

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

ПІЗЬ МИРОСЛАВ ІВАНОВИЧ

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.9
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

«Дослідження підходів до реалізації систем енергоменджменту для установок
акумуляції електроенергії (BMS) потужністю 5 кВт для приватних
домогосподарств та невеликих підприємств»

(назва роботи)

«Енергетичний менеджмент»

(назва освітньої програми)

141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

М. І. Пізь

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник РАЙТЕР Петро Миколайович, д. т. н.,
професор

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

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

К. Т. Н., доцент

(посада)

(підпис) (дата)

В. С. ЦИХ

(ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ – 2026

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 магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

к. т. н., доцент Віталій ЦИХ

«__» _____ 20 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Пізю Мирославу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження підходів до реалізації систем енергоменеджменту для установок акумулювання електроенергії (BMS) потужністю 5 кВт для приватних домогосподарств та невеликих підприємств

керівник роботи Райтер Петро Миколайович, д. т. н., професор

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» листопада 2025 р. №719/7

2. Термін подання студентом роботи: 15 січня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: потужність установки акумулювання енергії 5 кВт, обсяг енергії 10-20 кВт год, режим споживання енергії та навантаження установки для типового домогосподарства та підприємства малого бізнесу

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

Розділ 1. Контекст та базова архітектура системи накопичення енергії на акумуляторах для розподіленої генерації

Розділ 2. Аналіз ефективності використання акумуляторів різних типів для різних навантажень для систем акумулювання енергії потужністю 5 кВт приватних господарств та невеликих підприємств

Розділ 3. Оптимальна архітектура системи накопичення енергії з СЕМ потужністю 5 кВт для житлової мікромережі або мікромережі невеликого підприємства

Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) та окупність інвестицій

Висновки

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>Нормоконтролер</i>	<i>доц. Яворський А. В.</i>		

7. Дата видачі завдання 14.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми магістерської роботи та обґрунтування її актуальності	до 14.11.25	Виконано
2	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження	15.11.25	Виконано
3	Складання плану магістерської роботи	16.11.25	Виконано
4	Пошук і відбір джерел відповідно до теми роботи, укладання переліку джерел	17.11.25 – 18.11.25	Виконано
5	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:	19.11.25 – 12.01.26	Виконано
	5.1 Розділ 1	19.11.25 – 05.12.25	Виконано
	5.2 Розділ 2	06.11.25 – 22.12.25	Виконано
	5.3 Розділ 3	23.12.25 – 06.12.25	Виконано
	5.4 Розділ 4	07.01.26 – 12.01.26	Виконано
6	Написання вступної частини магістерської роботи	13.01.26	Виконано
7	Підготовка графічних матеріалів та елементів унаочнення	13.01.26	Виконано
8	Формулювання висновків до магістерської роботи	14.01.26	Виконано
9	Оформлення остаточного переліку використаних джерел та додатків	14.01.26	Виконано
10	Оформлення магістерської роботи	15.01.26	Виконано
11	Внесення коректив та остаточне редагування	15.01.26	Виконано
12	Реєстрація магістерської роботи на кафедрі	16.01.26	Виконано
13	Захист магістерської роботи	22.01.26	Виконано

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пізь М.І. Дослідження підходів до реалізації систем енергоменджменту для установок акумулювання електроенергії (BMS) потужністю 5 кВт для приватних домогосподарств та невеликих підприємств.

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент» другого рівня вищої освіти. ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ. 2026.

Робота присвячена дослідженню підходів до реалізації систем енергетичного менеджменту для установок акумулювання електроенергії потужністю 5 кВт для приватних домогосподарств та невеликих підприємств.

У межах роботи висвітлено питання призначення, функцій та базової архітектури системи накопичення енергії на акумуляторах для розподіленої генерації; виконано аналіз ефективності використання акумуляторів різних типів для різних навантажень для систем акумулювання енергії потужністю 5 кВт приватних господарств та невеликих підприємств; досліджено переваги і недоліки акумуляторів виконаних за різними технологіями; запропоновано методику та матрицю вибору акумулятора під конкретну систему накопичення енергії; виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) та окупність інвестицій.

Отримані результати дозволяють розробити та обґрунтувати оптимальну архітектуру системи накопичення енергії з СЕМ потужністю 5 кВт для житлової електромікромережі або мікромережі невеликого підприємства.

Ключові слова: АКУМУЛЯТОР, СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ, УСТАНОВКА АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ДОМОГОСПОДАРСТВО, ПАРАМЕТРИ АКУМУЛЯТОРІВ, РЕЖИМИ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРІВ, МІКРОМЕРЕЖІ.

ABSTRACT

Piz M.I. Research on approaches to the implementation of energy management systems for 5 kW electricity storage installations (BMS) for private households and small businesses

Master's thesis in the specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering, Electromechanics" of the educational and professional program "Energy Management" of the second level of higher education. IFNTUOG, Ivano-Frankivsk. 2026.

The thesis is devoted to the study of approaches to the implementation of energy management systems for 5 kW electricity storage installations for private households and small businesses.

The work highlights the purpose, functions and basic architecture of battery energy storage systems for distributed generation; analyses the effectiveness of using different types of batteries for different loads for 5 kW energy storage systems in private households and small businesses; the advantages and disadvantages of batteries manufactured using different technologies are investigated; a methodology and matrix for selecting a battery for a specific energy storage system are proposed; a technical and economic justification for the feasibility of using an energy management system (EMS) and the return on investment are provided.

The results obtained allow the development and justification of the optimal architecture of an energy storage system with an EMS with a capacity of 5 kW for a residential microgrid or the microgrid of a small enterprise.

Keywords: BATTERY, ENERGY MANAGEMENT SYSTEM, ELECTRICITY STORAGE SYSTEM, HOUSEHOLD, BATTERY PARAMETERS, BATTERY CHARGE CONTROL MODES, MICROGRIDS

ЗМІСТ

	Ст.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. КОНТЕКСТ ТА БАЗОВА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА АКУМУЛЯТОРАХ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	12
1.1 Визначення та роль систем енергетичного менеджменту (EMS) у децентралізованій енергосистемі.....	12
1.2 Основні підсистеми BESS та ієрархія керування	12
1.3 Порівняльний аналіз топологій	13
1.4 Функціональне призначення та бізнес-кейси EMS	15
1.5 Передові алгоритми та моделі керування EMS	17
1.6 Технічна реалізація: апаратне забезпечення та протоколи зв'язку	19
1.7 Нормативно-правове регулювання.....	21
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ РІЗНИХ ТИПІВ ДЛЯ РІЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ПОТУЖНІСТЮ 5 КВТ ПРИВАТНИХ ГОСПОДАРСТВ ТА НЕВЕЛИКИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	24
2.1 Порівняльна продуктивність акумуляторних технологій.....	29
2.2 Розроблення матриці рішень для вибору типу акумулятора щодо його ефективності застосування в системі накопичення електроенергії.....	42
2.3 Ризики, безпека та міркування щодо відповідності вимогам.....	46
2.4 Рекомендації для вибору типу акумуляторів установки накопичення енергії.....	50
РОЗДІЛ 3. ОПТИМАЛЬНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ З СЕМ ПОТУЖНІСТЮ 5 КВТ ДЛЯ ЖИТЛОВОЇ МІКРОМЕРЕЖІ АБО МІКРОМЕРЕЖІ НЕВЕЛОКОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	60
3.1 Архітектура та компоненти системи.....	61
3.2 Опис алгоритму роботи	65

3.3	Режими керування.....	69	
3.4	Пріоритетність навантаження та зменшення пікових навантажень....	69	
3.5	Захист акумулятора та оптимізація життєвого циклу.....	72	
3.6	Режим власного споживання, прив'язаного до мережі.....	78	
3.7	Резервний (острівний) режим.....	79	
3.8	Функції підтримки мережі.....	81	
3.9	Тарифи за часом використання (TOU).....	81	
3.10	Відповідність нормативним вимогам.....	82	
3.11	Кібербезпека та конфіденційність даних.....	83	
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ			
ЗАСТОСУВАННЯ EMS ТА ОКУПНІСТЬ ІНВЕСТИЦІЙ.....			91
4.1	Методологія оцінки витрат та вигод.....	91	
4.2	Вплив тарифної структури на стратегію СЕМ.....	91	
4.3	Аналіз життєвого циклу та деградація батареї.....	92	
4.4	Приклади розрахунків: термін окупності та економічна ефективність системи акумуляторних батарей потужністю 5 кВт/10 кВт·год.....	92	
ВИСНОВКИ.....			101
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....			104

ВСТУП

Актуальність дослідження систем енергоменджменту для установок акумулювання електроенергії потужністю 5 кВт зумовлена поєднанням глобальних трендів в енергетиці, специфічних викликів українського сьогодення та економічних факторів. Потужність 5 кВт є знаковою, оскільки це типовий піковий рівень споживання для середньостатистичного домогосподарства або малого офісу. Це переводить дослідження з площини промислових гігантів у сферу масового споживання.

Ось основними факторами, що формують актуальність цієї теми, це проблеми енергетичної безпеки, автономності енергоспоживання та децентралізації генерування енергії (в контексті сучасної ситуації в Україні). В умовах нестабільності централізованого енергопостачання, спричиненого атаками на енергетичну інфраструктуру, наявність власної системи резервного живлення стає критичною необхідністю.

Така функція СЕМ як керування простим "зарядженням від мережі" вже є недостатньою. Система енергетичного менеджменту має розумно керувати резервом: наприклад, не розряджати батарею нижче критичного рівня в години ймовірних відключень або пріоритетно жити лише критичні навантаження (котел, холодильник, зв'язок). Системи акумулювання енергії на 5 кВт часто встановлюються в парі з домашніми сонячними електростанціями (СЕС). Проблема СЕС — невідповідність графіків генерації (максимум вдень) та споживання (ранок/вечір). Тому СЕМ має вирішувати, куди спрямувати надлишок енергії: продати в мережу, зарядити акумулятор чи увімкнути бойлер. Це підвищує коефіцієнт власного споживання та зменшує залежність від зовнішніх мереж. Зростання тарифів на електроенергію та перехід від "Зеленого тарифу" до механізму Net Billing (чистий продаж) докорінно змінюють економіку домашніх СЕС. Зокрема за умов застосування арбітражу енергії СЕМ може керувати зарядженням акумулятора вночі за низьким тарифом і розрядженням його в пікові години, коли електроенергія найдорожча. Для

забезпечення окупності установки без розумного керування (СЕМ) дорога літєва батарея може використовуватися неефективно, що значно подовжує термін її окупності. Установки на 5 кВт зазвичай використовують літій-іонні (Li-ion) або літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) елементи, які є дороговартісними та чутливими до режимів експлуатації. На відміну від простого контролера заряду, СЕМ планує цикли заряду-розряду так, щоб мінімізувати деградацію хімії батареї (наприклад, уникати глибоких розрядів без необхідності або перегріву при швидкому заряді).

Світ рухається до концепції розумних мереж, де кожен споживач може бути й активним учасником ринку. Масова інтеграція 5-кіловатних установок створює ефект "віртуальної електростанції". Дослідження підходів до керування такими розподіленими системами дозволяє знизити навантаження на трансформатори та лінії електропередач у пікові години.

Метою дослідження є розроблення підходів до реалізації систем енергоменджменту для установок акумуляування електроенергії потужністю 5 кВт для приватних домогосподарств та невеликих підприємств.

Поставлена мета передбачає розв'язання таких **завдань**:

- висвітлити поняття призначення, функцій та базової архітектури системи накопичення енергії на акумуляторах для розподіленої генерації; охарактеризувати проблематику застосування таких систем для домогосподарств та організацій малого бізнесу;
- виконати аналіз ефективності використання акумуляторів різних типів для різних навантажень для систем акумуляування енергії потужністю 5 кВт приватних господарств та невеликих підприємств; дослідити переваги і недоліки акумуляторів виконаних за різними технологіями; запропонувати методику та матрицю вибору акумулятора під конкретну систему накопичення енергії;
- розробити та обґрунтувати оптимальну архітектуру системи накопичення енергії з СЕМ потужністю 5 кВт для житлової мікромережі або мікромережі невеликого підприємства

- виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) та окупність інвестицій

Предмет дослідження – система енергетичного менеджменту для установок акумуляування електроенергії (потужністю 5 кВт) для приватних домогосподарств та невеликих підприємств.

Об’єкт дослідження – процес управління акумуляуванням електричної енергії в електромікромережах приватних домогосподарств та невеликих підприємств

У роботі застосовано комплекс **методів**, спрямованих на детальне опрацювання нормативної бази, технічної інформації та перевірку отриманих висновків на розрахункових прикладах. Базовим є метод аналізу й класифікації текстової інформації, даних баз даних, таблиць і наявних напрацювань, який дає змогу систематизувати вимоги до СЕМ, визначити логіку подання параметрів і встановити їх значення. Метод пошуку інформації використано для виявлення релевантних даних об’єкту і предмету досліджень. Для кількісної перевірки та відтворення розрахункових процедур використано метод математичного моделювання з застосуванням середовища На етапі узагальнення результатів застосовано метод порівняння, який забезпечує зіставлення даних взятих з літератури і проміжних розрахункових величин, а також дає змогу обґрунтувати результати розрахунків.

Наукова новизна роботи:

- Удосконалено метод оцінки ефективності використання акумуляторів різних типів для різних навантажень для систем акумуляування енергії потужністю 5 кВт, що дозволило врахувати переваги і недоліки акумуляторів виконаних за різними технологіями та запропонувати методику та матрицю вибору акумулятора під конкретну систему накопичення енергії

- Удосконалено методику визначення Оптимальної архітектури системи накопичення енергії з СЕМ потужністю 5 кВт, що дозволяє скомпонувати систему накопичення енергії та задати алгоритм роботи для системи енергетичного менеджменту для житлової мікромережі або мікромережі невеликого підприємства

– Набули подальшого розвитку методичні підходи до обґрунтування доцільності застосування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) та окупність інвестицій.

