

Зимовченко В.О.<https://orcid.org/0000-0001-9834-8547>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ДЛЯ СТАЦІОНАРНОГО ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЄВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Літієві акумулятори є основою сучасної цифрової електроніки, їх застосування має широкий спектр, від портативної електроніки до електромобілів. В статті порівнюються три популярні типи: літій-іонні (Li-ion), літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) та літій-титанатні (LTO). Аналіз базується на ключових параметрах: безпека, цикл життя, енергетична щільність, робоча температура, швидкість заряду/розряду та способи застосування. Також розглянуто важливість правильного вибору елемента живлення для використання у різних цифрових пристроях, вплив на їх роботу та ризики неправильного вибору.

Правильно обрати елемент живлення є критичним для забезпечення ефективності роботи, безпеки та економічної доцільності системи. Акумуляторна батарея (далі АКБ) є серцем будь-якого сучасного цифрового пристрою, що визначає його автономність, стабільність та довговічність. Неправильний вибір може призвести до неефективного використання ресурсів, підвищених витрат на заміну його при поломці. В пристроях де потрібна стабільна напруга та струм, потрібно враховувати навантаження, температурний режим та кількість циклів використання. Головне це правильно проаналізувати специфікації пристрою в якому буде використовуватись елемент живлення. Наприклад для дронів дуже важливий високий розряд, а от для сонячних панелей важливим є цикл життя АКБ.

Мікроконтролери, сенсори та дисплеї чутливі до параметрів живлення. Нестабільність або коливання в напрузі можуть спричинити збої в роботі, помилки або навіть перезавантаження пристрою. Неправильний підбір акумулятора буде знижувати його ККД. У системах з мікроконтролерами (Arduino, Raspberry Pi), стабільне живлення запобігає втраті даних під час запису на флеш пам'ять чи MicroSD.

Невдалий підбір акумуляторної батареї може створити суттєві експлуатаційні ризики. Li-ion елементи при механічному пошкодженні або перезаряді можуть здуватися й втратити герметичність із виділенням літію, що здатне спричинити пошкодження плати пристрою або навіть загоряння. Натомість LiFePO₄ та LTO вирізняються підвищеним рівнем безпеки й краще пристосовані до роботи в умовах підвищених температур.

Висока вартість LTO елементів економічно недоцільна для масового сегмента споживчої електроніки, тоді як використання бюджетних Li-ion рішень у портативних або промислових застосуваннях може спричинити зростання витрат через часту заміну та обслуговування.

Невідповідність типу АКБ умовам експлуатації пришвидшує деградацію та збільшує обсяг відпрацьованих елементів живлення, що ускладнює переробку й підвищує ризики потрапляння літію та важких металів у довкілля.

Правильно підібрана АКБ забезпечує оптимальні експлуатаційні характеристики, мінімізує ризики відмов і підвищує загальну надійність системи.

Ключові слова: енергія, літієві акумулятори, АКБ, Li-ion, LiFePO₄, LTO, живлення, мобільність.

Постановка проблеми. Енергетична революція XXI століття базується на переході від викопних джерел до електроенергії з низьким вуглецевим слідом та на відновлюваних джерелах енергії. Центральною технологією цього переходу є літій-іонні акумулятори. Вони мають різні хімічні властивості, різні характеристики ефективності,

довговічності та безпеки, що обумовлює оптимальний вибір під конкретні задачі. Сучасні наукові та практичні питання включають:

- Правильний підбір типу АКБ під конкретні умови експлуатації.
- Що саме впливає на втрату ресурсу та безпеку.

– Методи оцінки внутрішнього опору, що дають достовірну інформацію про стан АКБ.

Ці питання особливо критичні для розробки надійних систем енергозбереження, вибору електромобілів, портативної техніки, енергетичних сховищ та автономних джерел живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні кілька років зростає кількість публікацій, що присвячені порівнянню характеристик різних літєвих акумуляторів, зокрема їх поведінці в цифрових системах з різними сценаріями використання.

