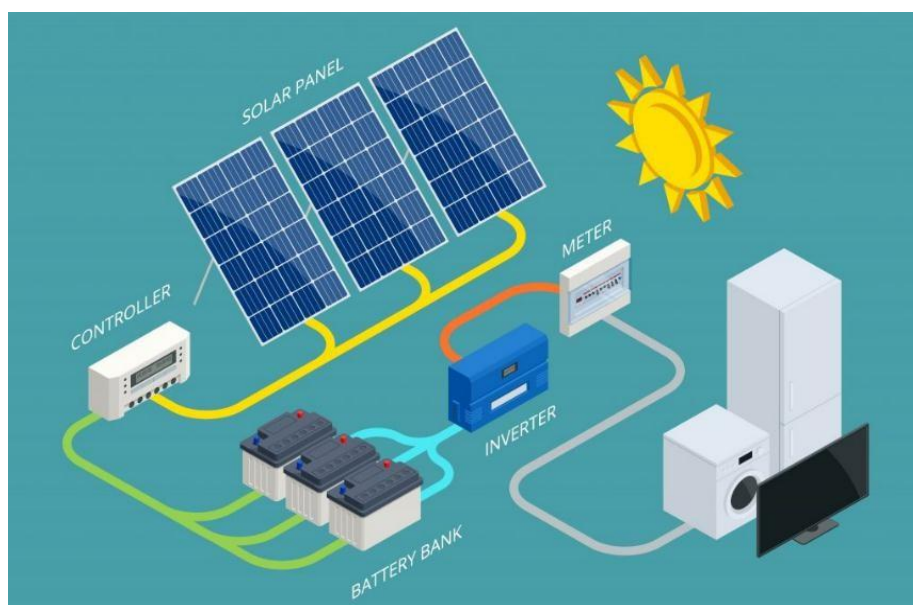


Рисунок 1.7. – Схема накопичення та споживання сонячної енергії [1]

Особливість використання модулів сонячних батарей полягає в тому, що вказаний модуль не подає електричну енергію напряму споживачу, а заряджає акумулятори, які після перетворення у інверторі передають енергію споживачам.

В електростанціях на сонячних панелях в основному використовують хімічні акумулятори. За типом вони поділяються на дві великі групи – свинцево-кислотні та літієві.

Лужні АКБ (Ni-Cd, NiMH) для застосування в системах сонячної електроенергетики не підходять, оскільки не можуть приймати заряд малими струмами, які виробляють сонячні панелі. Малі струми протікають через лужні елементи живлення, не збільшуючи їхню ємність. Тому лужні АКБ підходять для автономних енергетичних систем на основі дизель-генераторів, але не для сонячних панелей.[2]

1.3.3 Вимоги до систем акумуляування електричної енергії

Система акумуляування електричної енергії при застосуванні в комбінованих енергосистемах повинна відповідати таким вимогам:

- забезпечувати стабільне електроживлення споживачів електроенергії незалежно від періодичності роботи відновлюваних джерел енергії та в періоди відключення промислової електромережі;
- мати оптимальну енергоємність, що залежить від потреб енергосистеми в кожному конкретному випадку і забезпечується набором акумуляторів з послідовним або паралельним підключенням;
- забезпечувати необхідну робочу напругу та автоматичне регулювання режимами роботи;
- характеризуватись високою ефективністю зберігання та віддачі енергії з мінімальними втратами;[7]
- мати тривалий термін служби та можливість багаторазового циклу зарядки/розрядки без суттєвої деградації характеристик;
- бути безпечною в експлуатації, включаючи наявність систем захисту від перегріву, короткого замикання, перезаряду та глибокого розряду;
- мати можливість інтеграції з системами управління енергоспоживанням та джерелами генерації;

- бути екологічно безпечною та відповідати чинним нормативам щодо утилізації та впливу на навколишнє середовище.

1.4 Економічні та екологічні аспекти вторинного використання акумуляторів

Електромобілі вважаються більш екологічно сталими порівняно з автомобілями на основі двигунів внутрішнього згоряння, особливо якщо вони заряджаються енергією, виробленою відновлюваними джерелами енергії. Батареї ЕМ після використання в автомобілях можуть мати додаткові цикли використання. Гарантований термін служби батареї ЕМ становить 8 років, але може служити і до 15 років з поступовою втратою ємності. Втрата ємності батарей ЕМ відбувається через численні цикли заряджання-розряджання, але навіть після 200000 км вони повинні зберігати не менше 70% ємності. Технологічний прогрес постійно вдосконалює ці показники.

Після втрати ефективності для використання в автомобілях (зазвичай 70% початкової ємності), батареї можуть бути використані як стаціонарні системи зберігання енергії, сполучені з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні або вітрові станції. Це дозволяє очікувати зниження сумарних викидів CO₂ і зниження витрат в енергосистемі. На завершальній стадії, коли батареї вже не придатні для зберігання, вони підлягають остаточній переробці або рециклінгу, тому АКБ не потрібно відправляти на звалище. Замість цього, використані матеріали можуть бути вилучені та перероблені.[8]



Рисунок 1.8. – стадії життєвого циклу акумуляторів електромобілів[8]

Літій-ферум-фосфатні батареї складаються з сотень окремих літій-ферум-фосфатних елементів, які потрібно демонтувати для переробки. Оскільки вони містять дуже небезпечні матеріали, це може бути складним і ризикованим процесом. Наразі, за оцінками, переробляється орієнтовно лише 5-10% LiFePo4 батарей. Але виробники та постачальники електромобілів наполегливо працюють над вирішенням проблем, з якими ми стикаємося. При переробці електромобільних батарей такі матеріали, як катодні метали, алюміній і мідь, можуть бути відновлені і повторно використані для забезпечення постачання нових електромобільних батарей, а також в інших виробничих процесах. Це не лише сприяє сталому розвитку, але й допомагає зменшити залежність країн Європейського Союзу від інших країн, багатих на корисні копалини.

Зі зростанням ринку переробки акумуляторів можна очікувати значного розвитку технологій переробки. У 2022 році французька компанія Veolia, що займається управлінням ресурсами, оголосила, що відкриє у Великій Британії завод з переробки акумуляторів для електромобілів, який до 2024 року зможе переробляти 20% британських відпрацьованих батарей. Використання процесу, відомого як «міський видобуток», може зменшити споживання води та викиди парникових газів на 50% порівняно з видобутком свіжої сировини та виробництвом нових батарей. [9]

Висновок до розділу

У першому розділі було всебічно проаналізовано сучасний стан розвитку акумуляторних технологій, особливо у контексті використання в системах відновлюваної енергетики. Увагу було зосереджено на аналізі різновидів акумуляторних батарей, таких як свинцево-кислотні, літій-іонні, гелеві та особливо літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄). Детально розглянуто їхні технічні параметри, порівняння питомої енергії, терміну служби, вартості, а також безпечності та екологічності.

Проаналізовано акумулятори типу LiFePO₄, які демонструють високий рівень стабільності, довговічності, а також мають найкращі екологічні показники серед аналогів. Було обґрунтовано їхню доцільність у системах акумулявання, які використовуються у фотоелектричних установках, що особливо актуально для забезпечення енергетичної безпеки в умовах воєнного стану в Україні. Розглянуто вимоги до систем зберігання енергії: ефективність, масштабованість, безпечність, можливість інтеграції з іншими джерелами.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВЖИВАНИХ АКУМУЛЯТОРІВ LiFePO₄

2.1. Деградація акумуляторів LiFePO₄ після першого циклу життя: основні чинники

Варто розглянути ключові питання, пов'язані з властивостями і механізмами деградації LFP акумуляторів за різних умов. Аналіз фокусується на декількох масштабах, зокрема на деградації від календарного старіння, температурного режиму, глибини розряду.

Відомі своєю безпекою, довговічністю та економічністю, батареї LiFePO₄ все частіше використовуються в модельному ряді Tesla - але не у всіх моделях. Варто розглянути, в яких автомобілях Tesla використовуються ці батареї.

Tesla в основному використовує батареї LiFePO₄ у певних версіях своїх автомобілів стандартного діапазону (SR) та базових моделях. Станом на 2024 рік, до них відносяться:

1. Model 3 Standard Range (SR) та задній привід (RWD)

Tesla Model 3, найбільш продаваний седан Tesla, використовує батареї LiFePO₄ у своїх стандартних комплектаціях і з заднім приводом. Ця зміна була запроваджена наприкінці 2021 року для автомобілів, вироблених на заводі Tesla в Шанхаї і з тих пір поширилася по всьому світу.

2. Стандартний модельний ряд Model Y (SR)

Батареї LiFePO₄ також можна знайти у версії Model Y Standard Range, зокрема в автомобілях, вироблених на Шанхайській та Берлінській гігафабриках Tesla. Як і для Model 3 SR, ці батареї мають пріоритетом економію коштів і часто продаються за доступну ціну та для щоденних поїздок на роботу.

3. Model S і Model X - ще ні.

Наразі преміум-моделі Tesla, Model S та Model X, продовжують використовувати хімікати на основі нікелю (NCA або NCM) для більшої

щільності енергії, що має важливе значення для максимізації запасу ходу і продуктивності.[10]

Батарея LiFePO₄ демонструє вражаючий термін служби 5-10 років за умови належного обслуговування. Залежно від умов експлуатації це може відповідати від 2 500 до 9 000 циклів заряджання, що значно перевищує показники, досяжні для інших хімічних елементів. За сприятливих умов і при належному догляді цей показник можна збільшити ще більше - до 10 000 циклів.

Якщо помножити 400 км на 3 000, то вийде приголомшливі 1,2 мільйона кілометрів. На цьому етапі батарея все ще зберігає 90% своєї початкової ємності. Якщо продовжити ці результати, то, як правило, навіть після 5 000 циклів батарея залишається на рівні 80%, що означає щонайменше 1,8 мільйона кілометрів пробігу. І це ще не все: Сучасний науковий консенсус припускає, що LFP-батарея може витримати до 10 000 циклів заряджання, перш ніж перейти до свого другого життя в якості стаціонарної одиниці зберігання. Це 3,5 мільйона кілометрів.

Температура

Батареї LiFePO₄ найкраще працюють при температурі вище 10°C. При температурі близько 15°C ємність батареї досягає свого номінального значення, а при кімнатній температурі (25°C) вона може дещо перевищувати номінальну ємність.

З іншого боку, при більш низьких температурах продуктивність має тенденцію до зниження, що є загальною проблемою для більшості акумуляторів. При екстремальному холоді, наприклад, при температурі від -20°C до -40°C, ємність батареї може знизитися приблизно до 60%-40% від номінального значення.