Практичне значення результатів полягає в тому, що з використанням розроблених методів і методик можна обґрунтовано вибрати відповідний тип акумуляторної батареї для системи накопичення енергії з СЕМ потужністю 5 кВт для житлової мікромережі або мікромережі невеликого підприємства, виходячи з особливостей навантажень та режиму функціонування вказаних об'єктів. Це дає змогу сформувавши оптимальну архітектуру системи накопичення енергії з СЕМ та розробити алгоритм її функціонування. Отримані результати дозволяють аргументовано оцінити доцільність застосування системи енергетичного менеджменту (СЕМ) та окупність інвестицій у практиці енергоменеджменту й проектування.

Структура та обсяг роботи визначені її метою й завданнями. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 110 сторінок, з яких виклад основного матеріалу – 110 сторінок. В межах магістерської роботи подано 5 рисунків, 4 таблиці. Список використаної літератури містить 74 позиції, з яких 68 – іноземною мовою.

РОЗДІЛ 1

КОНТЕКСТ ТА БАЗОВА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА АКУМУЛЯТОРАХ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

1.1 Визначення та роль систем енергетичного менеджменту (EMS) у децентралізованій енергосистемі

Система накопичення енергії на акумуляторах (BESS) потужністю 5 кВт є типовим рішенням, що знаходиться на межі між житловим сектором (часто описується як інсталяція потужністю 5 кВт з енергоємністю близько 20 кВт*год) та сегментом малого комерційного та промислового використання (C&I) [1]. У контексті децентралізованої енергетики BESS функціонує не лише як джерело резервного живлення, але і як важливий актив для стабілізації енергосистеми. BESS є найшвидшим джерелом диспетчеризації потужності у мережах, здатним переходити з режиму очікування для забезпечення повної потужності менш ніж за секунду, що є критичним для управління непередбачуваними подіями в мережі або мікромережі.[2]

Центральним елементом, який визначає стратегічне та економічне функціонування всієї установки BESS, є Система енергоменеджменту (EMS) [3]. EMS виступає як інтелектуальний "мозок" системи, відповідальний за прийняття стратегічних рішень щодо того, коли заряджати або розряджати акумулятор, і з якою швидкістю. Ці рішення базуються на складному аналізі внутрішніх даних, таких як стан заряду акумуляторів (SoC) та стан здоров'я (SoH) батареї, а також на зовнішніх сигналах, включаючи тарифи на електроенергію, прогнози погоди (для систем із сонячною генерацією) та команди від оператора мережі [4].

1.2. Основні підсистеми BESS та ієрархія керування

Реалізація функціоналу EMS залежить від безперебійної взаємодії з трьома основними підсистемами BESS:

– Батарейний модуль та система управління акумулятором BMS (Battery Management System): Акумуляторний блок, сформований з літєвих елементів, розташованих у модулях та стійках [4], знаходиться під безпосереднім контролем BMS. BMS є нижчим, захисним рівнем керування, який здійснює моніторинг критично важливих параметрів — напруги, струму, температури елементів, а також розраховує SoC та SoH [5]. Безпека є першочерговою і забезпечується дотриманням стандартів на рівні елементів (UL1642), модулів (UL1973) та стійок (UL9540A) [4].

– Система перетворення потужності (PCS)/гібридний інвертор: Це двонаправлений пристрій, який виконує фізичне перетворення потужності. Оскільки батареї зберігають і видають постійний струм (DC), а більшість навантажень використовують змінний струм (AC), PCS перетворює DC на AC для живлення навантажень або мережі, і навпаки — AC на DC для заряджання батареї [4]. PCS діє відповідно до тактичних команд EMS, використовуючи дані про стан батареї (SoC, глибина розряду (DoD)) для управління циклами [4]

– Система енергетичного менеджменту EMS (Energy Management System): Це найвищий стратегічний рівень. Він інтегрує дані від BMS, PCS та зовнішніх пристроїв (електричні лічильники, SCADA), формулює стратегію роботи (наприклад, Peak Shaving або Time-of-Use optimization) і відправляє команди виконання потужності PCS [4]. У компактних 5 кВт системах часто спостерігається злиття функціоналу: єдиний контролер може функціонувати як BESS-контролер та EMS, реалізуючи стратегії без потреби у сторонньому програмному забезпеченні [3]. Це спрощення архітектури для малих систем вимагає, щоб EMS мала прямий доступ до показників SoH/SoC, забезпечуючи, щоб економічна оптимізація не порушувала обмеження життєвого циклу батареї [7]

1.3. Порівняльний аналіз топологій

Вибір архітектури підключення BESS впливає на загальну ефективність системи та складність керування EMS:

–AC-з'єднана (AC-Coupled): У цій топології BESS підключається до шини змінного струму (AC-шини) після інвертора PV-системи. Акумулятор потребує власного спеціалізованого інвертора [4]. Перевагою є легкість модернізації існуючих фотоелектричних систем. Однак, існує суттєвий недолік: якщо енергія PV заряджає BESS, відбувається подвійне перетворення потужності (DC PV - AC - DC BESS), що призводить до втрати загальної ефективності системи.

–DC-з'єднана (DC-Coupled): BESS і PV-система використовують спільну шину постійного струму (DC-шину) та гібридний інвертор. Це архітектурне рішення забезпечує значно вищу ефективність, оскільки надлишкова енергія PV може бути спрямована безпосередньо в батарею (DC PV - DC BESS) [4]. Це робить DC-з'єднання кращим вибором для нових інсталяцій, особливо тих, що орієнтовані на максимізацію самоспоживання та мінімізацію втрат перетворення енергії.

Для невеликих інсталяцій (5 кВт) зростає популярність інтегрованих рішень типу "All-in-One", які об'єднують інвертор PV, PCS, BMS та EMS в одному корпусі [8]. Це мінімізує складність розгортання та комунікаційних зв'язків. Оскільки для комерційних та житлових користувачів з невеликою маржею прибутку кожен відсоток ефективності є економічно значущим, DC-з'єднана архітектура, вбудована в All-in-One рішення, часто пропонує кращий довгостроковий фінансовий результат завдяки вищій загальній ефективності.

Таблиця 1.1. Порівняння топологій з'єднання 5 кВт BESS

Характеристика	AC-з'єднана система	DC-з'єднана система (гібридний інвертор)	Ключовий вплив на EMS
Ефективність (PV - BESS)	Нижча (DC-AC-DC)	Вища (DC-DC)	EMS має мінімізувати втрати на конверсію, що простіше в DC-архітектурі.
Складність інсталяції	Легкість модернізації існуючих систем	Ефективніший для нових комплексних установок	Менша кількість точок контролю для EMS
Вартість (початкова)	Зазвичай вища через потребу у двох інверторах	Часто нижча або еквівалентна при купівлі інтегрованого рішення (All-in-One)	Впливає на розрахунок ROI

1.4. Функціональне призначення та бізнес-кейси EMS

1.4.1. Економічні драйвери впровадження та ROI

Впровадження BESS пов'язане з високими початковими витратами, що робить економічну доцільність (ROI) критичним аспектом для кінцевого споживача [10]. Основною метою EMS є максимізація фінансової віддачі шляхом оптимізації операційних режимів для зниження витрат та генерації потенційних доходів [11].

Для установок 5 кВт фінансова вигода досягається шляхом балансування трьох основних факторів: максимізації самоспоживання сонячної енергії, використання переваг тарифів Time-of-Use (TOU) та, що особливо важливо, підтримання оптимального здоров'я батареї (SoH) [7]. Агресивне керування, спрямоване виключно на короткострокову фінансову вигоду (часті глибокі цикли), може прискорити деградацію елементів, тим самим збільшуючи довгострокові експлуатаційні витрати і знижуючи загальний ROI. Отже, сучасна EMS повинна працювати як багатоцільовий оптимізатор, що забезпечує довговічність системи.

1.4.2. Базові та розширені режими керування EMS

Економічний успіх 5 кВт BESS залежить від здатності EMS реалізовувати такі режими:

–Максимізація самоспоживання (Self-Consumption): Цей режим є основою для систем, інтегрованих із PV. EMS програмується таким чином, щоб надлишок енергії, згенерованої сонячними панелями вдень, був збережений у BESS замість експорту в мережу, а потім використаний для живлення навантаження у вечірні години[7]. Більш просунуті EMS можуть включати функцію Zero Import, що гарантує, що заряджання BESS відбувається виключно від PV без споживання з мережі, а також функцію Zero Export, яка запобігає передачі енергії в мережу, якщо це економічно не вигідно або заборонено регулятором [13].

–Енергетичний арбітраж (Time-of-Use Optimization): Якщо домогосподарство або мале підприємство працює за тарифом, який диференціює ціни залежно від часу доби (TOU), EMS реалізує енергетичний арбітраж. Система

автоматично заряджається під час низькотарифних періодів (зазвичай вночі) і розряджається під час пікових, високотарифних періодів (часто ввечері), що призводить до значного зниження рахунків за електроенергію [10].

–Зменшення пікового навантаження (Peak Shaving) та зниження плати за потужність: Для невеликих підприємств, де плата за потужність (Demand Charges) може становити значну частину щомісячних витрат, *Peak Shaving* є критичною функцією [12]. EMS використовує накопичену енергію для покриття короткочасних піків споживання, запобігаючи перевищенню встановленого порогу потужності, за який нараховуються високі тарифи. Ця функція вимагає надійної логіки прогнозування навантаження [15].

–Динамічне реагування на ціни: В умовах розвинених ринків, де діють динамічні або ціни реального часу, EMS повинна постійно відслідковувати цінові сигнали. Це дозволяє системі негайно ініціювати розрядження, навіть поза типовими піковими вікнами, щоб уникнути купівлі дорогої електроенергії, спричиненої раптовими мережевими подіями [14].

1.4.3. Додаткові функції BESS 5 кВт

Сучасні EMS також керують додатковими функціями, що підвищують стійкість та майбутню готовність системи. Хоча стратегічне економічне керування є основною функцією EMS, вона часто повинна взаємодіяти з мікромережовим контролером (Microgrid Controller, MGC) або інтегрувати його функції [6]. EMS відповідає за *стратегію* та економію (Grid-Tied operation), тоді як MGC відповідає за *стійкість* та реакцію на відключення (Blackout Response, ізольований режим) [6]. У 5 кВт системах, особливо типу All-in-One, ці функції часто об'єднані для забезпечення надійної роботи BESS під час відключень мережі [5].

Крім того, деякі нові системи демонструють готовність до інтеграції з акумуляторами електромобілів V2X (Vehicle-to-Home/Grid) [9]. Це дозволяє BESS виступати як віртуальна електростанція (VPP), збільшуючи загальну економічну цінність системи за рахунок участі у допоміжних мережових програмах[6].

1.5. Передові алгоритми та моделі керування EMS

1.5.1. Обмеження традиційних алгоритмів

Таблиця 2.1. Порівняння EMS операційних режимів для фінансової оптимізації

Режим EMS	Головна мета	Ключовий механізм	Цільовий показник ROI
Максимізація самоспоживання	Зниження залежності від мережі	Зберігання надлишку PV, Zero Import	Зменшення загального обсягу закупленої енергії
Енергетичний арбітраж	Використання динаміки цін (TOU)	Заряджання в Off-peak, розряджання в Peak	Економія на різниці тарифів
Зниження пікового навантаження (Peak Shaving)	Уникнення Demand Charges	Розряджання батареї при перевищенні ліміту потужності	Зниження щомісячної плати за максимальну потужність
Динамічне реагування	Адаптація до ринкових змін у реальному часі	Миттєве розряджання/заряджання за ціновими сигналами	Максимізація прибутку від непередбачених цінових стрибків

Прості системи керування, які покладаються на фіксовані правила (наприклад, "заряджати, якщо потужність PV перевищує 2 кВт") або встановлені графіки, є недостатньо ефективними в сучасному енергетичному середовищі [14]. Вони не здатні адаптуватися до непередбачуваної варіабельності сонячної генерації, динамічних змін навантаження або швидких коливань цін на ринку [16]. Перехід до інтелектуального керування є обов'язковим для максимізації фінансового повернення.

1.5.2. Модельно-предиктивне керування (Model Predictive Control, MPC)

Модельно-предиктивне керування (MPC) є золотим стандартом для оптимізації операцій BESS у мікромережах [17]. Суть MPC полягає у мінімізації цільової функції (наприклад, операційних витрат або максимізації прибутку) протягом рухомого горизонту прогнозування (зазвичай 24 або 48 годин) [18].

Основні характеристики MPC:

–Інтеграція прогнозів: ефективність MPC безпосередньо залежить від точності прогнозів. EMS використовує прогнози навантаження, генерації PV (погода) та ринкових цін [18]. Дослідження демонструють, що інтеграція моделей глибокого навчання (наприклад, Long Short-Term Memory, LSTM) для прогнозування навантаження дозволяє досягти значних покращень, знижуючи місячні рахунки на електроенергію до 9.3% порівняно зі стандартними EMS [16]

–Обмеження та оптимізація життєвого циклу: на відміну від простих алгоритмів, MPC формулює задачу як оптимізаційну, враховуючи всі фізичні обмеження (наприклад, максимальну/мінімальну потужність, мінімально допустимий SoC) та, критично, обмеження, пов'язані з довговічністю батареї (SoH) [18]. Це гарантує, що цикли заряджання/розряджання є оптимальними не лише з точки зору миттєвої вигоди, але й для продовження загального терміну служби системи [7].

–Обчислювальна реалізація: оптимізаційна модель, що описує BESS та PV, часто є моделлю нелінійного програмування (NLP). Для того, щоб зробити MPC обчислювально доцільною для вбудованих контролерів (Edge Controllers) з обмеженими ресурсами, дослідники застосовують методи реформування, такі як рекурсивна опукла апроксимація (RCA). RCA дозволяє швидше знайти близьке до оптимального рішення, що є життєво необхідним для операцій у реальному часі [19].

1.5.3. Альтернативні методи оптимізації

Крім MPC, у дослідженні оптимального розміру та функціонування BESS застосовуються еволюційні та метаевристичні методи. Наприклад, генетичний алгоритм (GA) та оптимізація роєм частинок (PSO) використовувалися для визначення оптимального розміру BESS у розподілених системах [20]. Хоча ці методи частіше застосовуються для великих інсталяцій (наприклад, 1000 кВт або 1539 кВт) та визначення місця розташування, їхні принципи також можуть бути використані в EMS 5 кВт систем для тонкого налаштування внутрішніх параметрів керування, таких як оптимальна глибина розряду (DoD) або

резервний SoC, що дозволяє динамічно адаптувати параметри системи до сезонних енергетичних профілів [7].