Енергетична щільність та циклічний ресурс

Аналіз досліджень показує, що традиційні *Li-ion* батареї забезпечують високу питому енергію, що робить їх привабливими для компактних портативних пристроїв [1]. Проте їхній циклічний ресурс суттєво нижчий у порівнянні з альтернативними технологіями, особливо при роботі з глибокими циклами розряду, що є критичним для застосувань із частими заряд-розряд циклами. Наприклад, *LTO* елементи демонструють значно вищий ресурс циклів (до кількох тисяч циклів без істотної деградації) завдяки своїй структурній стабільності та низькій тенденції до утворення активних улагоджених структур у матеріалах електродів.

Термальна та електрична стабільність

У своїх роботах вчені наголошують на значній різниці в термічній поведінці різних типів АКБ [2]. *LiFePO₄* батареї вирізняються високою термічною стабільністю та меншим ризиком теплового розгону порівняно з традиційними *Li-ion* системами, що зменшує ймовірність аварійних ситуацій. *LTO* елементи, завдяки своїй хімічній структурі, взагалі мають мінімальні ризики здуття та теплових подій, що робить їх придатними для застосувань із жорсткими вимогами до безпеки.

Вплив на цифрові системи

Аналіз сучасних публікацій також вказує на те, що нестабільний профіль напруги, викликаний неправильно підібраним акумулятором, може мати критичний вплив на цифрові компоненти: контролери живлення, оперативну пам'ять, накопичувачі даних (*SSD*). У роботах, присвячених цифровим застосуванням, підкреслюється, що коливання напруги живлення можуть спричинити системні збої, особливо у режимі реального часу.

Техніко-економічний баланс

Окрім чисто технічних показників, розглядається також й економічний аспект. *LiFePO₄* та *LTO* показують переваги в довгострокових проєктах за рахунок тривалішого ресурсу та підвищеної безпеки, незважаючи на вищу початкову вартість.

Постановка завдання. Метою даної статті є проведення порівняльного аналізу основних характеристик літєвих акумуляторів типів *Li-ion*, *LiFePO₄* та *LTO*, а також визначення їх придатності для використання у цифрових електронних пристроях з урахуванням параметрів енергетичної щільності, циклічного ресурсу, безпеки та експлуатаційної стабільності.

Дослідження спрямоване на виявлення переваг і недоліків кожної технології та формування рекомендацій щодо раціонального вибору типу акумуляторної батареї залежно від вимог конкретних електронних систем та умов їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. В умовах стрімкого розвитку портативної та вбудованої цифрової електроніки ключовим елементом, що визначає продуктивність, надійність та довговічність пристрою, є джерело енергії – акумулятор. Серед широкого спектра акумуляторних технологій, літій-іонні (*Li-ion*), літій-залізо-фосфатні (*LiFePO₄*) та літій-титанатні (*LTO*) батареї є найпоширенішими через їх високі питомі характеристики енергії та гнучкість у застосуваннях. Проте кожен із цих типів має ряд специфічних фізико-хімічних властивостей, що безпосередньо впливають на експлуатаційні показники: енергетичну щільність, ресурс циклів, теплову та електричну стабільність.

У пристроях де висока циклічність заряду/розряду традиційні *Li-ion* елементи характеризуються прискореною деградацією елементів живлення, а саме зниженням ємності та зростанням внутрішнього опору вже після 500 – 700 циклів, що зазвичай відповідає 1 – 2 рокам експлуатації. Натомість *LTO* - елементи здатні витримувати від 10000 до 30000 циклів без суттєвої втрати характеристик, що еквівалентно 5 – 10 рокам роботи пристрою.