Хоча номінальна напруга батареї LiFePO₄ зазвичай становить 3,2 В, важливо розуміти, що ця напруга не є постійною і може коливатися залежно від температури та стану заряду акумулятора (SOC).

Наприклад, LiFePO₄ акумулятор з 50% SOC буде підтримувати стабільну напругу між 3,2 В і 3,3 В у діапазоні температур від -20°C до 50°C. Така

стабільність робить його ідеальним як для вхідної, так і для вихідної енергії. Однак, батареї LiFePO₄ з нижчим показником SOC, наприклад, 15%, будуть відчувати більш значні коливання напруги, особливо при низьких напруги, особливо при низьких температурах. При -20°C напруга може впасти до 3,0 В і стабілізуватися на рівні 3,2 В при кімнатній температурі.

Це ілюструє, що температура має більший вплив на батареї з нижчим показником SOC.

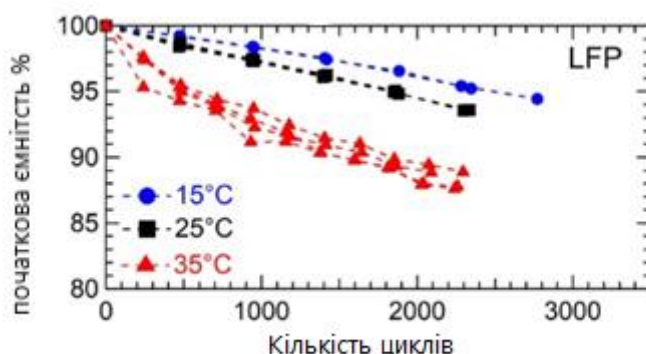


Рисунок 2.1 - кореляція циклів заряду й ємності від температури заряджання[11]

Якщо заряджати і їздити при середній температурі 25°C, батарея електромобіля зберігає 93% своєї ємності після 3 000 циклів заряджання. При температурі 15°C, більш характерній для європейського клімату, цей показник становить близько 95%. Якщо бути консервативним, то 90% - це безпечна оцінка.

Глибина розряду (DoD)

Глибина розряду (DoD) - це показник, який вимірює ступінь розрядженості акумулятора відносно його загальної ємності. Зазвичай він виражається у відсотках. Глибина розряду 100% означає, що батарея повністю розрядилася, тоді як 0% означає, що батарея залишається повністю зарядженою. DoD є важливим параметром в управлінні акумулятором, оскільки він допомагає визначити залишковий заряд акумулятора і може вплинути на термін його служби. Розрядження акумуляторів понад рекомендований рівень заряду може

призвести до перерозряду, що може спричинити незворотні хімічні реакції в акумуляторі та призвести до його незворотного пошкодження.

Цикли заряджання варіюються залежно від того, наскільки сильно батарея потребує заряджання, представленого показником DoD. Результат: якщо ви заряджаєте акумулятор на 50% за цикл (синя лінія), він зберігає 90% своєї ємності після 3 000 циклів. Якщо заряджати частіше лише на 30%, то після 5 000 циклів ємність акумулятора залишиться на рівні 90%. Досить рідкі випадки, коли виникає потреба заряджати акумулятор від 0% до 100%. Часте заряджання до 80% трапляється лише у тих, хто багато подорожує. Але навіть у цьому випадку батарея зберігає близько 83% своєї ємності після 3 000 циклів.

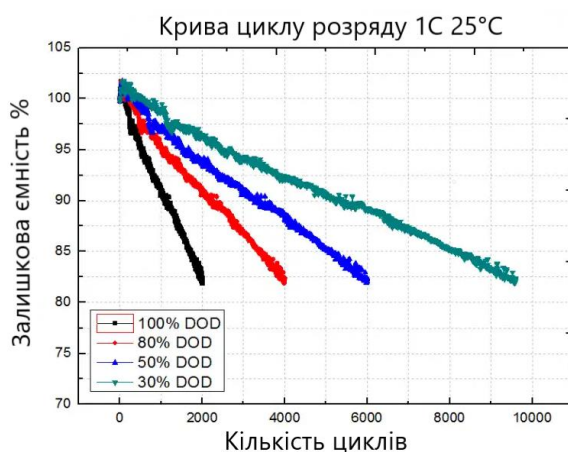


Рисунок 2.2 - крива циклу розряду LFP акумуляторів[12]

Вплив DoD на термін служби акумулятора відбувається кількома ключовими способами:

По-перше, постійне використання акумулятора на максимальній глибині розряду або вище створює навантаження на його внутрішню хімічну структуру, зменшуючи його здатність утримувати заряд з часом і знижуючи загальну ефективність. Ступінь цієї деградації залежить від хімічного складу акумулятора: наприклад, літій-залізо-фосфатні акумулятори зазнають деградації катода і втрати активних іонів літію, що знижує їхню здатність ефективно заряджатися.

По-друге, експлуатація батареї при глибокому розряді збільшує внутрішній опір, особливо під час переходу від розряду до заряду. Цей підвищений опір знижує енергоефективність за рахунок виділення надлишкового тепла і змушує батарею працювати інтенсивніше, прискорюючи з часом знос і втрату ємності. Повторні глибокі розряди також можуть спричинити тепловий стрес, особливо якщо заряджання відбувається агресивно, що потенційно може призвести до перегріву, розбухання елементів батареї або, в крайньому випадку, до пожежі. Дотримання рекомендованого використання батареї має важливе значення для мінімізації цих проблем і забезпечення безпечної та ефективної експлуатації.

Циклічна деградація й календарне старіння

Циклічна деградація виникає внаслідок регулярних зарядно-розрядних процесів. Вона пов'язана з електрохімічними й механічними процесами, що відбуваються в активних матеріалах електродів. Основними чинниками, що спричиняють деградацію під час циклів, є розкладання активних матеріалів катоду та аноду, утворення металевого літію на поверхні анода (літієве покриття), тріщини в матеріалах електродів, а також утворення побічних продуктів хімічних реакцій. Унаслідок цього зменшується кількість доступного літію та активних поверхонь для реакції, що призводить до зниження ємності та зростання внутрішнього опору. Як правило, циклічна деградація є домінуючою при високих рівнях навантаження, великій глибині розряду та за умов інтенсивної експлуатації.

Календарне старіння відбувається внаслідок хімічних реакцій всередині батареї навіть за відсутності циклів заряджання-розряджання. Воно включає утворення твердого шару електроліту на аноді, що починається з першого ж циклу заряджання. Цей процес є важливим для запобігання подальшій реакції електроліту з анодом, але водночас сприяє споживанню літієвих іонів та електроліту, що знижує ємність батареї та збільшує її внутрішній опір. Високі температури прискорюють цей процес.

2.2. Технічні параметри вживаних акумуляторів у порівнянні з новими

Вживані LFP акумулятори зберігають частину своєї ємності, тому вони підходять для проєктів, де не обов'язково мати максимальну продуктивність. Наприклад, їх часто використовують у домашніх або стаціонарних системах зберігання енергії. Продуктивність таких батарей вже зменшена через попереднє використання, але при правильній перевірці вони можуть служити ще багато циклів.

Перед використанням обов'язково слід перевірити кожен елемент: визначити залишкову ємність, внутрішній опір і стан корпусу. Часто елементи з одного акумуляторного блоку мають різні характеристики, тому їх треба сортувати і балансувати перед збиранням у новий модуль. Результати тестування дозволяють визначити непридатні елементи, які слід вилючити з подальшого використання.

Для безпечної експлуатації важливо використовувати систему керування батареєю BMS, яка буде стежити за рівнем заряду, напругою і температурою кожного елемента. Сучасні BMS також можуть мати функції захисту від перенапруги, короткого замикання, перегріву та інших аварійних ситуацій. Це особливо важливо при використанні вживаних акумуляторів, адже їх поведінка може бути менш передбачуваною порівняно з новими елементами.

Порівняння нових LFP акумуляторів зі вживаними наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Порівняння параметрів нових і вживаних АКБ

Параметр	Нові LFP акумулятори	Вживані LFP акумулятори
Номінальна напруга (на елемент)	3,2 В	3,1–3,2 В (може бути нижчою залежно від зносу)
Ємність (Ah)	50–300 Ah (залежно від форм-фактора)	60–90% від номіналу нових
Енергетична щільність	90–160 Вт·год/кг	70–140 Вт·год/кг (зменшується через деградацію)

Кількість циклів (до 80% ємності)	3000–7000 циклів	залишок: 1000–3000 циклів залежно від використання
Внутрішній опір	низький (5–10 мОм)	вищий: 10–30 мОм (зростає з віком)
ККД заряд–розряд	95–98%	85–95% (залежно від стану)
Саморозряд	< 3% на місяць	3–10% (може збільшуватися)

2.3 Оцінка ефективності використання вживаних LFP акумуляторів для акумулювання енергії з ФЕС

У сучасних системах сонячної енергетики застосування LiFePO₄ батарей приваблює завдяки їх високій безпеці та довговічності. При цьому використання відпрацьованих батарей - наприклад, вилучених з електромобілів з початковою ємністю близько 80 % - може значно знизити вартість системи. В Україні, де середня річна сонячна радіація становить приблизно 1235 кВт·год/м²[], перспективність побутового накопичувача для ФЕС значна. Для прикладу, навіть 5–10 кВт приватна сонячна станція на рік дає декілька тисяч кВт·год, частину якого можна направити в батарею для подальшого використання вночі чи під час пікових навантажень.