1.6. Технічна реалізація: апаратне забезпечення та протоколи зв'язку

1.6.1. Архітектура EMS та контролери

EMS для невеликих BESS (5 кВт) зазвичай реалізується на рівні вбудованого контролера (Edge Controller) [6]. Ці контролери, які є частиною інтегрованого рішення (наприклад, Microgrid Site Controller у PowerAll Series [8]), забезпечують високу швидкість реагування, необхідну для критичних функцій, таких як Peak Shaving.

Для забезпечення віддаленого моніторингу, аналітики, оновлення програмного забезпечення Over-the-Air (OTA) та інтеграції з більшими системами (наприклад, SCADA або Virtual Power Plants), локальні контролери EMS обов'язково повинні мати можливість підключення до централізованих хмарних платформ[8]. Хмарне підключення також дозволяє отримувати цінну інформацію з BESS у будь-який час та знижувати витрати на обслуговування [21].

1.6.2. Ієрархія протоколів зв'язку

Для ефективної роботи EMS необхідна надійна комунікація між усіма компонентами системи. Існує чітка ієрархія протоколів:

1.6.2.1. Внутрішній зв'язок (BMS - PCS - EMS)

–CAN Bus: Це стандартний і найнадійніший протокол для внутрішнього керування BMS, особливо в літєвих батарейних блоках, що успадкували технології від автомобільної промисловості [22]. CAN Bus забезпечує високу швидкість (до 1 Мбіт/с) та має розширені функції обробки помилок, що є критично важливим для моніторингу елементів і безпеки. Фактично, CAN Bus є невидимим шаром безпеки, який дозволяє EMS покладатися на миттєве виконання команд захисту BMS.

–Modbus RTU: Використовується для простої та ефективної передачі даних між BMS та іншими компонентами BESS, часто через послідовний зв'язок (RS-485) [22].

1.6.2.2. Зовнішній зв'язок та інтеграція з мережею

–Modbus TCP/IP: цей протокол є промисловою "робочою конячкою" для зв'язку між EMS та PCS, а також для інтеграції з інтелектуальними лічильниками, системами SCADA та зовнішніми пристроями [22]. Універсальність Modbus TCP/IP також дозволяє інтегрувати BESS у відкриті платформи домашньої автоматизації, такі як Home Assistant, що дає кінцевому користувачеві можливість створювати власні сценарії EMS [21].

–Протоколи індустріального Ethernet: для високошвидкісної синхронізації у промислових додатках часто використовуються такі протоколи, як EtherNet/IP та PROFINET [23].

–Стандартизовані протоколи: зростає потреба у відповідності стандартам IEC 61850 для комунікації в автоматизації енергооб'єктів та IEEE 1815.2 (MESA-DER), який визначає вимоги до зв'язку для розподілених енергетичних ресурсів [25].

1.6.3. Огляд підходів до реалізації EMS

На ринку 5 кВт систем існують два основні підходи до реалізації EMS:

1. Комерційні інтегровані системи (All-in-One): Виробники, такі як EnSmart Power або SigenEnergy, пропонують повністю інтегровані рішення, де EMS є невід'ємною частиною апаратного комплексу (PowerAll Series, SigenStor) [8]. Це забезпечує максимальну сумісність і гарантує виконання функцій (наприклад, Peak Shaving, Load Shifting) [3].

2. Open Source та гнучкі системи: проекти, такі як OpenEMS (Open Source Energy Management System) [27], дозволяють розробникам та дослідникам створювати власні алгоритми керування та стратегії оптимізації. Існують також DIY-підходи, які використовують недорогі енергетичні розетки (Energy Sockets) у поєднанні з підпискою на сервіси домашньої автоматизації (наприклад, HomeWizard Energy+), щоб автоматизувати ручні операції заряджання/розрядження BESS на основі вимірювання потоку потужності з мережі [29]. Хоча цей підхід є найпростішим, він є лише базовим керуванням на основі правил.

1.7. Нормативно-правове регулювання

1.7.1. Міжнародні стандарти та вимоги EMS

Оскільки BESS потужністю 5 кВт є розподіленим енергетичним ресурсом (DER), її EMS повинна суворо дотримуватися національних та міжнародних мережевих стандартів (Grid Codes), щоб забезпечити безпечну та надійну експлуатацію в паралелі з основною мережею [30].

–Європа: ключовим стандартом є EN 50549, який регулює підключення генеруючих установок до розподільчих мереж[30]. Для систем 5 кВт, підключених до мереж низької напруги (LV, < 1000 В AC), застосовується EN 50549-1[30]. Також важливими є національні стандарти, такі як VDE-AR-N 4105 (Німеччина) та G99 (Велика Британія) [31].

–Північна Америка: Основним стандартом є IEEE 1547[32]. Він встановлює обов'язкові функціональні технічні вимоги, включаючи специфікації зв'язку та умови експлуатації під час аномальних подій у мережі (наприклад, функція *ride-through*) [5].

1.7.2. Функціональні вимоги EMS для Grid Compliance

Відповідність мережевим стандартами вимагає від EMS реалізації наступних критичних функцій:

–Контроль активної та реактивної потужності (Volt/Var Control): BESS є цінним активом для стабілізації. EMS, керуючи PCS, повинна забезпечувати швидке введення або поглинання активної та реактивної потужності для підтримки номінальної частоти та напруги в мережі [11].

–Контроль експорту та імпорту (Export/Import Limits): EMS повинна мати функцію суворого контролю над потужністю в точці загального з'єднання (PCC). Наприклад, для забезпечення функції Zero Export (запобігання експорту надлишкової енергії, якщо це вимагається Grid Code або контрактом), EMS має бути здатна видати пряму команду PV-інвертору негайно зупинити генерацію [13]. Ця вимога підкреслює необхідність надійного комунікаційного протоколу, що забезпечує пряме командне керування інвертором [34].

–Захист від острівного режиму (Anti-Islanding): EMS та PCS повинні гарантувати, що система автоматично та безпечно відключається від мережі під

час збою, запобігаючи створенню "острівного режиму" (islanding effect), якщо вона не функціонує як спеціально розроблена мікромережа [30].

1.7.3. Стандарти безпеки (Safety Compliance)

Окрім регуляторних вимог до енергетичної взаємодії, вирішальне значення мають стандарти безпеки, особливо для систем, розташованих на території домогосподарств або підприємств. Батареїні системи повинні відповідати міжнародно визнаним стандартам на рівні елементів, модулів та всієї системи[4]. До ключових стандартів відносяться UL 9540 (Безпека системи накопичення енергії) та UL 9540A (Методи випробування для оцінки поширення вогню та термічного розгону) [4].

Системи EMS, які не підтримують регулярні оновлення (наприклад, Over-The-Air, як це передбачено для деяких V2X функціоналів [4]), ризикують швидко стати невідповідними новим або переглянутим Grid Codes (наприклад, оновленням IEEE 1547 [33]), що може призвести до неможливості участі в мережевих програмах або навіть до заборони експлуатації.

Висновки та рекомендації до першого розділу

Реалізація ефективної системи енергоменеджменту для BESS потужністю 5 кВт є багатоплановою інженерно-економічною задачею. Успіх визначається переходом від простого керування на основі правил до інтелектуального, предиктивного керування, здатного до багатоцільової оптимізації.

Для нових інсталяцій PV+BESS для домогосподарств або малого бізнесу рекомендується DC-з'єднана архітектура з використанням гібридного або інтегрованого інвертора. Ця топологія забезпечує вищу ефективність конверсії (DC - DC), що безпосередньо підвищує довгостроковий ROI. Вибір "All-in-One" рішень спрощує монтаж, зводить до мінімуму проблеми інтеграції та забезпечує єдиний, узгоджений контролер EMS.

Система EMS повинна бути реалізована на основі модельно-предиктивного керування (MPC), що використовує прогнози навантаження, PV генерації та ціни. Для забезпечення обчислювальної ефективності на

вбудованих контролерах рекомендується застосування методів опуклої апроксимації (наприклад, RCA).

Перед впровадженням системи BESS та EMS необхідно провести ретельну перевірку на відповідність локальним мережевим стандартам. Для європейських інсталяцій це EN 50549-1 (для низької напруги), а для Північної Америки — IEEE 1547. EMS повинна балансувати між максимізацією негайної фінансової вигоди (арбітраж) та довгостроковим здоров'ям батареї. Наявність високоточного моніторингу SoH та його інтеграція в MPC-алгоритм є обов'язковою умовою для мінімізації довгострокових експлуатаційних витрат. Для малих підприємств пріоритет слід віддавати функціям Demand Charge Reduction, що забезпечують найбільш значущий та передбачуваний фінансовий потік. Оскільки технологія BESS продовжує розвиватися, вибір обладнання, що підтримує оновлення OTA (наприклад, для V2G), забезпечить відповідність майбутнім стандартам та дозволить отримувати дохід від нових мережеслужб (VPP).

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ РІЗНИХ ТИПІВ ДЛЯ РІЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ПОТУЖНІСТЮ 5 КВТ ПРИВАТНИХ ГОСПОДАРСТВ ТА НЕВЕЛИКИХ ПІДПРИЄМСТВ

Технології акумуляторних установок накопичення енергії для приватних житлових та малих бізнес-систем потужністю 5 кВт були оцінені за умов функціонування з різними профілями навантаження (постійне споживання енергії, пікові сплески споживання, щоденні циклічні навантаження) та за різних ключових факторів продуктивності. Вказані установки акумуляювання електроенергії на базі літій-іонних акумуляторів (LFP – фосфат літію заліза, NMC – нікельмарганець кобальт та LTO – оксид титанату літію) загалом перевершують установки акумуляювання на базі традиційних свинцево-кислотних (AGM/GEL) акумуляторів за параметрами: ефективність циклічного заряду/розряду та корисна глибиною розряду, особливо за високих вимог до значень потужності (C-rate) [37], [38].

Установки на базі LFP-акумуляторів (або часто позначають LiFePO_4) є найкращим універсальним вибором за умови їх використання для типового щоденного циклу: ефективність $\sim 90 - 95\%$ [39], тривалий термін служби (3000 - 6000 циклів при 80 % DoD) [40], висока термостабільність (відсутність теплового розгону до $\sim 270\text{ }^\circ\text{C}$) [41].

Установки на базі NMC акумуляторів забезпечують подібну ефективність (90 – 95 %), але мають вищу щільність енергії. Однак, їх термін служби (1000 – 2000 циклів) значно коротший [42], а за умови використання кобальт-оксидних матеріалів для них є характерним такої вищій ризик теплового нагріву (поріг $\sim 210\text{ }^\circ\text{C}$) [41].

Установки на базі LTO акумуляторів мають вищі значення як потужності так і довговічності (понад 10 000 циклів [43]; здатні працювати за умов до сплесків заряду/розряду 5 – 10C), але коштують у 2 – 3 рази дорожче за кВт·год [44]. Вказане робить їх ідеальними лише для екстремальних циклів роботи установки або екстремальних сценаріїв споживання потужності (частий швидкий заряд/розряд, холодний клімат).

Установки накопичення електроенергії на базі вдосконалених свинцево-кислотних акумуляторів (AGM/GEL) є недорогими на використання, але мають низьку ефективність накопичення енергії (~ 80 % [37]) та вимагають збільшення об'єму заряду (оскільки їх можна заряджати/розряджати щоденно лише на 30 – 50 % від об'єму заряду для забезпечення тривалого використання [9]) Але навіть тоді їх термін служби становить ~ 500 – 1000 циклів [46], що призводить до високої вартості за кВт·год протягом усього терміну служби.

Новий конкурент, натрій-іонний акумулятор, забезпечує негорючий хімічний склад та хороші характеристики в холодну погоду [47] , але у 2025 – 2026 роках він все ще перебуває на передкомерційному етапі з обмеженими можливостями до реального застосування.

Виконаний аналіз застосування акумуляторних станцій з використанням різних типів акумуляторів для реальних умов України та Європи в цілому (температура навколишнього середовища -10...35 °C, енергетична ємність акумулятора 5 – 15 кВт·год, ~1 цикл/день плюс епізодичні піки підвищеного споживання) свідчить, що акумулятори LFP (LiFePO₄) мають найнижчу загальну вартість за умов забезпечення надійної продуктивності для власного споживання та резервного накопичення сонячної енергії в домашніх умовах. Акумулятор LTO може бути виправданим для нішевих випадків, що потребують надшвидкого циклу розрядки або терміну служби більше 15 років. З міркувань безпеки доцільно надати перевагу LFP (та LTO) над NMC, враховуючи стабільність LFP акумулятора та безпечний режим відмови [47]. Далі наведено порівняльні таблиці

та матрицю рішень, яка дозволяє порівняти і оцінити вартість життєвого циклу, довговічність, безпеку та продуктивність. В таблиці наведено рекомендації для домогосподарств (де LFP є кращим завдяки поєднанню ефективності, терміну служби та безпеки) порівняно з малим бізнесом (де LFP також відповідає більшості потреб, тоді як LTO може вирішувати проблеми інтенсивного використання високої потужності). Можливі компромісні варіанти детально обґрунтовуються далі з метою вибору технології для систем накопичення енергії потужністю 5 кВт.



Рисунок 2.1 - Ілюстрація житлового будинку із установкою перетворення сонячної енергії та з накопичувачем енергії (інвертор 5 кВт, акумулятор ~ 10 кВт·год) з фотоелектричною системою на даху та невеликою вітровою турбіною [47].

Ключові припущення та сценарії

В житловому домогосподарстві зазвичай заряджають акумулятори вдень та розряджають ввечері (один щоденний цикл), тоді як малий бізнес може використовувати акумулятори переважно для короткочасної пікової підтримки потужності. Ці різні профілі навантаження (стабільне та пікове навантаження) впливають на оцінку продуктивності кожного типу акумулятора.