Класичні *Li-ion* акумулятори (*NMC/NCA*)

Традиційні літій-іонні акумулятори забезпечують у середньому від 500 до 1000 повних циклів заряд/розряд допоки їх залишкова ємність зменшиться приблизно до 80% від початкового номіналу [3]. Саме цей поріг зазвичай приймається як кінець ефективного експлуатаційного ресурсу в більшості застосувань.

Процеси деградації мають комплексний характер і включають:

- поступове зростання внутрішнього опору через старіння електродів;
- розростання міжфазного шару твердого електrolіту (*SEI*) на поверхні графітового анода;
- втрату активного матеріалу електродів (*LAM*, *Loss of Active Material*);

- структурні та хімічні зміни електроліту;
- мікротріщини в катодних частинках під дією циклічних навантажень.

Фізико-хімічна основа роботи цих АКБ – інтеркаляція літію між шарами графітового анода та оксидними катодами, зокрема *нікелю-марганцю-кобальту (NMC, Nickel Manganese Cobalt)* та *нікелю-кобальту-алюмінію (NCA, Nickel Cobalt Aluminum)*. Така конфігурація забезпечує високу гравіметричну щільність енергії – приблизно 150 – 300 (в деяких випадках) Вт·год/кг, що робить їх оптимальними для портативної електроніки та навіть застосуванню в електротранспорті (Tesla, Nisan). Однак висока енергоємність супроводжується підвищеною чутливістю до температури, механічних пошкоджень, глибини розряду та швидкості заряджання.

Літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO₄, LFP)

Акумулятори на основі LFP відомі своєю винятковою довговічністю [4]. Їх ресурс становить від 2000 до 7000 циклів, що робить їх надзвичайно привабливими для систем стаціонарного накопичення енергії, резервного живлення та автономних сонячних установок.

Основні механізми старіння включають:

- втрату запасу циклічного літію (*LLI – Loss of Lithium Inventory*);
- часткову деградацію активної маси електродів;
- повільне зростання внутрішнього опору.

Катод LFP має олівінову кристалічну структуру, яка характеризується високою структурною стабільністю та термостійкістю. У поєднанні з графітовим анодом це формує електрохімічно надійну систему з низькою схильністю до теплового розгону [5].

Переваги у даного типу АКБ наступні:

- висока термостабільність;
- відносно рівномірна (часто майже лінійна) деградація;
- більш безпечні в експлуатації ніж класичні Li-ion АКБ.

Головним недоліком є нижча щільність енергії (90 – 160 Вт·год/кг) у порівнянні з класичними NMC/NCA системами, що обмежує їх використання там, де критично важлива маса або габарити.

Літій-титан-оксидний акумулятор (Lithium Titanate, LTO)

Акумулятори з анодом на основі літій-титанату демонструють найвищий цикл життя серед комерційних Li-ion технологій – від 10000 до 30000 циклів заряду/розряду, а за оптимальних умов експлуатації можливо навіть більше [6].

Ключова причина такої довговічності – так званий ефект «Zero-Strain», тобто відсутність суттєвих об'ємних змін у кристалічній структурі анода під час інтеркаляції та деінтеркаляції літію. Це мінімізує утворення механічного напруження, утворенню мікротріщин на катоді та деградацію структури електрода.

У LTO акумуляторів анод виконаний з літій-титанату, а катод в більшості випадків на основі NMC або інших оксидних матеріалів.

Через вищий потенціал анода формується нижча робоча напруга комірки, що зумовлює меншу щільність енергії – від 70 до 110 Вт·год/кг.

Проте, це компенсується наступним :

- високою стабільністю циклів заряд/розряд;
- високою швидкістю заряджання;
- широким температурним діапазоном роботи (від -40°C та до +55°C);
- підвищеною безпекою.