Цикли та знос LFP акумулятора

Експерименти з комерційними LFP-елементами показують, що після декількох тисяч циклів втрати ємності відбуваються дуже поступово. У дослідженні Li et al. (2024) батарея нового зразка після = 10 390 циклів втратила 33 % ємності. Це означає, що зменшення на 10 % (з 100 % до 90 %) відбувається приблизно за 3000–4000 циклів, а додаткове падіння з 90 % до 80 % – ще за кілька сотень циклів. Зважаючи, що відпрацьована батарея має 80 % спочатку і виводиться з експлуатації при 70 %, теоретично вона може відпрацювати від

кількох сотень до кількох тисяч циклів. Точне число залежить від режиму експлуатації: глибина розряду, швидкість заряду, температура та балансування впливають на швидкість деградації. В умовах помірних європейських температур і розумної глибини циклу (наприклад, 50–80 % DOD) знос LFP дуже малий. Наприклад, розрахунки показують, що в середньому LFP втрачають ~3 % ємності на 1000 циклів, отже падіння ємності з 80 % до 70 % може зайняти на порядки тисяч циклів. При інтенсивному щоденному циклу (1 цикл на добу) це дає декілька років служби (приблизно 8-10 років), а при частішій зарядці (наприклад, два неповні цикли на день) - менші календарні строки, але сумарна енергоємність протягом життя батареї залишається значною.[13]

Ефективність зберігання та деградація

Літій-залізо-фосфатні батареї демонструють дуже високі показники ефективності. Кулонова ефективність (тобто співвідношення поданої і відданої електрики) для LFP загалом перевищує 99 % при помірних струмах і температурах. Енергоефективність (повернута енергія за цикл) залежить від швидкості заряду/розряду. Згідно з технічними джерелами, кругова ефективність LFP батарей в типових умовах становить близько 90-95 %. Наприклад, у технічному описі Victron Energy вказано, що середня LFP-система зберігає ~92 % енергії при повному циклі «100 → 0 → 100 % SOC»[14]. Це значно перевищує ефективність стандартних свинцевих акумуляторів (~80 %) і означає, що втрати при зберіганні невеликі. Протягом терміну служби LFP-батареї залишаються стабільними: внутрішній опір практично не змінюється сотні чи тисячі циклів, тому коефіцієнт корисної дії системи з плином часу суттєво не погіршується.

Важливо також, що LFP тримають майже постійну напругу під навантаженням, тому заряд і розряд відбуваються у високоефективному діапазоні. Сучасні перетворювачі енергії (інвертори) мають ККД 95-98 %, отже сумарна ефективність «сонце → акумулятор → споживач» зазвичай лежить на рівні ~85–90 %.

2.4 Моделі прогнозування залишкового ресурсу акумуляторів

Незважаючи на зростання кількості наукових досліджень та реалізацію пілотних ініціатив, повторне використання батарей і надалі переважно розглядається крізь призму економічної доцільності та технічної здійсненності. При цьому часто недооцінюється роль моделювання вторинного використання акумуляторних систем Second-Life Batteries (SLB) як інструменту для прийняття рішень у сферах ресурсного менеджменту, екологічної політики, технологічних інновацій та енергетичної стабільності. Системний підхід до моделювання дає змогу ідентифікувати критичні обмеження, оцінити потенціал, проаналізувати ризики в різних сценаріях і визначити стратегічні напрями для втручання.

Водночас ефективна реалізація такого підходу потребує поєднання економічних, інженерних, соціальних і нормативно-правових чинників. У цьому контексті актуалізується потреба у розробці концептуальної бази для моделювання потенціалу повторного використання SLB в енергетичних системах. Така концептуалізація передбачає створення інтегрованої моделі, здатної оцінювати вплив застосування SLB на сталість, адаптивність та продуктивність енергетичних систем, а також формулювати вимоги до політичних рішень і регуляторних механізмів.

Варто розглянути наукову роботу Ганни Костенко[15], яка досліджує підхід до моделювання повторного використання вторинних батарей електротранспорт.

Дослідження[16] розглядає наступні моделі підходу діагностики вживаних акумуляторів електротранспорту:

1. Модель оцінки деградації, базується на спеціалізованому індексі деградації (ІД), який об'єднує календарне, циклічне старіння. Індекс залишкового ресурсу забезпечує можливість кількісної оцінки технічного потенціалу акумулятора незалежно від джерела інформації про його експлуатаційну історію. При цьому для побудови відповідної моделі можуть

використовуватись емпіричні криві старіння, методи машинного навчання (зокрема, регресійні підходи чи дерева рішень), а також статистичне згладжування.

2. Модель оцінки залишкового ресурсу (RUL) та прогнозованого строку ефективного використання вторинних акумуляторів (SLB) ґрунтується на аналізі динаміки індексу деградації (ІД) та показника технічного стану SOH (State of Health). Вона дає змогу визначити оптимальний період експлуатації в межах заданого сценарію, використовуючи методи прогнозування часових рядів, експоненційне згладжування, а також граничні правила, що базуються на порогових значеннях деградації.

3. Економічна модель доцільності повторного використання акумуляторів (SLB) передбачає оцінку альтернатив застосування таких батарей з урахуванням ключових фінансово-економічних показників: середньозваженої вартості зберігання енергії (LCOS), внутрішньої норми прибутку (IRR) та чистої приведеної вартості (NPV). Модель враховує витрати на відбір, діагностику, відновлення, монтаж і обслуговування акумуляторів, а також потенційні доходи чи зекономлені витрати протягом періоду їх повторного використання. Її можна застосовувати як для ізольованого аналізу, так і в межах сценарного порівняння альтернатив.

4. Оптимізаційна модель розподілу SLB формалізується як задача багатокритеріальної оптимізації з численними обмеженнями. Вона дає змогу визначити найефективніше розміщення акумуляторів з урахуванням витрат, надійності, просторової доцільності, екологічного впливу та технічної сумісності. У процесі розв'язання використовуються методи кластерного аналізу, цілочисельного, лінійного та нелінійного програмування, а також еволюційні алгоритми - зокрема, для систем зі складною топологією.

5. Просторова модель інтеграції акумуляторів забезпечує географічну прив'язку рішень до конкретних об'єктів енергетичної інфраструктури, таких як домогосподарства, підстанції або розподільчі центри. Модель враховує особливості локального енергоспоживання, доступність інфраструктури, частку

відновлюваних джерел енергії у відповідному регіоні, а також просторові ризики (наприклад, ризик підтоплення або пошкодження мереж). Для реалізації моделі можуть використовуватись геоінформаційні системи (GIS), картографічна статистика, методи оцінки густини потенціалу та багат шарові карти для підтримки прийняття рішень.

6. Модель прогнозування та планування заміни акумуляторних батарей дає змогу визначити оптимальний момент для їх виведення з експлуатації або переведення на менш критичні навантаження. Основою прийняття рішення є досягнення встановлених порогів деградації або зниження техніко-економічних характеристик нижче допустимого рівня. Така модель може реалізовуватись як набір порогових правил, а також інтегруватися в оптимізаційний модуль з урахуванням прогнозованого попиту, наявності замінних одиниць та обраної стратегії управління запасами.

Зазначені моделі інтегруються в єдину методологічну рамку, яка дає змогу здійснювати системну та порівняльну оцінку сценаріїв повторного використання вторинних акумуляторів у різноманітних контекстах, зокрема: стаціонарних системах зберігання енергії, мікромережах, програмах керування навантаженням та резервному електроживленні. Кожен сценарій аналізується з урахуванням технічної доцільності, економічної ефективності, екологічного впливу та нормативних обмежень, що забезпечує адаптивність підходу та його придатність до застосування в умовах практичного енергетичного планування.

Висновок до розділу

Другий розділ був присвячений глибокому аналізу доцільності вторинного використання вживаних акумуляторів типу LiFePO_4 . У ньому досліджено ключові чинники, що впливають на деградацію таких батарей: вплив температури, глибина розряду (DoD), кількість циклів заряджання/розряджання, умови зберігання та експлуатації. Було наведено конкретні приклади

застосування таких акумуляторів у промисловості та транспорті, зокрема досвід Tesla щодо використання LFP-батареї у моделях 3 і Y.

Також охарактеризовано сучасні підходи до повторного використання батарей у стаціонарних енергетичних системах, зокрема в умовах дефіциту нових акумуляторів та необхідності здешевлення енергетичних проєктів. Аналіз засвідчив, що після проходження першого циклу життя акумулятори можуть зберігати до 80% ємності, що є цілком придатним для стаціонарних задач. Отже, обґрунтовано доцільність інтеграції вживаних акумуляторів у системи накопичення для гібридних ВДЕ-рішень.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЇЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Інформаційно-вимірювальний контроль та моніторинг

Застосування вживаних акумуляторних елементів потребує надійної системи моніторингу для запобігання критичним режимам роботи та забезпечення максимальної безпеки. Установлюються системи збору даних, які зчитують параметри напруги, струму, температури та залишкової ємності кожної акумуляторної комірки. У таких рішеннях широко використовуються smart BMS.

Система управління батареєю BMS - це технологія, призначена для контролю акумуляторної батареї, яка являє собою збірку акумуляторних елементів, електрично організованих у матричну конфігурацію "рядок * стовпчик", щоб забезпечити цільовий діапазон напруги та струму протягом певного часу відповідно до очікуваних сценаріїв навантаження.

Контроль, який забезпечує BMS, зазвичай включає в себе наступне:

- Моніторинг акумулятора ;
- Забезпечення захисту акумулятора;
- Оцінка робочого стану акумулятора;
- Постійна оптимізація продуктивності акумулятора;
- Звітування про робочий стан зовнішнім пристроям.

Основний принцип роботи активного балансування SMART BMS полягає в тому, щоб використовувати суперконденсатор як тимчасовий носій енергії, для передачі енергію від комірки з найвищою напругою, в комірку з найнижчою напругою, доти, доки напруги всіх осередків, що входять до збірного акумулятора, будуть рівні. Технологія активного балансування працює постійно незалежно від режиму заряду або розряду акумулятора (BMS з пасивним балансиrom працюють тільки на останньому етапі заряду) .

Тут термін "акумулятор" означає весь блок, однак функції моніторингу та управління застосовуються конкретно до окремих елементів або груп елементів,

які називаються модулями в загальній збірці акумуляторної батареї. Літій-залізо-фосфатні акумуляторні елементи є стандартним вибором для акумуляторних батарей для багатьох цілей, від системи акумуляції електроенергії до електромобілів. Незважаючи на чудову продуктивність, вони можуть бути досить ненадійними, якщо їх експлуатувати поза межами безпечної зони експлуатації, що може призвести до різних наслідків - від погіршення продуктивності акумулятора до відверто небезпечних наслідків. Тому обов'язковим рішенням для використання вживаних акумуляторів є установка і під'єднання BMS плати для коректної роботи АКБ.

Класифікація BMS

Сучасна класифікація виділяє два основні типи BMS: звичайні (традиційні) та інтелектуальні (Smart BMS). Кожен із цих типів має свої особливості, переваги, недоліки та області застосування.

Звичайна BMS (рис. 3.1) реалізує базові захисні механізми. Вона контролює напругу на кожному окремому осередку акумуляторної батареї, забезпечує захист від перенапруги, надмірного розрядження, перевищення допустимого струму заряду/розряду, а також від перегріву. Архітектура такої BMS досить проста - це, як правило, аналогова або обмежено цифрова електронна схема з мінімальним набором мікросхем. Візуалізація стану батареї реалізується за допомогою світлодіодів або примітивних індикаторів, а користувач не має змоги отримати детальну діагностику або статистику в реальному часі.