Наш аналіз передбачає використання однофазного інвертора змінного струму напругою 230 В, потужністю 5 кВт, поєднаного з різними типами акумуляторів енергетичною ємністю у діапазоні 5 – 15 кВт·год. Нижче наведені основні припущення щодо експлуатації та використання:

- Навколишнє середовище: типовий діапазон від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неопалюваний гараж або зовнішнє приміщення), що відображає європейський/український клімат. Передбачається, що акумуляторні системи мають відповідну необхідну систему управління температурою (нагрівання або охолодження) для підтримки безпечних робочих температур акумулятора.

- Ємність акумулятора: для оцінки пливу ємності акумулятора вибираються акумулятори ємністю 5 кВт·год (малий), 10 кВт·год (середній дім) та 15 кВт·год (великий дім/малий бізнес). Інвертор потужністю 5 кВт заряджає: акумулятор ємністю 5 кВт·год відповідно з швидкістю заряду 1 С; акумулятор ємністю 10 кВт·год $\sim 0,5\text{ С}$; акумулятор ємністю 15 кВт·год $\sim 0,33\text{ С}$.

- Профілі навантаження: Застосовуємо два основні варіанти використання:
(1) Щоденне циклічне навантаження – наприклад, власне споживання перетвореної сонячної енергії, ~ 1 повний цикл на день (зарядка щодня вдень, розрядка щовечора) при $\sim 80\%$ глибині розряду (DoD). (2) Зменшення пікового навантаження/ДБЖ – акумулятор підтримує високий рівень заряду та розряджається короткими імпульсами високої потужності для зняття пікових значень (наприклад, кілька хвилин при 5 кВт або короткі сплески до $\sim 2\times$ номінальної потужності інвертора для запуску двигуна), що становить, можливо, 0,5 – 2 еквівалентних циклів на день. Сценарій постійного навантаження (тривалий розряд 5 кВт) також розглядається для оцінки ефективності при сталому споживанні.

- Вимірювання ефективності: Коефіцієнт корисної дії (RTE) стосується енергетичної ефективності перетворення постійного струму на постійний струм для повного циклу заряду/розряду при помірній швидкості заряду ($\sim 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), без

урахування втрат інвертора. Коефіцієнт корисної дії часткового циклу вважається подібним до коефіцієнта корисної дії повного циклу для літій-іонних акумуляторів (мінімальний ефект пам'яті), тоді як свинцево-кислотні акумулятори зазнають більших втрат при неглибокому циклі розряду/розряду в стані часткового заряду.

- Критерії терміну служби: Термін служби визначається як 80 % залишкової ємності (кінець терміну служби) за температури 25 °С. Дані виробника (2020 – 2025) щодо терміну служби часто передбачають 80 % використання DoD для літій-іонних акумуляторів та 50 % для свинцево-кислотних; ми використовуємо ці стандартні точки для порівняння. Якщо хімічний склад може витримувати глибший розряд щодня, це вказується у «корисному DoD». Також зазначається календарний термін служби (роки роботи з підтримкою).

- Вартість: Орієнтовна вартість акумуляторів на 2024 – 2026 роки (дол. США за кВт·год): LFP \$300 ($\pm 20\%$), NMC \$350, свинцево-кислотні (AGM) \$150, LTO \$600 – 800. Ці дані включають балансування системи та використовуються для якісного порівняння загальної вартості установок. Передбачається, що всі типи акумуляторів відповідають відповідним стандартам безпеки (наприклад, транспортний стандарт ООН 38.3, IEC 62619/UL 9540A для стаціонарних літій-іонних акумуляторів) та відповідають нормам ЄС щодо встановлення всередині будинків (які часто надають перевагу LFP через менший ризик пожежі).

- Технічне обслуговування та встановлення: Свинцево-кислотні системи потребують періодичних перевірок (доливання води до комірок елементів або принаймні вентиляцію для герметичних елементів). Літій-іонні системи не потребують обслуговування, окрім оновлень прошивки BMS. Ми припускаємо, що для літій-іонних акумуляторів встановлено належні системи керування акумуляторами (BMS) та належний захист (запобіжники, контактори) для всіх систем.

2.1 Порівняльна продуктивність акумуляторних технологій

У таблиці 2.1 показані ключові показники продуктивності для кожного хімічного складу акумулятора в контексті зберігання енергії і забезпечення потужності 5 кВт для житлових приміщень/малих підприємств. Показники наведено за типових умов (25 °С, помірний показник С) з примітками щодо корисної ємності та обмежень потужності. Приклади комерційно доступних продуктів (станом на 2024 – 2026 роки) включено, де це можливо.

Таблиця 2.1 - Ключові показники продуктивності для кожного хімічного складу акумулятора

Тип технології акумулятора	Ефективність (ККД) заряд/розряд (RTE)	Термін служби (до 80% ємності)	Використовуваний DoD (щоденно)	Максимальна швидкість розряду/заряду	Діапазон робочих температур	Примітні особливості / обмеження	Приклад продукту (приблизні характеристики)
Літій-іонний LFP (літій-залізофосфатний)	90–95% (типово) ~88–92% при 1°C	~3000–6000 циклів (80% [4] (до ~10 000 часткових циклів)	~80–90% рекомендовано [13] (100% придатний для використання в надзвичайних ситуаціях)	~1C безперервно 2–3C піково (короткі періоди)	Зарядка від 0 °C до +45 °C [14] Розрядка від -10 °C до +55 °C (за нагрівання нижче 0)	Висока безпека (термічно стабільний катод, відсутність виділення O ₂) [12] ; Тривалий термін служби та стійкість до часткового заряду; Дещо нижча щільність енергії (~90–160 Вт·год/кг) порівняно з NMC [5] ; Найбільш популярний для домашнього зберігання (баланс вартості, терміну служби, безпеки)	<i>Приклад:</i> BYD Battery-Box Premium HVS (LFP, 10,2 кВт·год) – RTE ~95%, 6000 циклів при 80% DoD, 10-річна гарантія.
Літій-іонний NMC (нікель-марганцево-кобальтовий)	90–94% (типово)	~1000–2000 циклів (80% DoD) [6] (гарантія ~10 років або ~3000 часткових циклів)	~80% рекомендовано (для зменшення навантаження) (100% придатний для використання в режимі резервного живлення)	~1C безперервно 2C пік (залежно від конструкції комірки)	Зарядка від 0 °C до +45 °C Розрядка від -10 °C до +50 °C (з терморегулюванням)	Висока щільність енергії (~150–220 Вт·год/кг) – компактний розмір [5] ; Вищий ризик пожежі – нижча температура теплового виходу (~210 °C) [12] ; Чутливість до високого SoC та нагрівання (швидше старіння); Була поширеною в старих системах на базі Powerwall/EV, зараз значною мірою витіснена LFP для стаціонарного використання.	<i>Приклад:</i> Tesla Powerwall 2 (NMC, 13,5 кВт·год) – ~90% RTE, еквівалентна пропускна здатність >5000 циклів, 10-річна гарантія (встановлення в добре провітрюваному приміщенні).
Літій-іонний LTO	85–90% (типово) [39]	10 000–20 000 циклів (100%)	~90–100% придатний для викорис-	2–5C безперервно (Зарядка від -20 °C до +45 °C	Надзвичайно тривалий термін служби (здатний працювати понад 20 років); Відмінна продуктивність за низьких	<i>Приклад:</i> модулі LTO Yinlong 30 Ah (використовуються в

Тип технології акумулятора	Ефективність (ККД) заряд/розряд (RTE)	Термін служби (до 80% ємності)	Використовуваний DoD (щоденно)	Максимальна швидкість розряду/заряду	Діапазон робочих температур	Примітні особливості / обмеження	Приклад продукту (приблизні характеристики)
(титанат літію)	~80–85% за дуже високого C	DoD) [43] (може перевищувати 15 тис. циклів при 80% ємності)	тання за стандартами (мінімальне навантаження навіть при 100%)	кількість батарей до 10C імпульсно [48]	(без ризику літєвого покриття) [48] Розрядка від -30 °C до +55 °C	температур (працює за низьких температур з незначним падінням ємності); Дуже швидка зарядка (можлива 10-хвилинна зарядка) [42]; Дуже висока вартість (~150–200 доларів США/кВт·год вартість елемента) [44] та нижча щільність енергії (60–110 Вт·год/кг) [43]; Нішеве використання в промисловості, не поширене для дому через вартість.	електромобілях/автобусах) – >15 000 циклів, можуть заряджатися за 10 хвилин; деякі автономні банки використовують LTO протягом 20+ років терміну служби, незважаючи на вартість.
Свинцево-кислотні AGM/GEL (VRLA)	70–85% (повний цикл) [38] (ефективність падає при високій швидкості заряду або частковому заряді)	500–1200 циклів (50% DoD) [38] (~300 циклів при 100% DoD) [20]	~30–50% щодня (для досягнення зазначеного терміну служби) [48] (максимум 70–80% зрідка)	Рекомендований струм заряду 0,2–0,3C [38] Розряд ~0,5C (вищий струм спричиняє значне падіння напруги)	Заряд від -10 °C до +40 °C (повільніше нижче 0) Розряд від -20 °C до +50 °C (ємність падає >50% при -10 °C)	Низька початкова вартість, комерційно доступний та на 100% придатний для переробки; Потребує регулярного повного заряджання, щоб уникнути сульфатації [38]; Важкий та громіздкий (30–50 Вт·год/кг); Погана вихідна потужність – просідання напруги >0,5–1C; Короткий термін служби ~5–7 років (навіть за умови невеликого циклу розрядки/зарядки)	<i>Приклад:</i> Trojan T105 AGM (свинцево-кислотний, 225 Аг 6 В) – ~700 циклів при 50% DoD, 2-річна гарантія. Потрібен великий акумулятор (24×T105) для ~10 кВт·год корисної енергії, що потребує вентиляції.
Натрій-іон	~90%	~3000–5000	~90%	~0,5–1C	Заряд від	Негорючі, поширені матеріали	<i>Приклад:</i> Freen

Тип технології акумулятора	Ефективність (ККД) заряд/розряд (RTE)	Термін служби (до 80% ємності)	Використовуваний DoD (щоденно)	Максимальна швидкість розряду/заряду	Діапазон робочих температур	Примітні особливості / обмеження	Приклад продукту (приблизні характеристики)
(Na-іон)	(оцінка, ранні дані) (ефект кулона аналогічний літій-іонним)	циклів (за оцінками) – ранні продукти заявляють про ~4000 циклів при 90% [24]	придатності для використання (без проблем з літійєвим покриттям; нижче навантаження при повному заряді)	безперервно (поточні прототи́пи) Очікується пік ~2С	-10 °С до +45 °С Розряд від -20 °С до +60 °С (відмінна морозостійкість) [11]	(відсутність літію та кобальту); Нижча щільність енергії (~100–150 Вт·год/кг), ніж у LFP [25] ; Докомерційна стадія у 2025 році (невелика кількість постачальників, обмежені польові дані); Потенціал для нижчої вартості в довгостроковій перспективі, але вартість установок 2025 року становитиме ~300 євро/кВт·год [26]	Номе 10 кВт·год (Na-іон, 48 В) – 90% DoD, ~4000 циклів, працює при -20...60 °С, продукт першого покоління в ЄС [24] [27] .

Примітки: Наведені вище значення є типовими діапазонами. Фактична продуктивність залежить від конкретного продукту та умов використання. Параметр «Використовуваний рівень заряду» відображає баланс між максимізацією ємності та забезпеченням довговічності (наприклад, гарантії на літій-іонний акумулятор часто обмежують щоденний рівень заряду ~ 80 – 90 %).

Термін служби свинцево-кислотних акумуляторів дуже чутливий до рівня заряду та режиму перезарядки – наприклад, AGM, який витримує 1000 циклів при 50 % рівні заряду, може витримати лише ~300 циклів при 100 % рівні заряду [38], а робота в частковому стані заряду без періодичного повного перезарядження призводить до передчасної сульфатації [47].

Термін служби літій-іонних акумуляторів (LFP/NMC/LTO) також залежить від рівня заряду та швидкості заряду; менші цикли можуть забезпечити експоненціально довший термін служби [46], [48]. Усі літій-іонні системи містять систему управління заряджанням акумулятора (BMS) для запобігання роботі поза межами безпечної напруги або температури.

Параметр «Ефективність» у порівнянні з профілем навантаження є ефективністю повного циклу для літій-іонних акумуляторів і значною мірою не залежить від профілю навантаження при помірних значеннях струму (C). Елементи LFP та NMC зазвичай повертають ~ 95 % енергії навіть при значеннях 0,5C [44]. При дуже низьких значеннях C кулонівська ефективність залишається ~ 99 % (втрати мінімальні), але при високих значеннях C (наприклад, ~1C або вище) ефективність літій-іонних акумуляторів може дещо знизитися для високих розрядів 80%/ для низьких розрядів 90 % через резистивні втрати. Акумулятор LFP часто перевершує інші за ефективністю при типових для домашніх значеннях C – багато домашніх систем LFP заявляють про RTE > 90 – 95 %. Акумулятори LTO також можуть бути ефективними, але деякі джерела зазначають RTE LTO ~ 85 – 90 % [39]; це частково відображає те, що акумулятори LTO часто

використовуються у високопотужних пристроях (вищі втрати I^2R при екстремальних значеннях C) – за подібних умов різниця в ефективності LTO та LFP невелика. На противагу цьому, свинцево-кислотні акумулятори мають значну неефективність: втрати енергії під час заряджання (стадія поглинання «доповненням» призводить до витрачання енергії у вигляді тепла та газу після заряджання $\sim 80\%$) дають типовий коефіцієнт повного розряджання (RTE) лише $75 - 85\%$ [38]. При вищих швидкостях розряджання свинцево-кислотні акумулятори втрачають ще більше ємності (ефект Пейкерта) – наприклад, споживання 5 кВт від AGM-банки в об'ємі електроенергії $\sim 10\text{ кВт}\cdot\text{год}$ ($0,5\text{ }^\circ\text{C}$) може значно знизити ефективну ємність та ефективність. Попередні дані щодо натрій-іонних акумуляторів свідчать про ефективність $\sim 90\%$, подібно до літій-іонних, але це ще належить довести у великих масштабах.