Порівняльна характеристика всіх трьох видів АКБ наведена в табл. 1

Таблиця 1

Порівняльна характеристика трьох видів АКБ

Параметр	Li-ion	LiFePO ₄	LTO
Щільність енергії, Вт·год/кг	150 – 300	90 – 160	70 – 110
Номінальна напруга, В	3.6 – 3.7	3.2 – 3.3	2.3 – 2.4
Кількість циклів заряд/розряд	500 – 1000	2000 – 7000	10000 – 30000
Оптимальна робоча темп., °C	20 / 25	20 / 25	0 / 40
Робочий діапазон темп., °C	-20°C/+60	-20°C/+60	-40°C/+55

Неправильний вибір типу елемента живлення може призвести до суттєвих негативних наслідків, серед яких – зниження ресурсу пристрою, втрата працездатності в критичних режимах, підвищені ризики виходу з ладу контролерів живлення або накопичувачів даних, а також загроза термічних подій (перегрів, здуття, термічна нестабільність) [7]. У цифрових системах, що вимагають стабільного профілю напруги, невідповідність характеристик АКБ може стати причиною збоїв у роботі мікроконтролерів, а у медичних чи промислових застосуваннях – критичних відмов.

Отже, виникає потреба в систематичному порівнянні Li-ion, LiFePO₄ та LTO технологій з погляду їх електрохімічних характеристик, теплової безпеки, циклічного ресурсу та впливу на роботу цифрових електронних систем. Саме таке порівняння дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальний тип батареї під конкретні технічні вимоги, умов експлуатації та експлуатаційні обмеження.

Внутрішній опір АКБ

Для контролю за нагрівом, потужністю та ефективністю батареї вимірюють її внутрішній опір. Він складається з кількох компонентів: омичної, поляризаційної та дифузійної частин.

Оцінка внутрішнього опору – це елемент тестування та моніторингу комірки батареї в дослідженнях і промислових застосуваннях.

DC-імпульсний метод (DCIR, Direct Current Internal Resistance) є одним із найбільш поширених способів оцінювання внутрішнього опору комірки АКБ [8]. Метод широко використовується в лабораторних дослідженнях, системах керування BMS (Battery Management System), а також у виробничому тестуванні акумуляторів. Його головна мета – визначити, як батарея реагує на короткочасне навантаження постійним струмом і як це впливає на падіння напруги.

Принцип методу полягає у подачі короткого імпульсу постійного струму на акумулятор та вимірюванні миттєвої зміни напруги на його клеммах. При цьому внутрішній опір розраховується на основі закону Ома.

Математична формула має такий вигляд:

$$R_{DC} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

де:

R_{DC} – внутрішній опір акумулятора (DCIR);

ΔV – зміна напруги під час імпульсу струму;

ΔI – величина прикладеного імпульсу струму;

При подачі імпульсу струму відбувається миттєве падіння напруги, яке зумовлене сумарним внутрішнім опором батареї. В таблиці 2 наведені дані для різних типів літєвих АКБ, що характеризують діапазони внутрішнього опору.

Таблиця 2

Діапазони внутрішнього опору літєвих АКБ

Тип акумулятора	DCIR (комірка)
Li-ion (NMC/NCA)	20 – 50 МОм
LiFePO4	30 – 70 МОм
LTO	5 – 20 МОм

З часом експлуатації опір АКБ зростає, що є одним з основних індикаторів деградації батареї. Він суттєво залежить від таких параметрів як температура навколишнього середовища, ступеню заряду (SOC, State of Charge), та станом самої батареї. Наприклад, при зниженні температури різко зростає опір через уповільнення дифузії літію.

Перевагами DCIR є швидкість та простота вимірювання, можливість використання в BMS.

Недоліками даного методу є залежність вимірювання від температури навколишнього середовища та SOC, не має можливості розділити

омічний опір від електрохімічного, менш інформативний, якщо порівнювати з імпедансною спектроскопією (EIS).

Імпедансні вимірювання, або метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy), є високоточним інструментом дослідження електрохімічних процесів у акумуляторах [9]. На відміну від DC-методів, що визначають інтегральний внутрішній опір, EIS дозволяє розділити різні складові опору та дослідити кінетику електрохімічних реакцій, дифузію іонів та міжфазні явища.