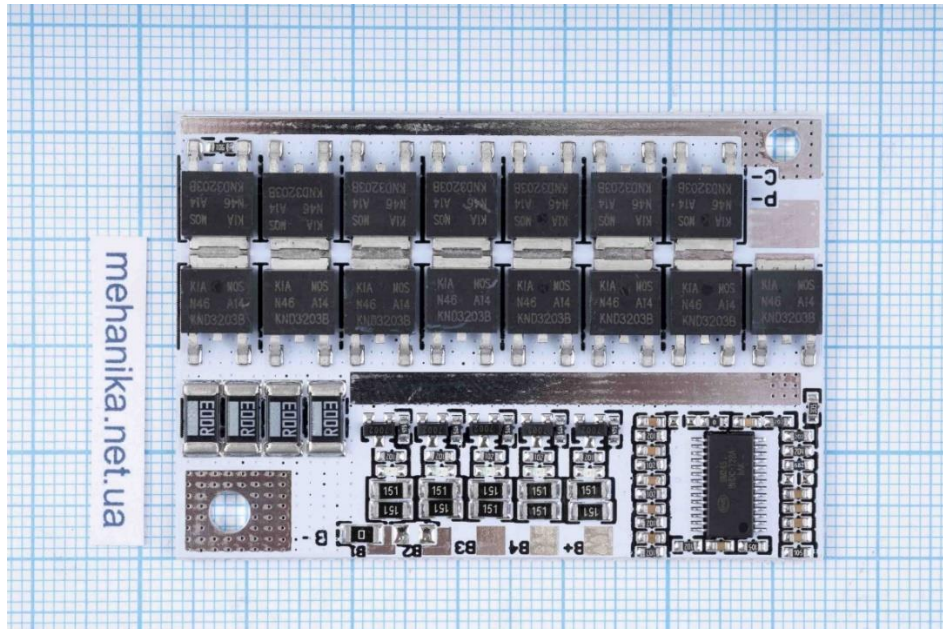


Рисунок 3.1 - BMS-контролер заряду для LiFePO₄, 4S (3S, 5S)/100A[17]

Інтелектуальна BMS (рис 3.2), у свою чергу, побудована на базі мікроконтролерів та оснащена рядом цифрових інтерфейсів, таких як UART, CAN-шина, RS485, I2C або бездротові модулі Bluetooth/Wi-Fi. Це дозволяє інтегрувати її до складних керуючих систем, а також проводити моніторинг та діагностику в реальному часі за допомогою спеціального програмного забезпечення. Smart BMS збирає та аналізує великий обсяг інформації: рівень напруги на кожному осередку, температуру кожного термодатчика, загальний струм, залишкову ємність, коефіцієнт деградації (SOH), цикл заряду/розряду, внутрішній опір осередків та інші критично важливі параметри.



Рисунок 3.2 - Активний балансер JK BMS 100A 7S-20S 0.6A (JK-BD6A20S10P) з кнопкою JiKong для акумуляторів 20S LiFePO4[18]

Ще одним важливим аспектом є можливість гнучкого налаштування. Якщо у звичайній BMS налаштування обмежуються заводськими параметрами (або взагалі не передбачаються), то Smart BMS надає змогу змінювати порогові значення напруги, струму та температури, конфігурувати режими роботи, встановлювати профілі заряджання для різних типів батарей, а також оновлювати прошивку для додавання нових функцій. Це критично важливо в системах, що працюють у змінних умовах або потребують адаптивного управління.

Особливу увагу варто приділити методам балансування осередків. У звичайних системах зазвичай використовується пасивне балансування, яке полягає у розсіюванні надлишкової енергії у вигляді тепла через резистори. Таке рішення просте, однак воно супроводжується додатковими втратами енергії. Smart BMS, окрім пасивного, часто підтримує активне балансування - переміщення надлишкової енергії з більш заряджених осередків до менш

заряджених, що значно підвищує енергоефективність системи та знижує термічні навантаження.

Також важливим фактором є система сповіщень та захисту. У Smart BMS передбачено багатоетапні механізми сигналізації про наближення до граничних умов, а також функції автоматичного відключення або зменшення навантаження для запобігання аваріям. Деякі моделі підтримують надсилення push-сповіщень, інтеграцію з хмарними сервісами, ведення логів та архівів роботи системи.

З економічної точки зору, звичайна BMS є значно дешевшою у виробництві та реалізації, оскільки не вимагає дорогих компонентів і складного програмного забезпечення. Вона ідеально підходить для простих або одноразових застосувань - портативних пристроїв, побутових акумуляторів, недорогих сонячних систем або DIY-проектів. Smart BMS, хоч і дорожча, окупається у випадках, коли система працює в критичних або високонавантажених умовах, де необхідна максимальна безпека, гнучкість керування та можливість віддаленої діагностики.

Вибір й основні характеристики Smart BMS

Надана інформація про Smart BMS була взята з мануала розробника[19] й сайту продавця[20].

Номинальний струм заряду й розряду складає 100А, кількість елементів для LFP складає 16S.

Основний принцип роботи активного балансування JK BMS 100A 7S-20S 0.6A (JK-BD6A20S10P) полягає в тому, щоб використовувати суперконденсатор як тимчасовий носій енергії, для передачі енергію від комірки з найвищою напругою, в комірку з найнижчою напругою, доти, доки напруги всіх осередків, що входять до збірного акумулятора, будуть рівні. Технологія активного балансування працює постійно незалежно від режиму заряду або розряду акумулятора (BMS з пасивним балансиrom працюють тільки на останньому етапі заряду)[20].

Основні характеристики плати SMART JK BMS 100A 7S-20S 0.6A JK-BD6A20S10P зображено в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 - Основні характеристики SMART BMS JK-BD6A20S10P[20]

Модель	BD6A20S10P
Кількість елементів для LiFePO4	8S-24S (8S, 12S, 16S, 20S,)
Вид балансування	Активний
Струм балансування	0,6 А
Опір головного ланцюга MOSFET	1 мОм
Номінальний струм заряду	100А
Номінальний струм розряду	100А
Піковий струм розряду	200А
Захист від перевантаження струмом	10А-100А регульована
Підключення осередків	Загальний порт
Шкала напруги одного осередку	1-5Б
Точність напруги	±3мВ
Напруга захисту від перезарядження	1.2V-4.35V регульований
Напруження скасування захисту від перезарядження	1,2В-4,55В регульоване
Час спрацьовування захисту від перевантаження струмом	2сек-120сек регульоване
Напруга захисту від перерозряду	1.2V-4.35V регульований
Напруження скасування захисту від перерозряду	1.2V-4.35V регульований
Кількість датчиків температури	2
Захист від короткого замикання	Так
Функція Bluetooth	Додаток для Android та IOS
Дистанційне керування RS485	RS485 (Опціонально) для моделей із кодом «R»
Додаткові порти зв'язку CAN	(Опціонально) для моделей із кодом «C»
Розмір	162мм*102мм*20мм
Діапазон робочих температур	-30°C ~ 70°C

Шість видів захисту акумулятора в JK BMS:

- Захист від короткого замикання
- Захист від перезаряду (можливість налаштування граничної напруги)

- Захист від перерозряду (можливість налаштування граничної напруги)
- Захист струму (налаштування захисту від перевантаження великим струмом, параметр, що налаштовується)
- Захист від перегріву та контроль за низькою температурою з можливістю управління нагрівальним елементом
- Контроль підключення та обриву балансувального з'єднання

Підключення JK BMS до елементів/осередків збирання акумулятора

Для акумуляторної батареї з 16 послідовно з'єднаними стрінгами спосіб встановлення та підключення показаний на рисунку 3.3. Під стрінгом акумуляторної батареї розуміється послідовне з'єднання комірок LiFePo4 акумулятора таким чином, що клема «+» однієї комірки з'єднується з клемою «-» другої комірки, а «+» другої комірки з'єднується з клемою «-» третьої і т.д.. Таким чином, стрінг містить батарею акумуляторів ємністю, яка відповідає ємності кожної комірки (100 А/год) а напругою, що дорівнює сумі напруг кожної з використаної комірок стрінгу ($16S * 3,5 V = 56 V$)

Плата BMS JK (Jikong) має два силові роз'єми або силові дроти (залежить від моделі) позначені латинськими літерами «P-» (як правило чорного кольору) і «B-» (як правило синього кольору)

«B-» — підключається до мінусової клеми крайнього осередку (складання послідовно з'єднаних осередків, на малюнку це правий осередок) К цій же клемі підключається чорний провід балансувального шлейфу (дивись на малюнку).

«P-» — Підключається до навантаження (на малюнку «Інвертор») і зарядного пристрою (на малюнку «Зарядка») (є зовнішнім мінусовим клемою акумуляторної складання)[20]

Плюсова клема крайнього осередку (складання послідовно з'єднаних осередків, на малюнку це ліве вічко) підключається безпосередньо до навантаження (на малюнку «інвертор») і зарядного пристрою (на малюнку «Зарядка») (є зовнішньою плюсовою клемою акумуляторної складання)[].