Параметр «Постійний/повільний розряд»: при стабільних помірних навантаженнях (наприклад, при постійному розрядженні потужністю $1-2\text{ кВт}$ протягом багатьох годин) літій-іонні акумулятори працюють майже з оптимальною ефективністю (мінімальне тепловиділення). Свинцево-кислотні акумулятори при постійному розрядженні зазнають поступового падіння напруги; робота в режимі 50% розряду протягом, наприклад, $4 - 5$ годин є можливою, але загальна вихідна енергія буде приблизно на $10 - 15\%$ нижчою, ніж споживана [37]. Більш рівна напруга розряду літій-іонних акумуляторів підтримує вищу ефективність протягом усього періоду розряду [40].

Параметр «Пікові сплески потужності»: Акумулятори з низьким внутрішнім опором (LTO, потім LFP/NMC) найкраще справляються з короткими сплесками споживання високої потужності навантаження. Елементи LTO, розраховані на імпульси 10C , демонструють лише невелику втрату ефективності при коротких розрядах (і невелике падіння напруги). LFP та NMC зазвичай можуть видавати $2 - 3\text{C}$ протягом кількох секунд, що достатньо для більшості номінальних показників перенапруги інвертора, з можливою втратою ефективності на кілька відсотків та

деяким падінням напруги. Свинцево-кислотні акумулятори мають проблеми з високими сплесками: сплеск 2С може значно знизити напругу на клеммах (через вищий внутрішній опір), що призводить до неефективності та потенційного спрацьовування низьковольтних відключень. Таким чином, для запуску навантажень, для яких в момент запуску є характерні сплески напруги (наприклад, компресорів, насосів) літій-іонні акумулятори забезпечують стабільнішу напругу та витрачають менше енергії у вигляді тепла.

Параметр «Часткові та періодичні навантаження»: У режимі короткотермінових пікових споживань енергії навантаженням акумулятора (багато коротких часткових розрядів) літій-іонні акумулятори мають кулонівські втрати і енергію можна циклічно перезаряджати невеликими кроками з високою ефективністю. Свинцево-кислотні акумулятори, навпаки, якщо їх регулярно не заряджати до 100 % то часткові заряди призводять до накопичення сульфатів на пластинах [42], [43], що з часом фактично призводить до втрати ємності. Крім того, свинцево-кислотний акумулятор, що підтримується в стані часткового заряду, має вищий внутрішній опір і забезпечуватиме нижчу ефективність до повного заряджання. Літій-іонні акумулятори не мають «ефекту пам'яті» – частковий цикл призводить до практично пропорційного зносу та незначного зниження ефективності.

Параметр «Життєвий цикл та поведінка деградації». Термін служби акумулятора залежить як від: кількості циклів розрядки, терміну експлуатації, глибина розрядки, швидкості розрядки та температури.

Глибина розряду (DoD): Неглибокі цикли розряду значно подовжують термін служби літій-іонного акумулятора. Наприклад, елемент LFP може витримувати ~3000 повних циклів за умови 80 % DoD, але також понад 9000 циклів за умови 20 % DoD [42] (якщо розподілити їх, це десятиліття терміну служби). Акумулятори NMC також є вигідними до викаристання по параметру Життєвого циклу і поведінки деградації, хоча абсолютна кількість циклів нижча

(наприклад, ~ 1000 циклів при 100 % DoD проти ~ 6000 циклів 10 % DoD) [41], [50]. Термін служби свинцево-кислотних акумуляторів надзвичайно чутливий до DoD: типовий глибокоциклове значення параметру «Життєвий цикл і поведінка деградації» AGM може досягати ~ 1200 циклів за умови 50 % DoD, але лише кілька сотень за 100 % DoD [44].

Тому приймаємо, що щоденний DoD становить 80 % для літій-іонного акумулятора та лише ~ 50 % для свинцево-кислотного акумулятора, щоб порівняти термін служби. Це означає, що літій-іонний акумулятор ємністю 10 кВт·год може регулярно використовувати ~ 8 кВт·год, тоді як свинцево-кислотний акумулятор ємністю 10 кВт·год повинен використовувати лише ~ 5 кВт·год щодня, щоб прослужити кілька років. Таким чином, корисна ємність порівняно з номінальною набагато вища для літій-іонних акумуляторів – часто можна регулярно використовувати понад 90 % номінальної ємності [34], порівняно з ~ 50 % для свинцево-кислотних акумуляторів (або до 70 % при епізодичному використанні) [42].

Параметр «Цикли часткового розряду/заряду». Літій-іонні акумулятори не потребують повних циклів заряду/розряду; насправді, часткові цикли зменшують так зване навантаження від «високої» напруги на клеммах акумулятора. Використання лише середнього діапазону циклів заряду/розряду (наприклад, коливання заряду 30 – 80 %) мінімізує екстремальні значення напруги та може значно подовжити термін служби [41], [42]. Підтримка для акумуляторів NMC або LFP між, скажімо, 20 % та 90 % заряду дозволяє уникнути як глибокого розряду, так і навантаження «високою» напругою, покращуючи термін служби. Дані Battery University показують, що елемент NMC, який може прослужити ~ 500 повних циклів, може досягти 1500 + циклів, якщо застосовувати цикли часткового розряду/заряду за умови 60 % DoD, та понад 6000 циклів лише за умови 10 % DoD [43], [44]. Часте неглибокий циклічний розряд/заряд (наприклад, з метою регулювання напруги в мікромережі або зменшення піків споживання, коли

аккумулятор циклічно розряджається на 10 % багато разів на день) здебільшого лише накопичується до еквівалентних повних циклів – ефект «пам'яті» незначний. Для свинцево-кислотних аккумуляторів часткове циклування без регулярної повної зарядки шкідливе (як зазначалося, проблеми з сульфатацією), але неглибокі цикли з регулярною повною зарядкою відносно безпечні для аккумулятора (наприклад, підтримка телекомунікаційних аккумуляторів, де мікроцикли можуть працювати довго, оскільки вони постійно перезаряджаються до 100 %).

Параметр «Вплив швидкості заряджання/розряджання» - це параметр що враховує циклічне заряджання під високим струмом і забезпечує оцінку механічного та теплового навантаження при цьому. Аккумулятори NMC та LFP, за умови зарядження або розрядження з високою швидкістю, швидше втрачають ємність (через мікротріщини, літійове покриття, якщо заряджання відбувається занадто швидко тощо). У побутових умовах швидкість заряджання аккумуляторів зазвичай низька (заряджання від фотовольтаїки протягом ~ 5 годин струмом ~ C/5, що є ощадним режимом) [37]. Для завдання магістерської роботи розряджання за потужності 5 кВт від аккумулятора ємністю 10 кВт·год становить 0,5С – цілком у межах того, що можуть витримувати LFP/NMC аккумулятори з мінімальною додатковою деградацією. Аккумулятор LTO може витримувати навіть 5С безперервно без значної деградації, що дозволяє виконувати тисячі циклів високої швидкості заряджання (одна з причин, чому LTO використовується для швидкої зарядки). Свинцево-кислотні аккумулятори необхідно заряджати повільно (часто покроково зменшуючи струм заряду від C/10 до C/5 , а потім з довгою експоненціальною кривою зменшення струму для повного заряду) – спроба швидкої зарядки свинцево-кислотних аккумуляторів не тільки призводить до витрачання енергії, але й скорочує термін служби (відпадання пластин, нагрівання). Таким чином, літій-іонні аккумулятори набагато краще справляються з частими циклами заряджання та розряджання. Наприклад, два цикли на день приблизно вдвічі скоротять термін служби для заданого номінального терміну

служби. Батарея LFP з розрахованим ресурсом 5000 циклів (~15 років при 1 циклі/день) може прослужити ~7 – 8 років при 2 циклах/день. Батарея AGM з розрахованим ресурсом 1000 циклів (при 50 %) може прослужити < 2 років при 2 циклах/день, якщо глибина розряду не дуже мала.

Параметр «Термін служби». Навіть без циклічного розрядження/зарядження акумулятори старіють. Акумулятори за технологією NMC з часом має тенденцію до втрат ємності через окислення електроліту (прискорене за високого SoC та температури); після 10 років батарея NMC може мати ~70 – 80 % початкової ємності навіть за умови незначного циклічного розрядження/зарядження. LFP має чудовий термін служби – елементи часто зберігають > 80 % після 10 років, якщо зберігати їх при помірному SOC та температурі. SOC акумулятора (State of Charge /Стан заряду) – це показник, що відображає відсоток залишкової енергії в акумуляторі від його загальної максимальної ємності, аналогічний індикатору палива в автомобілі, і є критично важливим для моніторингу доступної енергії. Він показує, скільки енергії залишилося (0% – розряджений, 100% – повний), допомагаючи уникнути несподіваного розрядження та оптимізувати роботу батареї для продовження її терміну служби.

Для LTO акумуляторів також характерний великий терміном служби – низьковольтні елементи LTO практично не зазнають зростання SEI; досяжний термін служби 15 – 20 років. Твердий електролітний інтерфазний шар (SEI) – це тонкий екран. Він утворюється на аноді літій-іонних акумуляторів. Цей шар з'являється під час перших кількох зарядок. Це відбувається, коли електроліт реагує з анодом. SEI зупиняє подальші реакції між анодом та електролітом. Це допомагає захистити акумулятор від пошкоджень. SEI дуже важливий для літій-іонні батареї. Він діє як щит, що запобігає руйнуванню електроліту. Це допомагає акумулятору зберігати свою потужність протягом тривалого часу.

Термін служби свинцево-кислотних акумуляторів обмежений корозією пластин – зазвичай 5 – 8 років є верхньою межею для VRLA-акумуляторів у режи-

мі плаваючого розрядження/зарядження (тепло скорочує цей термін). Примітно, що тепло є ворогом терміну служби всіх акумуляторів.

Параметр «Температурна чутливість». Температура впливає як на продуктивність, так і на довговічність:

- Низькі температури: При температурах нижче нуля ємність свинцево-кислотних акумуляторів різко падає (при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ доступна ємність може становити $\sim 50\%$ від номінальної, а приймання заряду дуже погане). Літій-іонні акумулятори (NMC/LFP) також демонструють зниження продуктивності: внутрішній опір зростає, знижуючи потужність та ефективність, а доступна ємність падає $\sim 10 - 20\%$ при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Важливо, що зарядження літій-іонних акумуляторів нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ може призвести до утворення літієвих покриттів на аноді, що безповоротно пошкоджує ємність; тому сучасні літій-іонні системи або нагрівають елементи, або перешкоджають зарядження нижче нуля. Акумулятори за технологією LTO є головним винятком – LTO можна заряджати при низьких температурах без утворення покриттів (анодний потенціал вищий, що запобігає осадженню металевого літію). LTO та деякі натрій-іонні елементи можуть працювати при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ або навіть $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ лише з незначною втратою ємності [49]. Наприклад, натрій-іонний акумулятор Freeen для дому зберігає $\sim 90\%$ ємності при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [47], тоді як LFP при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ може забезпечити лише $\sim 60 - 70\%$ і не може бути заряджений, доки не прогріється. На практиці, встановлення в приміщеннях та вбудовані обігрівачі часто підтримують заряд акумуляторів у безпечному діапазоні взимку.

- Високі температури: Тепло прискорює хімічні реакції, що викликають деградацію. На кожні $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище кімнатної температури швидкість втрати ємності приблизно подвоюється. При температурі навколишнього середовища $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ термін служби літій-іонного акумулятора, який може прослужити 15 років при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, може скоротитися до ~ 8 років [38], [39]. Експерименти з календарним терміном служби показують, що акумулятор NMC, що зберігається при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ та заряджений 100% , втрачає $\sim 35\%$ ємності за рік, порівняно з $\sim 5\%$ при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (і

майже нуль при 0 °C) [40]. Акумулятор LFP більш стійкий до тепла, ніж NMC (він має вищий поріг теплового розгону та дещо повільнішу кінетику деградації), але також віддає перевагу температурі < 40 °C. Свинцево-кислотні акумулятори переносять помірне нагрівання з точки зору продуктивності (вони фактично забезпечують вищу ємність при 30 °C, ніж при 20 °C), але висока температура значно збільшує саморозряд і втрату води в затоплених елементах, а також прискорює корозію – акумулятор VRLA, який може прослужити 7 років при 20 °C, може прослужити лише 3 – 4 роки при 30 °C. Теплові втрати: NMC та інші кобальт-оксидні елементи можуть самозайматися, якщо температура елементів досягає ~ 150 – 180 °C (для LFP вона вища, > 270 °C) [48], але це зазвичай спричинено внутрішньою несправністю або сильним перезарядом/перегрівом. Правильно спроектовані системи містять датчики температури та охолодження (для великих комерційних систем). Невеликі домашні системи покладаються на пасивне охолодження та той факт, що при типовому використанні тепловиділення низьке (втрати < 5 % енергії). Все ж рекомендується уникати розміщення акумуляторів у неізольованих сараях, де високо літня спека; для літій-іонних акумуляторів краще використовувати внутрішні кондиціоновані приміщення або затінені вентилязовані корпуси, щоб забезпечити довговічність та безпеку.

- Підсумовуючи, зберігання акумуляторів у діапазоні 20 – 25 °C максимізує термін служби та ефективність. У разі впливу холоду перевагу мають LTO або натрій-іонні акумулятори, тоді як системи LFP часто оснащені функціями само-нагріву для зими. У жаркому кліматі для літій-іонних акумуляторів може знадобитися додаткове охолодження або вентиляція, щоб запобігти прискореному старінню або термічному навантаженню. Свинцево-кислотні системи в жарких умовах потребують технічного обслуговування (частіший полив для затоплених типів тощо) і все одно мають скорочений термін служби.