Метод широко застосовується у наукових дослідженнях для оцінки деградації літій-іонних АКБ, аналізу стану електродів і оптимізації матеріалів.

Суть методу полягає у подачі на акумулятор малого гармонічного сигналу змінного струму або напруги (зазвичай 5 – 10 мВ) у широкому діапазоні частот – від кількох мГц до сотень кГц.

Внаслідок цього на клеммах батареї виникає відповідний змінний сигнал напруги або струму, який має амплітуду та фазовий зсув відносно прикладеного сигналу. На основі цих параметрів визначається комплексний електрохімічний імпеданс:

$$Z_{(\omega)} = \frac{V_{(\omega)}}{I_{(\omega)}}$$

де:

$Z_{(\omega)}$ – комплексний імпеданс;

$V_{(\omega)}$ – амплітуда напруги;

$I_{(\omega)}$ – амплітуда струму;

ω – кутова частота сигналу.

Комплексний імпеданс складається з реальної та уявної частини:

$$Z = Z' + jZ''$$

де:

Z' – активна (омічна) складова;

Z'' – реактивна складова, пов'язана з ємнісними та дифузійними процесами.

В таблиці 3, наведені головні переваги EIS з можливістю розділення електрохімічних процесів за характерними частотами.

Таблиця 3

Електрохімічні процеси за характерними частотами

Частотна область	Основні процеси
Високі частоти (від 10 до 100 кГц)	Омічний опір електроліту, контактів та на клеммах АКБ
Середні частоти (1 Гц – 10 кГц)	Перехід заряду на межі електрод-електроліт
Низькі частоти (мГц – 1 Гц)	Дифузія іонів літію в активному матеріалі

Таким чином *EIS* дозволяє окремо дослідити кінетику реакцій та транспорт іонів, що неможливо зробити за допомогою *DC-методів*.

Перевагами *EIS* вимірювання є можливість розділення електрохімічних процесів, висока чутливість до ранніх стадій деградації АКБ, отримання реальної інформації про кінетику реакцій.

Разом з тим метод має певні обмеження та недоліки, а саме складність експериментального обладнання, тривалість вимірювання (на низьких частотах), складність інтерпретації результатів та необхідність використання математичних моделей.

Метод *EIS* використовується для дослідження механізмів деградації акумуляторів, оптимізації катодних і анодних матеріалів, оцінки стану здоров'я батареї (*SoH, State of Health*), аналізу ефективності *SEI-шару*;

АС-імпедансна спектроскопія є одним із найінформативніших методів аналізу літій-іонних АКБ. Вона дозволяє не лише визначити внутрішній опір, але й ідентифікувати окремі електрохімічні процеси, що відбуваються всередині комірки. Саме тому цей метод широко використовується у дослідженнях, розробці нових акумуляторних матеріалів та діагностиці деградації АКБ.

Висновки. В умовах нестабільного електропостачання, сезонних температурних коливань та підвищених вимог до надійності енергетичної інфраструктури виникає необхідність створення ефективних систем накопичення енергії. Одним із ключових елементів таких систем є акумуляторні батареї, від вибору яких залежать енергетична ефективність, безпека, довговічність та вартість експлуатації зарядної станції.

Кожна з представлених у статті технологій має власні технічні характеристики та експлуатаційні особливості, що визначають доцільність їх використання в різних типах енергетичних систем.

Під час проектування зарядної станції необхідно брати до уваги низку чинників, що безпосередньо впливають на ефективність роботи системи накопичення енергії.

Клімат України вирізняється значними сезонними коливаннями температури: приблизно від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у зимовий період до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ у літній. У таких умовах важливими параметрами акумуляторних систем є стабільність роботи за низьких температур та здатність батареї ефективно заряджатися в холодному середовищі. Акумулятори типу *LTO* демонструють найкращу продуктивність при низьких температурах, тоді як *LiFePO4* і традиційні *Li-ion* батареї в подібних умовах часто потребують застосування систем підігріву.