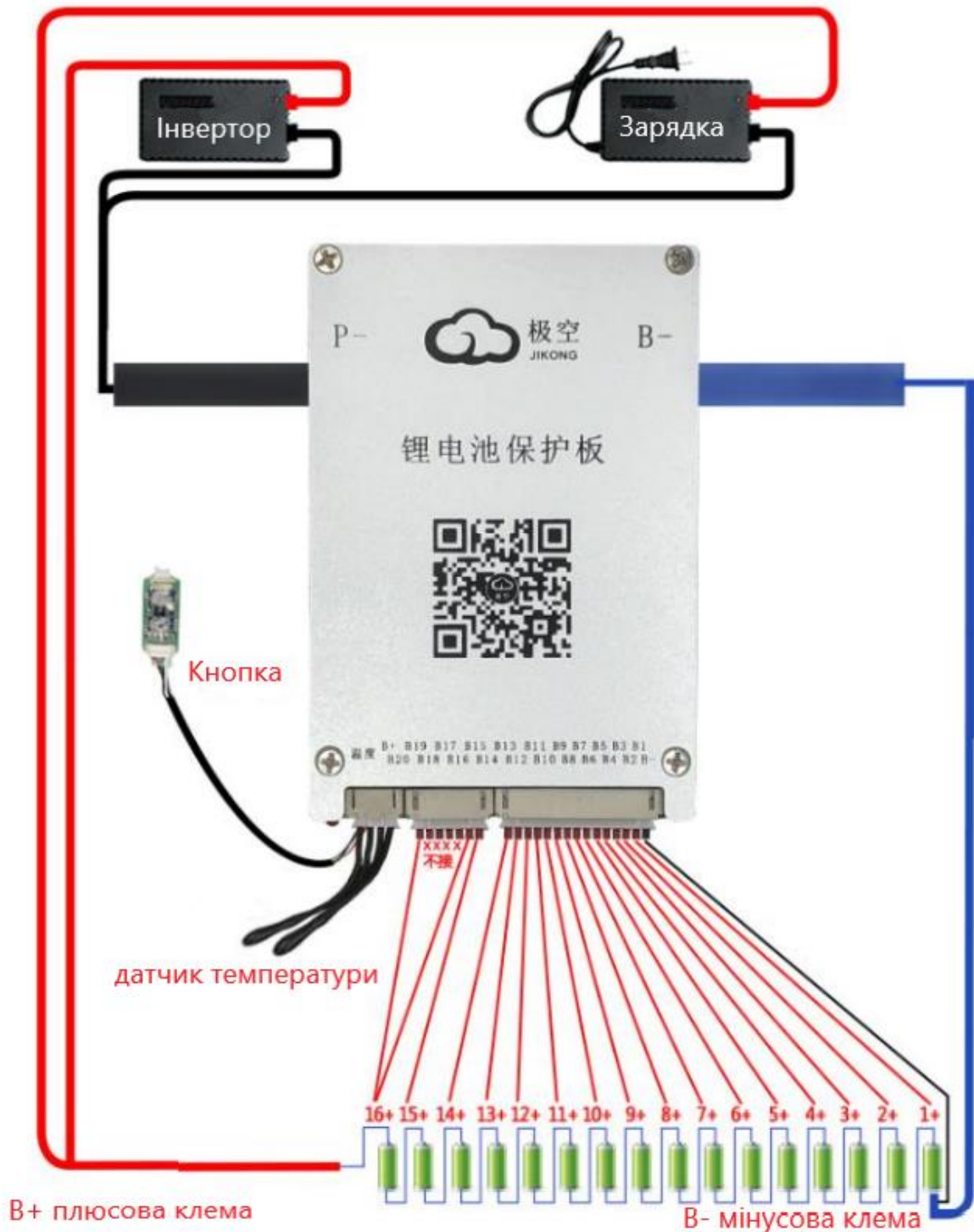


Рисунок 3.3 - спосіб підключення BMS на 16S при платі на 20S [19]

Перед підключенням балансувального шлейфу до плати BMS JK (Jikong) необхідно виконати перевірку за допомогою мультиметра:

1. Вимірюється напруга між двома сусідніми контактами на роз'ємі шлейфу.

2. Червоним щупом по черзі торкаються контактів роз'єму шлейфу та перевіряють, чи напруга на кожному наступному контакті зростає приблизно на величину напруги одного комірки, а на останньому контакті роз'єму відповідає сумарній напрузі всіх комірок.

Якщо обидва пункти перевірки виконано успішно, це свідчить про правильне підключення балансувального шлейфу до осередків акумуляторної збірки. Після цього підключається шлейф до плати BMS та виконується її активація або увімкнення.

Переконавшись, що вищевказані операції виконано правильно, вмикається плата захисту. Плата захисту не має контрольного перемикача увімкнення і призначена для роботи в режимі активації зарядки (виконується умова: напруга зарядного пристрою на 5В вища за напругу акумулятора) Тобто, після того, як акумулятор зібрано, зарядний пристрій потрібно підключити до плати захисту і запустити.

Мобільний додаток JK BMS

Основним завданням додатка JK BMS є забезпечення безпеки та оптимальної експлуатації акумуляторних збірок за рахунок реалізації функцій балансування, контролю напруги, струму, температури та стану заряду кожного осередку батареї. Завдяки цьому підвищується ефективність роботи батареї, продовжується її термін служби, а також зменшується ризик аварійних ситуацій, таких як перегрів, перенапруга або глибокий розряд.

Додаток JK BMS дозволяє користувачеві в реальному часі відстежувати ключові параметри батареї через інтерфейс смартфона або комп'ютера, використовуючи бездротове з'єднання Bluetooth або кабельне підключення. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс програми дає змогу не лише контролювати стан акумулятора, а й налаштовувати параметри роботи системи, отримувати сповіщення про можливі несправності та аналізувати історію роботи батареї.

Інтеграція JK BMS зі смартфонами або ПК дозволяє автоматично виконувати балансування заряду між комірками, що є критично важливим для

забезпечення рівномірного навантаження та попередження передчасного зношування окремих елементів батареї.

Основну частину інтерфейсу із зображенням характеристик АКБ й окремо комірок додатку зображено на рисунку 3.4. Ця BMS під'єднана до Li-ion типу акумулятора, схема з'єднання 16S6P, струм заряду 1 А. Напруга кожної комірки обмежена в системі до 4,144 В, заради довшої деградації АКБ.



Рисунок 3.4 – розділ «Статус» в додатку JK BMS з зображенням характеристик АКБ

Напруга комірок (Cell Voltage)

Дані про напругу кожної комірки в батареї відображаються в режимі реального часу, де червоний колір позначає комірку з найнижчою напругою, а синій колір позначає комірку з найвищою напругою.

Опір дроту комірки (Cell Wire Resistance)

Опір вирівнюючої лінії — це опір вирівнюючої лінії, отриманий шляхом перевірки захисної плати. Ця величина є лише попереднім розрахунком для запобігання неправильному підключенню або поганому контакту. Коли опір вирівнюючої лінії перевищує певну величину, він відображається жовтим кольором, і вирівнювання не може бути увімкнено в цей момент.

Область на рисунку 3.4 - це колонка з загальною інформацією про батарею. Параметри визначаються наступним чином:

- Час

Цей параметр показує загальний час роботи з моменту увімкнення плати захисту до поточного моменту.

- Заряджання (Charging)

Показує стан увімкнення МОН-транзистора заряджання на платі захисту. Якщо відображається "on", це означає, що МОН-транзистор заряджання увімкнений, і батарея може заряджатися. Якщо "off" - транзистор вимкнений, і заряджання батареї заборонене.

- Розряджання (Discharge)

Показує стан увімкнення МОН-транзистора розряджання на платі захисту. Якщо відображається "on", транзистор розряджання увімкнений, і батарея може розряджатися. Якщо "off" - розряджання заблоковано.

- Балансування (Balance)

Показує, чи активовано функцію балансування на платі захисту. Якщо відображається "On", плата автоматично виконає балансування після виконання умов його початку. Якщо "Off" - балансування вимкнене, і плата не вирівнює напругу між елементами батареї.

- Напруга (Voltage)

Ця область відображає загальну напругу акумулятора в реальному часі. Загальна напруга є сумою напруг усіх осередків батареї.

- Струм (Current)

Цей параметр показує загальний струм батареї в реальному часі. Якщо батарея заряджається - значення струму додатне, якщо розряджається - від'ємне.

- Потужність батареї (Battery Power)

Показує загальну вхідну або вихідну потужність батареї. Значення обчислюється як добуток напруги батареї на абсолютне значення струму.

- Залишок заряду (Remain Battery)

Відображає відсоток залишкової енергії в батареї на поточний момент.

- Ємність батареї (Battery Capacity)

Показує фактичну ємність батареї, розраховану захисною платою на основі високоточної моделі SOC (стану заряду). Одиниця виміру - ампер-години (А/год). Значення потребує оновлення після повного циклу розряду та заряду батареї.

- Залишкова ємність (Remain Capacity)

Відображає кількість залишкової ємності батареї в ампер-годинах (А/год).

- Циклічна ємність (Cycle Capacity)

Цей параметр показує сумарну ємність, яку батарея віддала під час розряду за весь період експлуатації. Одиниця виміру - ампер-години (А/год).

- Кількість циклів (Cycle Count)

Показує кількість повних циклів заряджання до 100%. Одиниця виміру - кількість разів.

- Середня напруга комірок (Ave. Cell Vol.)

Показує середнє значення напруги на осередках батареї. Одиниця виміру - вольт (В).

- Різниця напруги комірок (Delta Cell Vol.)

Показує різницю між максимальною та мінімальною напругою комірок у батарейному модулі. Одиниця виміру - вольт (В).

- Струм балансування (Balance Cur.)

Коли плата захисту вмикає функцію балансу і досягає стану балансу, вона відображає струм балансу в реальному часі. Одиниця виміру - ампер А.

На рисунку 3.5 зображено інтерфейс BMS й дані акумулятора, який відключений від зарядного пристрою, і BMS плата почала проводити балансування струмом (Balance Cur.): 0.380 А й -0.333 А.

0.380 А - означає, що BMS активно знижує напругу на комірках із вищою напругою, розряджаючи їх через балансуєчі резистори з силою струму 0.380 ампер.

-0.333 А - знак мінус, використовується в інтерфейсі BMS, щоб вказати напрямок струму - тобто, також йде розряд через балансування, але вже з іншою силою струму (0.333 А).



Рисунок 3.5 – зображення балансування струмом в програмі JK BMS

3.2 Проектування системи накопичення енергії на базі LiFePO₄

Система накопичення енергії, спроектована на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторних комірок, призначена для забезпечення стабільного електропостачання в автономному або резервному режимах. Розглядаються основні технічні характеристики системи, принципи формування акумуляторного блоку, а також вибір ключових компонентів, включаючи комірки та систему управління батареєю, проектується функціональна і структурна схема АКБ й ФЕС, відповідно.

Основні параметри акумуляторної батареї

Проектована акумуляторна батарея має активну енергетичну потужність 5 кВт·год. В основі конструкції лежать LiFePO₄-комірки з номінальною ємністю 100 А·год та номінальною напругою 3.2 В. Максимальна напруга при повному заряді однієї комірки становить 3.5 В. Режим заряду передбачає струм заряду, рівний 1С, що відповідає 100 А для кожної комірки.

Формування акумуляторного блоку

Акумуляторна батарея формується за схемою 16S24P, що означає 16 послідовно з'єднаних комірок у кожному стрінгу (16S), та 24 паралельні гілки таких стрінгів (24P). Це дозволяє досягти таких параметрів:

Номінальна напруга одного стрінга - 48 В ($16 * 3.2$ В);

Загальна ємність батареї - 2400 А/год ($24 * 100$ А/год);

Тривалість роботи:

Розрахункова тривалість автономної роботи акумуляторної батареї становить 24 години.

Номінальна напруга LiFePO₄ становить 3,2 В, однак повністю заряджений LiFePO₄ елемент може мати напругу від 3,6 до 3,65 вольт, тоді як повністю розряджений елемент може мати напругу від 2,5 до 2,8 вольт. Однак, розглядаються вживані комірки, тому за максимальну напругу на комірку взято 3.5 В, відповідно, у системі на 16S максимальна напруга складатиме 56 вольт.