Параметр «Корисна ємність та глибина розряду»

«Корисна ємність» – це частка номінальної номінальної ємності, яку можна використовувати в звичайних умовах експлуатації без значного скорочення терміну служби. Вона відрізняється залежно від хімічного складу:

- Свинцево-кислотний (AGM/GEL): Хоча технічно можна розрядити свинцево-кислотний акумулятор до стану заряду 0 – 20 % (тобто 80 – 100 % DoD), часте виконання цієї дії значно скоротить термін його служби. Виробники часто вказують термін циклу розряду на рівні 50 % DoD та радять обмежити щоденний розряд до ~ 50 % для тривалого терміну служби [41]. На практиці багато користувачів, що не підключаються до електромережі, встановлюють відключення інверторів таким чином, що використовується лише половина енергії акумулятора. Таким чином, акумулятор AGM на 10 кВт·год може забезпечити лише ~ 5 кВт·год щодня. У надзвичайних ситуаціях можна використовувати додаткову ємність (скажімо, до 20 % SoC), але це трапляється рідко. Крім того, свинцево-кислотний акумулятор необхідно періодично повністю заряджати до 100 %; якщо він працює в діапазоні часткового стану заряду (PSoC) (наприклад, 50 – 80 % багаторазово без повного заряду), настає незворотна сульфатація [39], [42]. Новіші свинцево-кислотні акумулятори з вуглецевим ущільненням (свинцево-вуглецеві, трубчасті OPzV) трохи краще переносять PSoC, але все одно потребують регулярної повної зарядки.

- Літій-іонні (LFP/NMC): Корисна глибина розряду (DD) набагато вища. Ці акумулятори не мають ефекту пам'яті та можуть регулярно циклічно розряджатися до 80 – 90 % без проблем.

Фактично, багато постачальників дозволяють 100 % розряд (0 % SoC) за специфікацією, але гарантійні умови часто передбачають ≤ 90 % DD для щоденного циклу, щоб досягти зазначеної кількості циклів. Для системи LFP ємністю 10 кВт·год зазвичай забезпечує ~ 9 кВт·год корисної ємності. Деякі системи резервують невеликий буфер зверху та знизу (наприклад, по 5 % кожен) для про-

довження терміну служби – це робиться внутрішньо за допомогою BMS. Акумулятори NMC в електромобілях зазвичай також використовуються з глибиною ~ 90 %, хоча для стаціонарного використання виробники іноді резервують більший буфер, щоб гарантувати термін служби. Підсумок: Літій-іонні акумулятори забезпечують значно більшу корисну ємність на встановлений кВт·год – часто майже вдвічі більше, ніж свинцево-кислотні [34]. Це зменшує простір та вартість для заданої потреби в корисній енергії та сприяє нижчій вартості життєвого циклу літій-іонних акумуляторів, незважаючи на вищу початкову ціну.

- Титанат літію (LTO): LTO можна щоразу глибоко циклічно розряджати на 100 % і при цьому досягати величезного терміну служби. Його анодний склад дозволяє уникнути точок напруги, які обмежують термін служби при екстремальних значеннях заряду (SOC) в інших літій-іонних акумуляторах. Акумулятор LTO може ефективно використовувати 100 % своєї номінальної ємності за кожен цикл (і часто має дуже плоску криву заряду, що спрощує відстеження стану заряду). Таким чином, якщо вам потрібно, скажімо, 5 кВт·год на день, достатньо акумулятора LTO на 5 кВт·год (порівняно, можливо, з LFP на 6 кВт·год або AGM на 10 кВт·год).

- Натрій-іонні: Подібно до LFP, очікується, що натрій-іонні елементи будуть глибоко циклізовані до ~ 90 % без спеціальних механізмів деградації (натрій-іонні також не покривають металевий літій, тому повний розряд до 0 % Na^+ не такий ризикований, як покриття літієм, хоча розширення анода може бути проблемою при 0 % заряду).

2.2 Розроблення матриці рішень для вибору типу акумулятора щодо його ефективності застосування в системі накопичення електроенергії

Щоб порівняти батареї за різними пріоритетами оптимізації, пропонується оцінювати кожен тип акумулятора за шкалою від 1 до 5 за чотирма критеріями:

- вартість (на відпущену кВт·год),
- довговічність (кількість циклів розряд/заряд та календарний термін служби),
- безпека (теплова та екологічна)
- продуктивність (ефективність та потужність).

У таблиці 2.2 наведено оцінювання та те, як змінюється рейтинг залежно від того, наскільки вагомий кожен пріоритет. Вищий загальний бал вказує на кращу придатність для цього пріоритетного сценарію. (Оцінювання базується на вищезазначеному аналізі та даних за 2024 – 2026 роки.)

Обґрунтування оцінювання: 5 = відмінно, 1 = погано, відносно цієї сфери. Наприклад, вартість: акумулятора LFP отримує 5 балів (дуже низька приведена вартість зберігання) – його помірна початкова вартість та висока кількість циклів дають йому перевагу [44]. Свинцево-кислотний акумулятор спочатку отримує 4 бали (найдешевший початково), але програє за частотою заміни. LTO отримує 2 бали (дуже дорогий за кВт·год, незважаючи на тривалий термін служби, якщо не використовується повністю). Довговічність: LTO – 5 (десятки тисяч циклів), LFP – 4 (тисячі циклів, потенціал ~ 15 років), NMC – 3 (кілька тисяч циклів або максимум ~ 8 –10 років), свинцево-кислотний – 1 (можливо, 500 глибоких циклів або 3 роки за умови щоденного використання). Безпека: LFP та LTO отримують 5 балів – LFP термічно стабільний, а LTO практично не схильний до внутрішніх коротких дендритів [48]; свинцево-кислотний акумулятор отримує 4 (хімічно небезпечний, але не схильний до займання; добре зарекомендував себе безпечно використання), NMC - 3 (може бути безпечним з належною BMS, але має більш реактивну хімію). Технічні характеристики: LTO - високі 5 (швидкий заряд/розряд, працює в екстремальних умовах низьких температур, висока ефективність при високому C); LFP та NMC - обидва 4 - обидва мають ~ 95 % ефективність та пристойну потужність, хоча NMC має перевагу в щільності енергії та трохи вищий допустимий C-коефіцієнт (збалансований кращою термостійкістю LFP та низьким внутрішнім опором); свинцево-кислотний

акумулятор - 2 - його низька ефективність та нездатність до швидкого заряду/розряду знижують продуктивність.

У зважених оцінках праворуч кожен стовпець підкреслює один пріоритет (при цьому пріоритету надається ~ 50 % ваги, а іншим – 20 %, 15 %).

За найнижчою вартістю LFP посідає перше місце (оцінка 5,0) – що не дивно, враховуючи низьку вартість циклу та відсутність необхідності заміни протягом ~ 10 + років, тоді як свинцево-кислотні акумулятори, які потребують 2 – 3 заміни, зменшують свою перевагу у вартості, незважаючи на низьку початкову вартість.

За максимальною довговічністю LTO перемагає (5,0) завдяки величезному запасу циклів, але LFP посідає друге місце (4,5) і може бути «достатньо хорошим» протягом ~15 років без витрат.

За безпекою LFP та LTO мають однакові найвищі оцінки (обидва за своєю суттю безпечні) – натрій-іонні також мають високі бали, оскільки вони не горючі. За чисту продуктивність (ефективність/потужність) LTO та меншою мірою LFP/NMC отримують найвищі бали – здатність LTO швидко заряджатися/розряджатися та працювати у складних умовах дає їм ідеальні 5,0 балів.

Варто зазначити, що оцінки натрій-іонних технологій є дещо спекулятивними (припускаючи прогнозовані можливості; насправді продукти натрій-іонних технологій 2025 року мають обмежений досвід і вищу вартість, тому вони можуть мати нижчий бал за співвідношенням вартості/продуктивності, поки технологія не дозріє).

Таблиця 2.2 – Зважені оцінки параметрів вартості, тривалості роботи, безпеки та продуктивності акумуляторів

Тип батареї	Економічна ефективність (\$/кВт·год на цикл)	Довголіття (кількість циклів і календарний термін роботи)	Безпека та стабільність	Технічні характеристики (Ефективність та потужність)	Зважена оцінка, орієнтована на			
					вартість	довголіття	безпеку	продуктивність
Літій-іонний акумулятор LFP	5 – Найнижчий показник приведеної вартості зберігання енергії [44]	Термін служби 4 – 10+ років (5 тис. циклів) [4]	5 – Дуже безпечно (не займається при перевантаженнях) [12]	4 – Висока ефективність, хороша потужність (обмежена ~1–2С)	5.0 Ⓔ	4.5	5.0	4.3
Літій-іонний акумулятор NMC	3 – Вища вартість за цикл (потрібна заміна ~6–8 років)	Термін служби 3 – ~8 років (2 тис. циклів) [42]	3 – Помірна безпека (ризик пожежі при перевантаженні)	4 – Висока ефективність, висока потужність (елементи можуть витримувати 2–3С)	3.5	3.3	3.3	3.8
Літій-іонний акумулятор LTO	2 – Високі початкові витрати (>>\$ за кВт·год) [44]	Термін служби 5 – Великий, 15–20 років [43]	5 – Надзвичайно безпечний (без теплового вибою, стійкий до перевантажень) [45]	5 – Велика потужність (10С, холодостійкий)	2.8	5.0 Ⓔ	5.0	5.0 Ⓔ
Свинцево-кислотний	4 – Низькі початкові витрати \$, але низький термін служби	Термін служби 1 – Короткий (заміна ~3–5 років) [46]	4 – Без ризику пожежі (але виділення кислотного газоподібного водню)	2 – Низька ефективність, повільна зарядка, розрядка <1С	3.5	1.8	3.0	2.0
Натрій-іон	3 – Прогнозована низька вартість, але висока ціна першого покоління (нові технології)	Термін служби 4 – потенційно тривалий (~4000+ циклів)	5 – Негорючі, доброякісні матеріали [47]	3 – Хороша ефективність, помірна потужність (вдосконалення технологій)	3.5	4.0	5.0	3.3

2.3 Ризики, безпека та міркування щодо відповідності вимогам

Під час використання акумуляторів у будинках або малому бізнесі безпека та дотримання нормативних вимог мають першочергове значення.

Тепловий вибух та ризик пожежі.

Основна проблема для літій-іонних систем. Акумулятори NMC (та NCA) можуть зазнавати теплового вибуху, якщо їх сильно перезарядити, роздавити або піддати впливу вогню/тепла, вивільняючи легкозаймистий електроліт і кисень з катодів, що призводить до пожеж, які важко загасити. Кілька гучних пожеж ESS (у контейнерах та домашніх приладах) у 2018 – 2022 роках підвищили обізнаність. Хімічний склад LFP акумуляторів набагато стійкіший до такого вибуху; він нагріватиметься при неправильному поводженні, але фосфатний катод не виділяє кисень і менш схильний до займання [48]. Аноди LTO акумуляторів також додають безпеки (відсутність дендритів, нижча напруга елементів). Європейські норми (наприклад, VDE-AR-E 2510-50 у Німеччині) часто вимагають, щоб у приміщенні використовувалися або безпечніші за своєю суттю акумулятори, або щоб було забезпечено пожежогасіння. Тому більшість нових домашніх систем використовують LFP акумулятор через його високий профіль безпеки [49]. Якщо використовуються акумулятори NMC, вони зазвичай містяться в міцних корпусах з тепловим моніторингом. Рекомендується встановлювати будь-який літій-іонний акумулятор у місці подалі від житлових приміщень, наприклад, у гаражі чи підсобному приміщенні, та дотримуватися вказівок виробника.

Механічна та електрична безпека.

Усі хімічні установки повинні бути оснащені належними системами управління акумуляторами (BMS) або контролерами заряду, щоб запобігти перезаряду, перерозряду та коротким замиканням. Літій-іонні акумулятори чутливі до перенапруги (що може спричинити теплові події); тому багаторівневий захист BMS та відповідність транспортним випробуванням UN 38.3 є обов'язковими. Свинцево-кислотні акумулятори також можуть створювати величезні струми короткого замикання, тому в будь-якому випадку необхідні відповідні запобіжники та ізоляція.

Вентиляція та терморегуляція.

Свинцево-кислотні акумулятори (особливо із затопленими комірками) під час заряджання виділяють газоподібний водень, який може накопичуватися та становити небезпеку вибуху. Навіть герметичні AGM/GEL акумулятори мають клапани тиску, які можуть випускати газ у разі перезаряджання. Таким чином, корпуси для свинцево-кислотних акумуляторів повинні мати вентиляцію (згідно з ІЕС 62485-2). Літій-іонні акумулятори не виділяють газів у звичайному режимі роботи; однак, якщо елемент переходить у тепловий розгін, можуть вивільнятися легкозаймісті гази – закриті простори повинні мати шляхи для скидання тиску або випускні шляхи. Що стосується теплового режиму, деякі літій-іонні системи (особливо великі) включають вентилятори або рідинне охолодження (поширене в комерційних системах NMC) – це додає точки обслуговування. Домашні LFP- блоки зазвичай мають пасивне охолодження та не генерують багато тепла (що справедливо для помірних показників C). Монтаж акумуляторної системи має виконуватись із забезпеченням достатньої відстані навколо блоків для розсіювання тепла та уникати прямого сонячного світла на зовнішні шафи.

Екологічні та токсичні ризики.

Свинцево-кислотні акумулятори містять токсичний свинець та сірчану кислоту. Якщо акумулятор трісне або виходить газ, це небезпечна ситуація. Літій-іонні акумулятори містять органічний розчинник-електроліт та летючі метали; хоча вони не дуже корисні для навколишнього середовища, вони герметичні та не становлять ризику хімічного витоку за нормального використання (але якщо вони горять, можуть утворюватися токсичні випари). Переробка: свинцево-кислотні акумулятори є одним з найбільш перероблюваних продуктів (~ 99 % у багатьох регіонах з основними програмами повернення) [50]. Переробка літій-іонних акумуляторів покращується – промислові процеси можуть відновлювати метали, і, зокрема, LFP не містить кобальту/нікелю, що робить його менш проблематичним відходом (фосфат заліза не є токсичним). Директива ЄС щодо акумуляторів також наполягає на квотах на переробку літій-іонних акумуляторів. Натрій-іонні акумулятори

теоретично були б ще більш екологічними (немає екзотичних металів, а солі натрію мають низьку токсичність).

Стандарти відповідності.