Для систем резервного електроживлення та зарядних станцій одним із ключових параметрів є кількість циклів зарядання та розрядання, яка безпосередньо визначає термін експлуатації батареї. За середніми показниками найбільшу

довговічність демонструють *LTO* та *LiFePO4* акумулятори. Хоча класичні *Li-ion* батареї мають вищу енергетичну щільність, їхній ресурс зазвичай менший, що робить їх менш придатними для систем із інтенсивним циклічним навантаженням.

Ще одним важливим фактором є швидкість накопичення енергії, особливо в умовах, коли електроенергія подається за графіком або має часові обмеження. Якщо враховувати типовий коефіцієнт швидкості зарядження та розрядження (*C-rate*), то *Li-ion* акумулятори зазвичай заряджаються повільніше (приблизно 1-2C), тоді як *LTO* можуть працювати з набагато більшими значеннями цього показника (до 10C), що забезпечує значно швидший процес зарядження. Акумулятори *LiFePO4* займають проміжну позицію з типовими значеннями близько 3-4C.

Використання *Li-ion* акумуляторів доцільне у випадках, коли визначальними є компактність і мала маса системи. Завдяки високій енергетичній щільності такі батареї широко застосовуються у портативних енергетичних пристроях (*Power Bank*), мобільній електроніці (смартфони, планшети, фітнес-браслети) та переносних енергетичних станціях.

Натомість *LiFePO4* акумулятори вважаються найбільш універсальним рішенням для стаціонарних систем накопичення енергії. Вони поєднують високий рівень безпеки, значний ресурс роботи та відносно помірну вартість, що робить їх ефективним вибором для домашніх систем резервного живлення, зарядних станцій електротранспорту та телекомунікаційної інфраструктури. Найбільш надійною, але і в той же час дорогою є технологія *LTO*. Маючи безліч переваг, застосування її в портативній електроніці не є доцільним через габарити, вагу та ціну. Але вона чудово себе зарекомендує в швидких зарядних станціях, в військово-промислому комплексі, системах критичного значення. Вона не боїться різкого перепаду температур та має великий ресурс циклів заряд/розряд.

Аналіз технічних характеристик літєвих акумуляторних технологій показує, що для побудови зарядних станцій в умовах України найбільш доцільним є використання *LiFePO4-акумуляторів* як основного джерела накопичення енергії, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між безпекою, ресурсом, вартістю та стабільністю роботи.

Для систем із високими вимогами до швидкості зарядження та експлуатації в холодному кліматі доцільно використовувати *LTO-акумулятори*, зокрема як буферні накопичувачі.

Li-ion акумулятори залишаються ефективним рішенням для мобільних та компактних енергетичних систем, де важливим є співвідношення маси та енергетичної щільності.

Список літератури:

1. «Що необхідно знати про літій-іонні акумулятори?» сайт URL: https://bosch-tech.net.ua/uk/blog/9_lithium-batteries-uk
2. Михайло Золенко «LiFePO₄: відповіді на найчастіші запитання» сайт URL: <https://ek.ua/ua/post/6308/1157-faqs-about-lifepo4/>
3. В. Д. Латвинський, Р. В. Багач «Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах» сайт URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-1-58-64.pdf>
4. Xiaoning Zhang, Pengfei Sun, Shixue Wang «Experimental Study of the Degradation Characteristics of LiFePO₄ and LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ Batteries during Overcharging at Low Temperatures» сайт URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2786>
5. Як правильно заряджати LiFePO₄ сайт URL: https://www.sea.com.ua/ua/rezervne-zhyvlennia/news/ak-pravilno-zaradzatilifepo4/?srsltid=AfmBOoqTxdUuGzrgmK_afBtPiSqt0jBmfGkLyBCtWziIirvT8_IHLKV_
6. Christian M. Julien, Alain Mauger «Fabrication of Li₄Ti₅O₁₂ (LTO) as Anode Material for Li-Ion Batteries» сайт URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/3/310>
7. BTRY.ENERGY «Повний гайд Li-ion vs LiPo: що за чим, де і чому» сайт URL: https://btry.energy/post/li-ion-vs-lipo-povnyy-gayd-scho-za-chym-de-i-chomu_bc3cdce3?srsltid=AfmBOop0xOMQVzFOagcl5jX8W5Y7wLfDWDipLkyKQ3w6pECiI2MnPM-
8. «What is DCIR(Direct Current Internal Resistance) Testing?» сайт URL: <https://www.neware.net/news/dcir-direct-current-internal-resistance-testing-principles-and-methods/230/132.html>
9. З. Д. Ковалюк, І. В. Мінтянський, П. І. Савицький «Електрохімічна імпедансна спектроскопія джерел струму Li/Cu₄Bi₆S₁₁» сайт URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/65f50cd7-4449-49fc-95ae-9e85fb1866a4/content>

**Zymovchenko V.O. OPTIMAL CHOICE FOR STATIONARY ENERGY STORAGE:
A COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM BATTERIES**

Lithium batteries form the foundation of modern digital electronics and are widely used in applications ranging from portable electronic devices to electric vehicles. This paper compares three widely used battery types: lithium-ion (Li-ion), lithium iron phosphate (LiFePO₄), and lithium titanate (LTO). The analysis is based on several key parameters, including safety, cycle life, energy density, operating temperature, charge/discharge rate, cost, and typical application areas. The importance of selecting an appropriate power source for various digital devices is also considered, along with the impact of battery choice on system performance and the risks associated with improper selection.

Selecting an appropriate power source is critical for ensuring system efficiency, safety, and economic feasibility. A rechargeable battery (hereafter referred to as a battery pack or battery) is the core component of any modern digital device, determining its autonomy, operational stability, and service life. An incorrect choice may lead to inefficient resource utilization and increased costs due to frequent replacement in case of failure. In devices that require stable voltage and current, it is necessary to consider load conditions, operating temperature ranges, and the number of charge–discharge cycles. The key requirement is a proper analysis of the technical specifications of the device in which the battery will be used. For example, in unmanned aerial vehicles (UAVs) a high discharge rate is essential, whereas in solar energy systems the cycle life of the battery is a critical parameter.

Microcontrollers, sensors, and displays are sensitive to power supply parameters. Instability or fluctuations in voltage may cause malfunctions, errors, or even device resets. Improper battery selection may reduce overall system efficiency. In microcontroller-based systems (such as Arduino or Raspberry Pi), stable power supply is particularly important because it prevents data loss during writing operations to flash memory or MicroSD storage.

An unsuitable battery choice may also introduce significant operational risks. Li-ion cells, when mechanically damaged or overcharged, may swell and lose hermetic sealing, potentially releasing lithium compounds that can damage the device circuitry or even cause ignition. In contrast, LiFePO₄ and LTO batteries are characterized by higher safety levels and are better adapted to operation under elevated temperature conditions.

The high cost of LTO cells makes them economically impractical for the mass consumer electronics market, whereas the use of low-cost Li-ion solutions in portable or industrial applications may lead to increased operational expenses due to frequent replacement and maintenance.

A mismatch between the battery type and operating conditions accelerates battery degradation and increases the volume of spent cells, complicating recycling processes and raising the risk of lithium and heavy metals entering the environment.

Proper battery selection ensures optimal operational characteristics, minimizes the risk of failures, and improves the overall reliability of the system.

Keywords: energy, lithium batteries, battery pack, Li-ion, LiFePO₄, LTO, power supply, mobility.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026