Балансування комірок активним балансиrom перед використанням АКБ

Верхнє балансування зазвичай виконується, коли елементи збираються в батарею з BMS для сонячних систем. У цьому випадку BMS, як правило, виконує верхнє балансування елементів, тому будь-який інший тип балансування елементів буде швидко відкинутий. Крім того, батареї проводять невелику частину свого життя на нижніх рівнях заряду, тому балансування у верхній частині буде найбільш ефективним.

Після першого балансування не знадобиться повторне балансування, якщо підібрати елементи. Комірки мають тенденцію деградувати в процесі експлуатації однаково, і балансування BMS буде підтримувати їх збалансованими. Виняток становлять випадки, коли відбувається зарядка і розрядка з дуже високим струмом заряду. За таких умов різниця між елементами може посилитися, і BMS може не встигати за ними. (Це не характерно для сонячних установок).

Перед початком балансування потрібно розрядити комірки до граничної допустимої межі розряду, опісля почати заряд. Під час циклу заряду напруга на комірці досягне 3,45 В, потрібно увімкнути активний балансір, який балансуватиме, поки всі елементи не будуть повністю заряджені. Струм заряду низький, в іншому випадку струм заряду перевищує струм балансування, і один з елементів все одно може "втекти". Спосіб запобігти цьому - почати з досить низької напруги заряду, наприклад, 3,5 В/елемент (56 В для системи 48 В) і низького струму заряду (1 або 2 ампера), і залишити його, поки всі елементи не будуть збалансовані, а струм не впаде до нуля.

На елементах LiFePO₄ балансувальник повинен вмикатися лише тоді, коли напруга на елементах перевищує 3,45 В. Більшість активних балансувальників працюватимуть безперервно. Це не добре працює на елементах LiFePO₄. Коли SOC знаходиться в плоскій частині кривої, напруга елемента більше не є повним показником SOC елемента. Якщо балансувальник намагається збалансувати напругу між елементами в середині кривої заряду, це може призвести до погіршення балансу.

Проектування схем з'єднання АКБ з BMS

На рисунку 3.5 представлена структурна електрична схема акумуляторної батареї, сформованої за конфігурацією 16S24P із використанням комірок LiFePO4 та системи управління батареєю BMS.

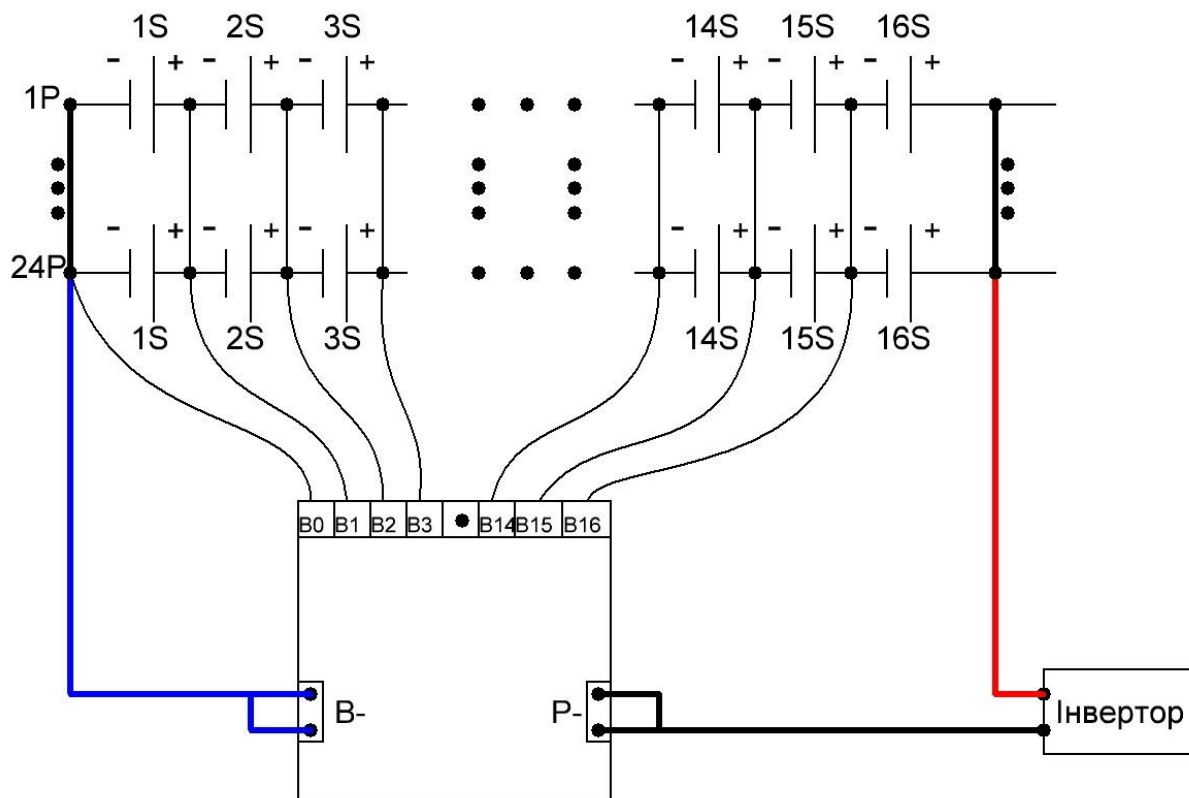


Рисунок 3.5 – функціональна схема акумуляторної батареї

Основні елементи схеми:

- Комірки LiFePO4 (1P - 24P):

Вертикальні ряди комірок позначають паралельні з'єднання (1P-24P). Кожна комірка має ємність 100 А·год і номінальну напругу 3.2 В. Паралельне з'єднання збільшує загальну ємність батареї.

- Послідовне з'єднання комірок (1S - 16S):

Комірки з'єднані у стрінги по 16 елементів послідовно. Кожен стрінг формує номінальну напругу 48 В (16 * 3.2 В).

- **BMS:**

У центрі схеми розташований контролер BMS, до якого підключені дроти балансування з кожного послідовного з'єднання (B0 - B16).

Виводи В- та Р- позначають відповідно мінус акумулятора та загальний вихід живлення системи (до інвертора).

- **Інвертор:**

Вихідний струм із системи надходить до інвертора, який перетворює постійну напругу 48 В у змінну, придатну для живлення споживачів.

- **Маркування полярності:**

Червоним кольором позначено позитивний вихід (+), синім - негативний вихід (-), що підключені до відповідних виводів інвертора через BMS.

На рисунку 3.6 представлена структурна схема інтегрованої енергетичної системи, до складу якої входять фотоелектрична станція, акумуляторна батарея, BMS, інвертор, електромережа та споживачі.

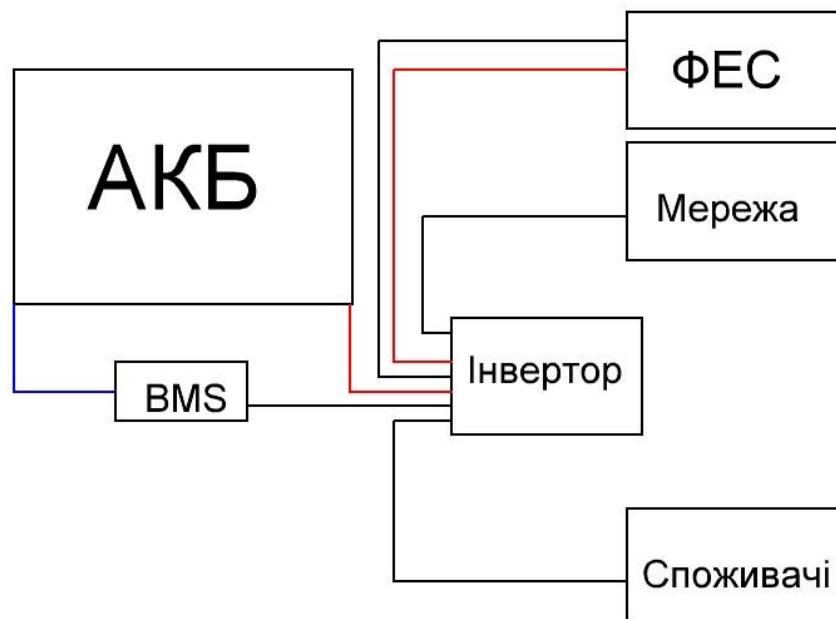


Рисунок 3.6 – зображення структурної схеми гібридної фотоелектричної станції

ФЕС виконує функцію джерела відновлюваної енергії, перетворюючи сонячне випромінювання в електричну енергію постійного струму, яка надходить до АКБ для накопичення або безпосередньо до інвертора для перетворення. АКБ, у свою чергу, зберігає енергію, забезпечуючи живлення споживачів у разі відсутності або нестачі енергії з інших джерел. Роботою АКБ керує BMS, яка виконує моніторинг параметрів батареї, захист від перевантаження, перезаряду, глибокого розряду та інших критичних режимів. Інвертор перетворює постійну напругу від АКБ або ФЕС у змінну, яка подається до споживачів. За необхідності, система може синхронізуватися з мережею, використовуючи її як резервне джерело енергії або для заряджання АКБ.

3.3 Алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи контролю стану та заряду акумуляторної батареї

Запропонована і розроблена батарея акумуляторів LFP, які були у використанні, в процесі експлуатації обов'язково вимагає контролю її стану. Тобто, такий тип АКБ треба доповнити інформаційно-вимірювальною системою стану окремих акумуляторних комірок на предмет оцінки їх рівня деградації. Параметри, за якими оцінюється рівень деградації є напруга комірки, після її повного балансування (повного заряду) і внутрішній опір комірки. В процесі експлуатації акумуляторної комірки вона деградує, при цьому зростає її внутрішній опір. Зростання внутрішнього опору приводить до того, що частина напруги комірки, яка подається на навантаження зменшується, тому що частка напруги ЕРС на внутрішньому опорі комірки збільшується. Цей процес незворотній, і така комірка при перевищенні вищого граничного значення підлягає заміні.

Для того, щоб локалізувати таку комірку доповнюємо існуючу систему заряду й контролю BMS супервізорною інформаційно-вимірювальною системою вимірювання напруги на кожній комірці і струму стрінга, що дозволить нам на основі цих вимірних параметрів визначити внутрішній опір кожної комірки і

локалізувати дефектну комірку. Цей процес відбувається під час заряду стрінга батареї з допомогою інвертора й BMS.