У Європі стаціонарні акумулятори повинні відповідати вимогам маркування CE, директивам EMC та стандартам безпеки, таким як IEC 62619 (Вимоги безпеки до вторинних літієвих елементів та акумуляторів, стаціонарне застосування) та IEC 62040 (для систем ДБЖ). Існують також специфічні для кожної країни протипожежні норми. Наприклад, німецький стандарт VdS 3103 визначає безпеку домашнього зберігання, а в США сертифікація UL 9540 (та випробування на вогнестійкість UL 9540A) є надзвичайно важливою. Будь-який обраний акумулятор повинен перед використанням пройти сертифікацію. Транспортування акумуляторів (особливо літій-іонних) суворо регулюється – для доставки необхідно пройти випробування UN 38.3, а також існують обмеження щодо авіаперевезень. Це здебільшого стосується дистриб'юторів (для кінцевих користувачів це означає авторитетні бренди).

Системна інтеграція та гарантія.

Ще одним практичним ризиком є сумісність акумулятора та інвертора. Багато домашніх систем продаються як інтегровані рішення (інвертор + акумуляторний блок). Під час складання необхідно переконатися, що алгоритм заряджання інвертора відповідає акумулятору: наприклад, свинцево-кислотний зарядний пристрій може не перезарядити літій-іонний акумулятор, якщо він належно не налаштований, а літій-іонна система управління акумулятором (BMS) може не працювати, якщо інвертор не відповідає сигналам цієї системи. Гарантії можуть бути анульовані, якщо використовується «несхвалений» інвертор. Для малого бізнесу використання кількох батарейних шаф у паралельній або трифазній конфігурації додає складності – потрібне активне балансування або окрема система BMS для кожного ланцюга. Системи LFP часто дозволяють легко паралельно з'єднувати модулі, тоді як свинцево-кислотні ланцюги необхідно ретельно зрівнювати.

Толерантність до перевантажень.

Акумулятори за технологіями титанату літію (LTO) та LFP загалом вважаються найбільш стійкими літієвими хімічними речовинами до перевантажень. LTO може певною мірою витримувати перезаряд (його максимальна напруга становить близько 2,8 В/елемент проти 4,2 В для інших, тому навіть незначне перезарядження не викликає гальванічного покриття). У лабораторних випробуваннях елементи LTO проколювали або швидко заряджали за мінусових температур без виникнення пожеж [45]. Елементи LFP також можна розчавлювати або пробивати цвяхами, часто без полум'я (вони можуть виділяти газу та диміти, але не горіти сильно). Елементи NMC у таких випробуваннях зазвичай спалахують. З цієї причини в установках максимальної безпеки (віддалені телекомунікаційні будки тощо) іноді обирають LTO, незважаючи на вартість.

Поширення теплового вибуху.

Ризик у великих акумуляторних батареях полягає в тому, що якщо один елемент переходить у тепловий вибух, він може нагріти сусідні елементи («поширення тепла»). Менша схильність елементів LFP до цього допомагає, але критично важлива конструкція системи (відстань, протипожежні бар'єри між модулями тощо). У деяких побутових акумуляторах зараз використовуються запобіжники на рівні елементів та вогнестійкі роздільники для зменшення цього.

Технічне обслуговування

Свинцево-кислотні акумулятори потребують технічного обслуговування (доливання води для затоплених типів, періодичне вирівнювання зарядження для запобігання розшаруванню під час автономного використання). Недотримання цього вимоги несе ризик для довговічності та продуктивності. Літій-іонні акумулятори не потребують обслуговування, але може знадобитися оновлення прошивки BMS або інвертора, а також рекомендується дистанційний моніторинг стану елементів. Малі підприємства з критичними навантаженнями повинні періодично перевіряти стан акумуляторів за допомогою будь-якої наданої системи управління (наприклад, тести ємності кожні кілька років).

Функціонування за низьких температур:

У нашому передбачуваному кліматі (зимові середні мінімуми $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) літій-іонним акумуляторам взимку потрібен особливий догляд. Багато систем мають внутрішні нагрівачі, які включаються для нагрівання акумулятора до $\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед зарядкою. Це споживає певну потужність (наприклад, зарядний пристрій Powerwall використовує близько 300 – 500 Вт для нагрівання, коли це необхідно). Користувачі повинні враховувати дещо знижену чисту ефективність взимку через це самонагрівання. Як варіант, розміщення акумулятора в напівкондиціонованому приміщенні (підвалі) дозволяє уникнути впливу глибоких температур нижче нуля. Свинцево-кислотні акумулятори в холоді просто матимуть меншу ємність, але не зазнають незворотних пошкоджень; однак спроба зарядити замерзлий свинцево-кислотний акумулятор може призвести до розтріскування пластини, тому обидва хімічні елементи воліють заряджати при температурі вище нуля.

Як підсумок, акумулятори LFP мають чудовий профіль безпеки для домашнього використання – завдяки цим перевагам вони тепер є фактичним стандартом для нових житлових систем у 2024 – 2026 роках. Свинцево-кислотні акумулятори залишаються безпечним (негорючим) варіантом за умови вентиляції, але компромісом є значне зниження продуктивності. Системи на основі NMC, якщо вони використовуються, слід встановлювати з особливою обережністю та, ймовірно, на відкритому повітрі або у вогнетривких корпусах. Страхові та місцеві норми також можуть диктувати заходи безпеки (деякі

в Європі вимагають виявлення диму або навіть автоматичного пожежогасіння для акумуляторних систем понад певний розмір – перевірте місцеві правила).

2.4 Рекомендації для вибору типу акумуляторів установки накопичення енергії

Враховуючи аналіз за кількома пріоритетами, сформуємо цільові рекомендації щодо систем зберігання енергії потужністю 5 кВт для дому та малого бізнесу.

За пріоритетом оптимізації

- Найнижча вартість протягом усього терміну служби (TCO/LCOS):
Рекомендовано: Літій-іонний акумулятор LFP (LiFePO_4). LFP пропонує найкраще співвідношення ціни та якості протягом терміну служби системи – хоча його початкова вартість за кВт·год трохи вища, ніж у свинцево-кислотного акумулятора, його здатність витримувати тисячі циклів з мінімальною деградацією означає, що вартість за кВт·год циклів є найнижчою [44]. Наприклад, система LFP вартістю ~7000 доларів США на 10 кВт·год (10-річна гарантія) вироблятиме набагато більше корисної енергії протягом свого терміну служби, ніж свинцево-кислотний акумулятор вартістю ~ 3000 доларів США, який може потребувати заміни через 3 роки. Крім того, висока ефективність LFP (95 % проти ~ 80 % для свинцево-кислотного акумулятора) означає менше втраченої сонячної енергії, що ефективно покращує рентабельність інвестицій. *Компроміси:* Свинцево-кислотний акумулятор може здатися економічно привабливим для дуже рідкісного використання (наприклад, резервного живлення, яке рідко перезаряджається) – оскільки вам може не знадобитися весь термін служби. Однак навіть у режимі очікування свинцево-кислотний акумулятор потребуватиме заміни кожні 5-7 років, і його необхідно обслуговувати. Таким чином, у більшості випадків LFP все ще є більш економічно ефективним у довгостроковій перспективі. Доцільно не використовувати акумулятори NMC, якщо пріоритетом є вартість – короткий термін служби знижує його цінність, а сучасні побутові акумулятори NMC трохи дорожчі за LFP через вміст кобальту/нікелю. LTO не рекомендується з міркувань вартості, за винятком надзвичайно інтенсивних сценаріїв використання (наприклад, віддалене циклічне вмикання/вимкнення мікромережі кілька разів на день); при типовому використанні один цикл/день додаткові цикли LTO ніколи не використовуються повною мірою до календарного старіння або застаріння системи, тому їх використання призводить до переплати за можливості, які не використовуються. Натрій-іонні акумулятори можуть стати недорогою альтернативою в майбутньому (завдяки дешевим матеріалам), але станом на 2025 рік вони все ще перебувають на стадії

зародження – ми поки, що позначаємо їх як «докомерційні», і їх буде переглянуто, як тільки будуть доступні реальні польові дані щодо вартості та терміну служби.

- Максимальна довговічність (цикл та календарний термін служби):
Рекомендовано: LTO (титанат літію) для максимальної довговічності. Якщо головним пріоритетом є акумулятор, який служить найдовше (з точки зору кількості циклів або років), LTO не має собі рівних – він може витримувати понад 15 000 циклів, тобто навіть при 2 циклах на день він може працювати понад 20 років [43]. Він також має чудовий календарний термін служби (згідно з повідомленнями, понад 15 років служби з мінімальним згасанням) та переносить швидке циклічне розрядження та використання PSOC з незначним зносом. *Компроміси:* величезний циклічний термін служби LTO пов'язаний зі значно вищою початковою вартістю та нижчою щільністю енергії, тому ви платите більше та потребуєте більше місця. Для багатьох побутових користувачів ємність LFP у 4000 – 6000 циклів (10 –15 років) більш ніж достатня, що ефективно досягає золотої середини довговічності та вартості. Тому пропозиція: вибирати LTO лише в тому випадку, якщо дійсно потрібно понад ~ 15 років або > 6000 глибоких циклів – наприклад, бізнес-застосування з кількома циклами на день або місце, де заміна акумулятора надзвичайно складна/дорога (віддалений об'єкт, критична система). В іншому випадку, LFP є практичним вибором, який все ще забезпечує дуже високий термін служби (і багато систем LFP все ще зберігатимуть ~ 70 % ємності після 15 років щоденного використання). Свинцево-кислотні та NMC-акумулятори значно відстають у цьому плані: не рекомендуємо їх, коли метою є довговічність. Свинцево-кислотні акумулятори можуть рекламувати термін служби 10-15 років у плаваючому режимі, але це лише за умови неглибокого циклу розрядки-розрядки (20 % DoD); при щоденному використанні з глибоким циклом їх термін служби становить кілька років. NMC, ймовірно, потребуватиме заміни акумуляторного модуля приблизно через 10 років (якщо не раніше) при інтенсивному циклі розрядки-розрядки. LFP, навпаки, повинні прослужити весь

10-15-річний термін служби системи без заміни, що є ключовою причиною, чому вони зараз кращі для стаціонарного зберігання.

- Максимальна безпека (термічна та хімічна стабільність):
Рекомендовано: LFP (LiFePO_4) як найбезпечніший вибір для широкого загалу, або LTO як, можливо, ще безпечніший (хоча й дорожчий) варіант. Як LFP, так і LTO мають відмінні показники безпеки: LFP стійкий до займання навіть за умов сильного зловживання (він виділяє дим, але не вибухає сильно в більшості лабораторних тестів), і не містить токсичних важких металів. Він широко використовується в будинках з дуже малою кількістю інцидентів порівняно зі старішими хімічними системами. LTO, завдяки своєму унікальному аноду, практично виключає ризик внутрішніх коротких замикань (відсутність росту дендритів) [48] і працює при нижчій напрузі елемента, що робить його іскробезпечним; він використовується в критично важливих системах, де безпека є першочерговою (наприклад, аеро-космічна промисловість, військова справа). *Компроміси:* Вибір LTO виключно з міркувань безпеки зазвичай не є економічним – LFP вже надзвичайно безпечний і набагато дешевший, тому, якщо немає конкретних небезпек (можливо, розгортання в небезпечному місці, або абсолютно неможливість виділення газів чи теплових подій, і в цьому випадку додатковий запас LTO може це виправдати), LFP достатньо. Свинцево-кислотні акумулятори також є «безпечним» хімічним елементом з точки зору пожежі (вони не загоряються, як літієві), і їх можна розглядати в ситуаціях, коли ризик пожежі має бути абсолютно мінімізований (наприклад, стара будівля без можливості ліквідувати пожежу) – але зауважте, що навіть свинцеві акумулятори мають міркування безпеки (розливи кислоти, газоподібний водень). Загалом, все ж рекомендуємо LFP над свинцево-кислотними для безпеки, оскільки сучасні системи LFP довели свою безпеку, і ви уникаєте інших ризиків, пов'язаних зі свинцем (і в будь-якому випадку, електробезпека та захист від короткого замикання повинні контролюватися для обох). NMC посідає останнє місце за безпекою – хоча багато продуктів на основі NMC мають хороші показники безпеки, сам хімічний елемент менш схильний до неправильного поводження. Якщо безпека є пріоритетом, було б нерозумно вибирати NMC,

коли доступні LFP або LTO. (До речі, натрій-іонні акумулятори також можуть стати переможцем у сфері безпеки – вони негорючі та навіть мають менший ризик теплового виходу, ніж LFP, що робить їх перспективними для майбутнього безпечного розгортання, але поки вони не будуть доведені та широко доступні, LFP залишаються найкращим безпечним вибором.)

- Максимальна технічна продуктивність (ефективність та щільність потужності). *Рекомендовано:* LTO (титанат літію) для найвищих потреб у продуктивності. LTO може повністю заряджатися за < 15 хвилин і безперервно розряджатися при температурі > 5 °C, чого жоден інший акумулятор у цьому списку не може зробити без шкоди для терміну служби. Він також підтримує продуктивність при екстремальному холоді, чого інші не можуть (без втрати ємності навіть при –20 °C у деяких елементах LTO та можливість заряджання в умовах замерзання). Якщо для застосування потрібні надшвидка реакція, високі сплескові потужності та висока ефективність при таких навантаженнях, LTO є найкращим варіантом. *Компроміси:* Більшість житлових/малих бізнес-сценаріїв насправді не вимагають такої екстремальної продуктивності. Стандартний акумулятор LFP з ємністю від 0,5C до 1C цілком підходить для роботи інвертора потужністю 5 кВт та обробки коротких стрибків напруги – наприклад, типовий модуль LFP може забезпечити 2 C (10 кВт) протягом 5 секунд, що покриває запуск кондиціонера або водяної помпи. Його ККД ~ 95 % означає, що втрачається дуже мало енергії; незначний приріс у кілька відсотків при використанні LTO (~ 90 % - 92 % за аналогічних умов [39]) може не виправдовувати подвоєння вартості. Акумулятори NMC також можуть забезпечувати високу потужність (деякі з них розроблені для пікових струмів автомобілів), а їхня ефективність на рівні LFP у помірних циклах. Але якщо розглядати «технічні характеристики» як надійність під навантаженням, LFP перемагає NMC, оскільки він може підтримувати високу продуктивність без значної деградації (NMC деградував би швидше при постійному високому споживанні C та високій температурі). Тому для більшості користувачів, які бажають високої ефективності та достатньої потужності, LFP залишається рекомендацією. Доцільно зарезервувати акумулятор LTO для справді

вимогливого використання: наприклад, для малого бізнесу, якому потрібно швидко зарядити акумулятор від мережі за 15 хвилин (можливо, для поглинання надлишку або реагування на сигнали регулювання частоти), або для системи, яка має кілька швидких циклів заряджання/розряджання на день (деякі телекомунікаційні або мережеві системи підтримки). У цих випадках здатність LTO працювати циклічніше з меншим зносом та його швидка кінетика роблять його кращим вибором, незважаючи на вартість. Ще один граничний випадок: дуже холодна автономна установка – LTO перевершить інші, оскільки він може заряджатися при мінусових температурах, де LFP потребуватиме нагрівання.