Супервізорна інформаційно-вимірювальна система складається з модуля ARDUINO Mega, 16 датчиків напруги і 1 датчика струму. Ці вказані давачі через інтерфейс I2C надають інформацію у вигляді цифрового коду про вимірні текучі значення струму й напруги по кожній комірці практично синхронно. Розділивши отримані значення напруги на вимірне значення струму отримуємо значення внутрішнього опору по кожній комірці. Вимірні значення після розрахунків виводяться на LCD індикатор 20*4 рядки послідовно. Оператор в процесі заряджання оцінює величину внутрішніх опорів і локалізує комірку з аномальним внутрішнім опором.

В батареї 16S24P фізично тільки 16 різних потенціалів, бо всі 24 осередки однієї паралельної гілки «в'яже» свій плюс і мінус - їхня напруга завжди однакова. Отже, щоби контролювати стан всіх осередків, достатньо зчитувати 16 каналів, а не 384. Щоб промоніторити кожну комірку окремо (виявити слабкий елемент серед паралелі), доведеться «розв'язати» паралельні зв'язки й провести до кожного елемента окремий дріт - це вартісно й громіздко. Для функціонування схеми було обрано датчик напруги до 5 В, що для роботи з напругою LFP модулів підходить повністю, датчик струму 100 А. На рисунку 3.7 зображена функціональна схема з'єднання модуля Arduino з акумуляторною батареєю.

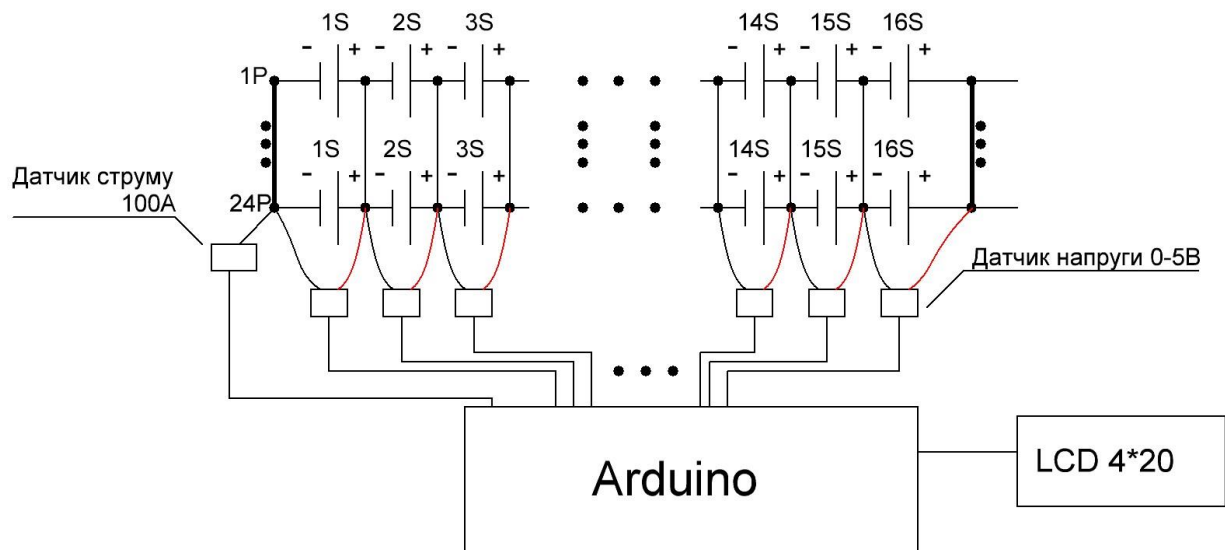


Рисунок 3.7 – функціональна схема Arduino з LCD дисплеєм

3.4 Економічний аналіз використання вживаних акумуляторів у гібридній ФЕС

Система з навантаженням 4,8 кВт/год безперервно 24 години вимагає 115,2 кВт/год енергії на добу ($4,8 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ год} = 115,2 \text{ кВт/год}$). Вихід із надлишком через гібридний інвертор передбачає споживання в період сонячного світла, збереження енергії в батареї і віддачу назад в мережу або власне споживання.

Інвертор має забезпечувати безперервне навантаження 4.8 кВт. Рекомендовано брати потужність інвертора з запасом 20%. Тобто $4.8 \text{ кВт} \cdot 1.2 = 5.76 \text{ кВт}$. Відповідно оптимально вибрати інвертор близько 6 кВт з урахуванням температурного зниження вихідної потужності.

Глибина розряду LFP акумуляторної батареї – 0,9 від загальної ємності АКБ, тоді загальна ємність складатиме 103,68 кВт/год.

Загальна кількість циклів розряду/заряду буде складати приблизно 3300 циклів. Оцінюючи загальну ємність, то така кількість циклів проєктовано буде вкладатись в деградацію АКБ з 80% до 70%.

Ціна за 1 кВт/год за двозонним тарифом складатиме в день 4,32 гривні, а з 23:00 по 07:00 складатиме 2,16 гривні[21]. Різниця між тарифами складатиме 2.16 гривні. Тобто, щоб дізнатись прогнозовану суму, яку можна отримати від продажу й купівлі електроенергії за двозонним тарифом за 1 день потрібно:

$$103,68 \text{ кВт/год} * 2.16 \text{ грн.} = 223.94 \text{ грн.}$$

Отже, якщо використовувати АКБ для стаціонарного акумулювання електроенергії через двозонний тариф, то за 1 день й 1 повний цикл розряду/заряду вийде зробити 223.94 гривні. За 1 рік експлуатації АКБ буде проведено 365 циклів, орієнтована відведена кількість циклів 3300, а отже загальний час прогнозується в 9 років. Загальна зароблена кількість грошей, без урахування девальвації, інфляції, пільг, змін в двозонному тарифі складатиме 81700 гривень у рік, 1974 доларів, за курсом НБУ станом на 13.06. 2025 1 долар США - 41,2 гривень[22]. За прогнозованих 9 років роботи станція принесе доходу у розмірі 735 000 гривень, або 17 847 доларів США.

Зважаючи на те, що фотомодулі не є обов'язковим елементом для гібридної фотоелектричної системи, оскільки її основне призначення - забезпечення гібридної роботи резервної групи під час відключень електроенергії, в загальні розрахунки окупності акумуляторної станції на базі вживаних модулів LFP розглядатись не буде. Фотомодулі виконують лише допоміжну функцію, підзаряджаючи акумуляторні батареї, тим самим зменшуючи споживання електроенергії з мережі. Основне ж призначення гібридної системи акумулювання є акумулювання купленої електроенергії за нічним тарифом і продаж за денним тарифом.

На внутрішньому ринку вживаних акумуляторів, Tesla LFP продаються з різним пробігом, залишковою ємністю. Але проаналізувавши декілька оголошень, можна поверхнево оцінити ціну за 1 кВт/год - 3423 грн[23], 4076 грн[24], 5181 грн[25], все залежить від загальних параметрів LFP акумулятора. В середньому, 1 комірку продають за 2300 грн[26]. Якщо взяти за середнє значення 4076 гривень за 1 кВт/год, то створення АКБ в 115 кВт/год буде коштувати 393 645 гривень, або ж 9554 доларів США. Крім того, варто зазначити, що ціни

можуть відрізнитись від продавців/компаній, оптової закупки й налагодження закупівельних відносин з продавцями/компаніями. На ціну також може впливати геополітична ситуація в світі, військові конфлікти, нові дослідження і загальне збільшення на ринку збуду вживаних акумуляторів через планомірне збільшення електромобілів у світі.

Гібридний однофазний інвертор Deye SUN-6K-SG03LP1-EU 48V 6кВт коштує на ринку 34820 гривень[27]. Фотопанелі обираються для проекту 575 W, собівартість 4000 гривень за 1 штуку, для оптимальної роботи з двозонним тарифом достньо 13 штук, отже 52000 гривень, 1300 доларів США[28]. Ціна солярного кабелю 41 гривня за 1 метр, на 6 кВт ФЕС орієнтовно йде 200 метрів, отже загальна сума складатиме 8240 гривень, або ж 200 доларів США.

Загальна ціна, без урахування фотоелектричних панелей, соляркабелю, розхідників й монтажних робіт складає 428 821 гривню, 10399 доларів США. З урахуванням приблизної собівартості розхідників й додаванням солярного кабелю й фотопанелей сума збільшиться орієнтовно до 500000 гривень, 12135 доларів США.

Приблизна сума окупності складатиме 250000 гривень, або 6047 доларів США. Це 27777 гривень, 674 доларів США за рік активної експлуатації ФЕС. Окупність такої акумуляуючої станції гібридної ФЕС не є надто великою, але все ж ця модель має право на існування при певних умовах. Насамперед компанії малого й середнього приватного бізнесу з декількома робочими змінами, в яких робоча лінія повністю залежить від постачання електроенергії. Також варто розглянути варіант приватної особи, яка використовує даний тип акумуляторної підстанції для власних потреб, таких як розмірене життя й робота з дому під час відключень світла, заряджання власного електромобіля.

Висновок до розділу

У третьому розділі представлено розроблення інформаційно-вимірювальної системи на базі SMART JK BMS для інтеграції з акумуляторною

батареею LiFePO₄. Детально описано схеми підключення, алгоритми моніторингу та захисту, передбачені інтерфейси (UART, RS485, CAN) для передачі даних. Було змодельовано електричні схеми у середовищі SPlan7 та надано аналіз їх роботи в умовах змінного навантаження.

Описано процедуру налаштування системи, визначення критичних параметрів (температура, напруга, струм), а також реалізовані заходи захисту від перезаряду, глибокого розряду, короткого замикання. Практичне застосування даної системи дозволяє ефективно керувати станом батареї, забезпечити її довговічність і надійність в експлуатації. Було проведено економічний розрахунок, за який було даний висновок, що система є придатною до інтеграції у системи резервного живлення як для приватних домогосподарств, так і для промислових об'єктів.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи було досліджено ключові особливості впровадження акумуляторних систем другого циклу життя на базі LiFePO_4 акумуляторів у структуру гібридних енергетичних систем. Виконано аналіз характеристик таких батарей, їхньої деградації після першого життєвого циклу та оцінці можливостей подальшого ефективного використання. Виявлено, що акумулятори даного типу, попри часткову втрату ємності, мають значний залишковий потенціал і можуть забезпечувати стабільне електропостачання у поєднанні з фотоелектричними станціями.

Виконано аналіз методів оцінки технічного стану вживаних батарей, а також проаналізовано сучасні підходи до контролю параметрів заряду, розряду та температурного режиму. Ретельне дослідження фізико-хімічних процесів у акумуляторах дозволило розробити обґрунтовану модель їхнього повторного використання. Підтверджено, що за умови правильної інтеграції та моніторингу, вживані батареї LiFePO_4 не лише економічно доцільні, а й безпечні в експлуатації.

Запропоновано технічне рішення у вигляді інформаційно-вимірювальної системи на основі SMART JK BMS, адаптованої до роботи з вживаними акумуляторними модулями. Проектування електричних схем, а також імітаційне моделювання в програмному середовищі SPlan7 дозволили оцінити ефективність роботи системи у реальних умовах. Досягнуто зниження ризиків пов'язаних з експлуатацією старих батарей за рахунок розробленого моніторингу та системи захисту.

За результатами реалізації всіх етапів роботи, було досягнуто поставленої мети — доведено технічну й економічну доцільність вторинного використання LiFePO_4 акумуляторів у системах накопичення енергії. Отримані результати можуть бути впроваджені в проекти з розбудови автономних енергетичних рішень для побутових або промислових потреб.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hu Qihan. Rechargeable Batteries for Renewable Energy: Current Status, Technical Challenges, and Future Directions // *E3S Web of Conferences*. – 2025. – Vol. 606. – Article № 02004. – Режим доступу: [10.1051/e3sconf/202560602004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560602004)
2. Тарахтій О. С., Лесів Б. І. Акумуляція енергії. Сучасний стан і проблеми // *Грааль науки*. – 2023. – № 34 (груд.). – С. 156–162. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/377023885_AKUMULACIA_ENERGII_S_UCASNIJ_STAN_I_PROBLEMI
3. Ufine Battery. Complete Guide to LiFePO4 Battery Charging & Discharging // *Ufine Battery Blog*. – Опубліковано 1.4 р. тому. – Режим доступу: <https://www.ufinebattery.com/blog/lifepo4-battery-charging-and-discharging/> (дата звернення: 13.06.2025).
4. Bluetti. *All Guide to LiFePO4 Voltage Chart 12 V/24 V/48 V* – BLUETTI EU Blog, опубліковано 10 місяців тому (станом на червень 2025) – Режим доступу: <https://www.bluettipower.eu/blogs/news/lifepo4-voltage-chart> (дата звернення: 13.06.2025)
5. PowMr. *Guide for LiFePO4 Voltage Chart & SOC 12 V/24 V/48 V* // PowMr Blogs. – Опубліковано 26.08.2024. – Режим доступу: <https://powmr.com/blogs/news/lifepo4-voltage-chart-and-soc> (дата звернення: 13.06.2025)
6. Triniti-SB. Сонячні панелі: принцип роботи та актуальність в Україні // *Triniti-SB Blog*. – Опубліковано 1,4 р. тому (станом на червень 2025). – Режим доступу: <https://triniti-sb.com.ua/blog/sonjachni-paneli-princip-roboti-ta-aktualnist-v-ukraini/> (дата звернення: 13.06.2025)
7. Ткачук В.М. Засоби акумулявання енергії та їх роль у перспективах розвитку відновлювальних джерел енергії. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/25937.pdf>. - стор. 26 (дата звернення: 13.06.2025)
8. Костенко Г. П., Запорожець А. О. SWOT-аналіз перспектив вторинного застосування батарей електротранспорту в системах зберігання

енергії в Україні // Енергетичний менеджмент та сталий розвиток. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/25937.pdf>. – стор. 26. – (дата звернення: 13.06.2025)

9. The Energyst. *What's the lifecycle of an electric vehicle battery?* // The Energyst (допис блогу). – Опубліковано 03.10.2022. – Режим доступу: <https://theenergyst.com/whats-the-lifecycle-of-an-electric-vehicle-battery/> (дата звернення: 13.06.2025)

10. LiFePO₄-Battery. *Exploring Tesla LFP Battery Technology: Which Models Have It?* // LiFePO₄-Battery News. – Опубліковано 04.07.2023. – Режим доступу: <https://www.lifepo4-battery.com/News/which-tesla-have-lithium-lifepo4-battery.html> (дата звернення: 13.06.2025)

11. MyBroadband Forum. *Solar installers and suppliers* [обговорення, стор. 53, #1051] // MyBroadband.co.za. – Опубліковано 24.03.2022. – Режим доступу: <https://mybroadband.co.za/forum/threads/solar-installers-and-suppliers.1180128/page-53> (дата звернення: 13.06.2025)

12. BRAVA Batteries. *LiFePO₄ Battery Discharge and Charge Curve* – опубліковано 2,6 року тому (станом на червень 2025). – Режим доступу: <https://www.bravabatteries.com/lifepo4-battery-discharge-and-charge-curve/> (дата звернення: 13.06.2025)

13. Cao Z. та ін. *Second-life assessment of commercial LiFePO₄ batteries retired from EVs* [Електронний ресурс] // *Batteries*. – 2024. – Vol. 10, No. 9. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/9/306#:~:text=the%20capacity%20and%20internal%20resistance,final%20capacities%20of%20the%20four> (дата звернення: 13.06.2025).

14. Victron Energy. *Datasheet – 12,8 & 25,6 Volt Lithium-Iron-Phosphate Batteries Smart* [Електронний ресурс]. – Опубліковано 9 місяців тому (станом на червень 2025). – Режим доступу: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-12%2C8-%26->

[25%2C6-Volt-lithium-iron-phosphate-batteries-Smart-EN.pdf](#) (дата звернення: 13.06.2025)

15. Kostenko Ganna (ORCID: 0000-0002-8839-7633) [електронний ідентифікатор дослідника] // ORCID. – Режим доступу: <https://orcid.org/0000-0002-8839-7633> (дата звернення: 13.06.2025)

16. Костенко Г. П. Вторинні батареї електротранспорту як об'єкт моделювання в системі формування політики циркулярної енергетики // Збірник матеріалів XLIII Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ, 14 травня 2025 р. – Київ: ПІМЕ НАН України, 2025. – С. 95–98. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/391733430> (дата звернення: 13.06.2025).

17. Механіка. *BMS-контролер заряду для LiFePO₄, 4S/100A/3.2 V* [Електронний ресурс] // mehanika.net.ua. – Режим доступу: <https://mehanika.net.ua/product/bms-kontroler-zaryadu-dlya-lifepo4-4s-100a-3-2v/> (дата звернення: 13.06.2025)

18. DIY Shop. *Активний балансир BMS JK-BD6A24S10P для акумуляторів 24S LiFePO₄* [Електронний ресурс] // diyshop.com.ua. – Опубліковано невідомо. – Режим доступу: <https://diyshop.com.ua/ua/aktivnyj-balansir-bms-jk-bd6a20s10p-dlya-akkumulyatorov-24s-lifepo4> (дата звернення: 13.06.2025)

19. Gobel Power. *JK Smart BMS with Active Balancer – Operation and Maintenance Instructions* [Інструкція користувача]. – Gobelpower.com. – [б. м., б. р.]. – 47 с. – Режим доступу: файл з локального архіву «JK-Smart-BMS-with-Active-Balancer-Instruction-EN.pdf» (дата звернення: 13.06.2025).

20. LiBattery. *BMS-контролер заряду JK BMS BD6A20S10P (7S–20S, 100 A, 0,6 A активне балансування)* [Електронний ресурс] // libattery.com.ua. – Режим доступу: <https://libattery.com.ua/uk/katalog/jk-bms-100a-7s-20s-0-6a-bd6a20s10p/> (дата звернення: 13.06.2025).

21. Факти ICTV. *Тариф на світло з 1 червня 2025 року: скільки платитимуть українці* [Електронний ресурс] // fakty.com.ua. – Опубліковано приблизно тиждень тому. – Режим доступу: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20250601-taryf-na-svitlo-z-1-cherhvnya-2025-roku-skilky-platytymut-ukrayinczi/> (дата звернення: 13.06.2025)
22. Мінфін. *Онлайн конвертер USD → UAH* [Електронний ресурс] // minfin.com.ua. – Оновлено 13.06.2025 00:00 UTC. – Режим доступу: <https://minfin.com.ua/currency/converter/usd-uah/> (дата звернення: 13.06.2025)
23. Ігор Кихтенко. *Батарея Tesla 3 Y LFP 60 kW* [Оголошення] // OLX.ua. – Б/в. – Розміщено 28 травня 2025 р. – Ціна 4 800 USD. – Режим доступу: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/batareya-tesla-3-y-lfp-60kw-IDYaj54.html> (дата звернення: 13.06.2025)
24. Vova. *Tesla 3/Y LFP battery 2023, 60 kW, CATL, iron-phosphate LiFePO4* [Ad] // OLX.ua. – Used. – Posted 30 May 2025. – Price 5 900 USD. – Available at: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/akumulyator-batareya-tesla-3-y-lfp-2023-60kw-catl-zhelezofosfat-lifepo4-IDWJVLM.html> (accessed 13 June 2025) .
25. Сергій. *Батарея високовольтна 60 кВт Tesla 3/Y LFP LiFePO4* [Оголошення] // OLX.ua. – Б/в. – Розміщено 9 червня 2025 р. – Ціна 7 500 USD. – Режим доступу: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/batareya-visokovoltna-60kvt-tesla-3-y-lfp-lifepo4-lty-zalzofosfat-IDR6zWx.html> (дата звернення: 13.06.2025)
26. Олександр. *Елементи батареї Tesla LiFePO4 (залізофосфат) 60 kWh* [Оголошення, онлайн-торгівля] // OLX.ua. – Нове. – Ціна 58 USD. – Розміщено 11.06.2025. – Режим доступу: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/elementi-batare-tesla-lifepo4zhelezofasfat-60-kwh-IDVrInQ.html> (дата звернення: 13.06.2025)
27. Ахіома Energy. *Гібридний інвертор 6 кВт 48 В однофазний + Wi-Fi, SUN-6K-SG03LP1-EU, Deye* [Електронний ресурс] // ua.axioma.energy. – В наявності станом на 13.06.2025 – Режим доступу: <https://ua.axioma.energy/hibrydnyi-invertor-6kvt-48v-odnofaznyiwifi-sun-6k-sg03lp1-eu-deye/> (дата звернення: 13.06.2025)

28. SKR-GROUP.

Сонячна

панель

Tongwei Solar TWMND-72HD590 590 Wp N-Type, Bifacial [Електронний ресурс] // skr-group.com. – Під замовлення, станом на 13.06.2025. – Ціна: 4 240 ₴. – Режим доступу: <https://skr-group.com/p2509705819-solnechnaya-panel-tongwei.html> (дата звернення: 13.06.2025)