Якщо пікова вихідна потужність є єдиним показником, можна також враховувати, що елементи NMC мають дещо вищу щільність енергії та потужності – якщо простір обмежений і потрібна дуже компактна батарея, яка може видавати, скажімо, 10 кВт з невеликої батареї, батарея на основі NMC може досягти цього, займаючи менше місця, ніж LFP. Але в побутовій системі потужністю 5 кВт розмір зазвичай не є критичним (батареї монтуються на стіну або в шафах з великою кількістю місця). Таким чином, доцільно віддати перевагу LFP за його інші переваги. Якщо питання сформулювати як «яка батарея забезпечує найефективніше зберігання енергії та найкращі характеристики потужності», LFP та LTO по суті однакові за нормальних умов, причому LTO випереджає в екстремальних умовах.

За варіантом використання: домогосподарство проти малого бізнесу.

- Для типового домогосподарства (сонячне власне генерування, резервне живлення): літій-залізофосфатні (LFP) є оптимальним вибором у 2024 – 2026 роках. Вони досягають оптимального рівня ефективності (~ 95 %), довговічності (10+ років), не потребують обслуговування та безпечності для встановлення всередині приміщень. Практично всі нові побутові акумуляторні продукти (останні версії Powerwall від Tesla, LG ESS, BYD, Pylontech, Huawei LUNA тощо) перейшли на LFP з цих причин [49]. Акумулятор LFP потужністю 8 –15 кВт·год у поєднанні з гібридним інвертором потужністю 5 кВт комфортно справлятиметься з щоденним циклічним живленням, забезпечуючи

вечірнє/ нічне живлення з мінімальними втратами, і матиме резервну потужність для випадкових вищих навантажень або перебоїв. Домогосподарства отримують вигоду від високої корисної ємності LFP (наприклад, ви можете використовувати 90 % її під час перебоїв, що забезпечує більше часу резервного живлення). Надійний термін служби означає, що він, ймовірно, прослужить довше, ніж гарантія інвертора. Ми також рекомендуємо LFP для домогосподарств через їх широку доступність та конкурентну ціну; станом на 2025 рік вартість домашніх акумуляторів LFP за кВт·год значно знизилася, оскільки конкурує багато брендів, тому домовласники отримують вигідну ціну та перевірені технології.

- Для домогосподарства, яке спеціально орієнтоване на резервне живлення з нечастим використанням (наприклад, мережа здебільшого надійна, але вам потрібне аварійне живлення), свинцево-кислотні AGM-акумулятори можна розглянути в рамках бюджету – вони дешевші на випадок випадкових відключень електроенергії. Однак знадобиться більший блок (оскільки можна використовувати лише 50 %, якщо ви хочете, щоб він працював довго). Навіть у цьому сценарії багато хто все одно обирає LFP, оскільки він також покриває майбутнє використання (наприклад, потенційну зміну часу використання) та усуває клопоти з обслуговуванням/заміною акумуляторів. Рекомендація: Вибирайте LFP, якщо початковий бюджет не надзвичайно обмежений, а використання є справді рідкісним аварійним резервним живленням, і в цьому випадку менший блок AGM з генератором може бути тимчасовим рішенням (визнаючи його обмеження).

- Для малого бізнесу (наприклад, невеликої виробничої майстерні, роздрібного магазину чи офісу) варіанти використання можуть відрізнитися – часто це включає скорочення пікового навантаження для зменшення плати за комунальні послуги, арбітраж енергії за часом використання та, можливо, резервне копіювання для критичних навантажень. Таким чином, вимоги можуть встановлювати вищий рівень вихідної потужності (забезпечення короткочасних стрибків напруги) та кількості циклів (якщо працюють щоденні піки). Тим не менш, LFP, як правило, є кращим вибором для невеликих комерційних

накопичувачів з тих самих причин, що й для житлових приміщень: він економічно ефективний протягом тисяч циклів та безпечний. Бізнес може обрати трохи більший акумулятор (наприклад, 20 – 30 кВт·год) для обробки як перемикачів енергії, так і кількох годин резервного копіювання для критичних ланцюгів. Здатність LFP видавати високу потужність (багато систем можуть витримувати 2С, тому 20 кВт·год можуть витримувати пікову потужність 40 кВт) означає, що він може покривати короточасні піки. Якщо пікові навантаження бізнесу дуже високі порівняно з енергетичною потужністю – скажімо, заводський двигун, який при пуску втричі перевищує середнє навантаження – однією зі стратегій є збільшення розміру акумулятора LFP (щоб коефіцієнт заряду на елемент був низьким, і він міг би комфортно забезпечити пік). Навіть з урахуванням збільшення розміру, LFP зазвичай залишається економічно оптимальним.

Однак, якщо застосування в малому бізнесі передбачає дуже високу циклічність або пропускну здатність – наприклад, віддалений телекомунікаційний об'єкт з кількома циклами вимкнення дизельного палива на день або додаткове застосування мережевих послуг – тоді LTO може розглядатися як варіант. Невелика промислова установка, що працює 2 – 3 цикли на день при високій температурі, може зносити LFP приблизно за 5 років, тоді як LTO зможе витримувати його протягом 15+ років. Крім того, якщо підприємство знаходиться в холодному кліматі, і акумулятор повинен знаходитися зовні (скажімо, офісна будівля взимку), холодостійкість LTO може зменшити складність систем опалення. Таким чином, для малого бізнесу, який надає пріоритет максимальній пропускну здатності та мінімальному часу простою, і якщо дозволяє бюджет, LTO може бути виправданим. Ми все ще загалом рекомендуємо LFP для більшості потреб малого бізнесу та використовуємо LTO лише в особливих випадках (дуже часте циклічне вмикання/вимкнення, суворі умови навколишнього середовища або абсолютно нульова толерантність до будь-якої заміни/обслуговування акумулятора протягом ~ 10+ років).

Щодо безпеки комерційного використання: Малий бізнес (особливо той, що відкритий для громадськості, наприклад, магазин) повинен схилитися до безпечніших хімікатів – LFP знову ідеально підходить. Якщо акумулятор встановлено в зоні доступу для співробітників (електромісцева), забезпечте наявність знаків та проведення навчання з безпеки роботи з акумуляторами. Якщо використовується велика акумуляторна кімната, використання пожежогасіння (системи інертного газу) може бути обов'язковим згідно з нормативними актами; LFP зменшує ймовірність його необхідності.

Висновки до другого розділу.

Домогосподарство проти бізнесу: Обидва варіанти використання сходяться на LFP як основній рекомендації через його збалансовану продуктивність. Домогосподарство цінує тривалий термін служби та принцип «налаштував і забув» (відсутність обслуговування, інтегровані системи), які забезпечує LFP. Бізнес цінує надійність та нижчі експлуатаційні витрати – знову ж таки, LFP. Лише в крайніх сценаріях (високоциклічна робота або надзвичайні потреби в електроенергії) ми б сказали, що бізнес повинен розглянути LTO або, можливо, підхід подвійної хімії (наприклад, невеликий суперконденсатор або LTO - банк для обробки дуже високих піків у поєднанні з LFP - банком для великої кількості енергії – передова схема, яка іноді зустрічається в мікромережах). Наразі така складність рідко потрібна в масштабі 5 кВт.

Ще одне зауваження щодо майбутніх технологій : натрій-іонні акумулятори вже на горизонті – малий бізнес або домовласник може задуматися, чи варто їм чекати на них. Наша порада: станом на 2025 рік, поки що залишайтеся з LFP. Натрій-іонні акумулятори демонструють багатообіцяючі результати щодо безпеки та роботи в холодну погоду, а початкові розгортання (наприклад, блок Freeen потужністю 10 кВт·год) свідчать про те, що вони можуть працювати, як заявлено, з приблизно 4000 циклами. Якщо і коли це станеться, вони можуть стати чудовим варіантом для стаціонарного зберігання енергії (особливо якщо ціни на літій зростуть або ланцюги поставок обмежаться). До

того часу LFP залишаються еталонним рішенням для зберігання енергії в батареях для житлових та невеликих комерційних потреб.

На завершення, система для житлових приміщень/малого бізнесу потужністю 5 кВт у 2024 – 2026 роках досягне найвищої ефективності та найкращої загальної продуктивності з акумулятором на основі LFP, враховуючи його чудову ефективність у повному циклі, здатність до глибокого розряду, тривалий термін служби та профіль безпеки. Свинцево-кислотні акумулятори, хоча історично були популярними в автономних будинках, не можуть конкурувати за продуктивністю або вартістю протягом усього терміну служби для щоденного циклу – їхня ефективність може бути виправданою лише в нішевих випадках з низьким рівнем використання. Літій-іонні акумулятори NMC, які домінували в ранніх продуктах ESS, зараз значною мірою затьмарені LFP для стаціонарного використання через проблеми безпеки та терміну служби. А екзотичні варіанти, такі як LTO, задовольняють випадки високого класу використання, де їхні унікальні переваги виправдовують їхню вартість. Ми також звернули увагу на те, що вибір акумулятора необхідно адаптувати до профілю навантаження: для постійного щоденного циклу оберіть хімічний склад, який може витримувати багато циклів (LFP або LTO).

РОЗДІЛ 3

ОПТИМАЛЬНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ З СЕМ ПОТУЖНІСТЮ 5 кВт ДЛЯ ЖИТЛОВОЇ МІКРОМЕРЕЖІ АБО МІКРОМЕРЕЖІ НЕВЕЛОКОГО ПІДПРИЄМСТВА

Приватну житлову мікромережу з акумуляторною системою потужністю 5 кВт можна оптимізувати за допомогою генерування енергії з відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії, акумуляторного її накопичення, підключення до зовнішньої електромережі та менеджменту попиту на енергії побутовими навантаженнями. Запропонована архітектура містить гібридний інвертор та інтелектуальний контролер СУЕ для координації потоків потужності: заряджання акумулятора надлишковою генерацією фотовольтаїчної енергії, розряджання для живлення навантажень під час пікових годин або перебоїв, а також взаємодія з мережею для максимізації власного споживання та економії часу використання.

Для оцінки оптимальних архітектур таких систем припускаємо однофазну мережу 230 В/50 Гц у Україні або Європі з обмеженням потужності 5 кВт та ємністю акумуляторів $5 \div 15$ кВт·год. Стратегії керування системою варіюються від простої логіки на основі правил (заряджання, коли сонячної енергії багато, розряджання під час високого попиту) до прогнозних алгоритмів на основі штучного інтелекту, які прогнозують виробництво та навантаження сонячної енергії для оптимізації витрат та терміну служби акумуляторів. СУЕ надає пріоритет критичним навантаженням під час перебоїв та забезпечує зменшення пікового навантаження, щоб обмежити споживання електроенергії з мережі. Життєвий цикл акумуляторів захищений системою управління акумуляторами (BMS) та політиками СУЕ (наприклад, запобігання глибоким розрядом та екстремальним температурам), що забезпечує безпеку та довговічність. Порівняльний аналіз технологій акумуляторів (літій-іонні LFP проти NMC, свинцево-кислотні тощо) за чотирма цілями оптимізації (виконаний в Розділі 2 магістерської роботи) – найнижча вартість, найдовший термін служби, найвища безпека та найкраща продуктивність – спрямовує

остаточні рекомендації щодо економічно ефективної та надійної мікромережі для дому або малого бізнесу.

Таблиця 3.1. Припущення та умови експлуатації

Параметр	Припущення / Значення за замовчуванням
Живлення від акумуляторного інвертора	5 кВт (двонаправлений, 1-фазний, 230 В змінного струму)
Ємність акумулятора	10 кВт·год номінально (рівні оцінювання також: 5 кВт·год, 15 кВт·год)
Сонячна фотоелектрична система	Дахова енергосистема ~5 кВт (з підключенням постійного струму або змінного струму через гібридний інвертор)
Підключення до мережі	230 В, 50 Гц, однофазний, відповідає стандартам ЄС/UA (захист від створення енергоострівного режиму)
Побутове навантаження	Типовий житловий профіль (споживання об'єму електроенергії ~15 – 20 кВт·год/день, пікове значення потужності ≤ 5 кВт)
Підпанель критичних навантажень	Основні кола (освітлення, турбований газовий котел опалення та ГВП, холодильник тощо) загальною потужністю ≤ 5 кВт для резервного режиму
Температура навколишнього середовища	-10 °C до +35 °C (розміщення акумулятора в приміщенні передбачається для зменшення екстремальних температур)
Шаблон використання циклу	~1 повний цикл на день (зарядка сонячною батареєю вдень, розрядка вночі); плюс часткові цикли для зменшення пікової активності (наприклад, +20% циклів для вечірніх піків)
Тарифна структура	Передбачуване ціноутворення на електроенергію залежно від часу використання (TOU) (пікові та позапікові тарифи); мінімальний нетто-облік (власне споживання має пріоритет над експортом)
Термін служби системи	≥ 10 років цільової експлуатації (≈ 3650 циклів), що відповідає типовим гарантійним термінам акумулятора

Якщо параметр не вказано, застосовуються вищевказані значення за замовчуванням. Аналіз чутливості охоплює ємність акумулятора (5/10/15 кВт·год) та моделі використання (щоденне циклічне використання проти додаткових циклів зменшення пікового навантаження), а також вплив температури на продуктивність та термін служби.

3.1 Архітектура та компоненти системи

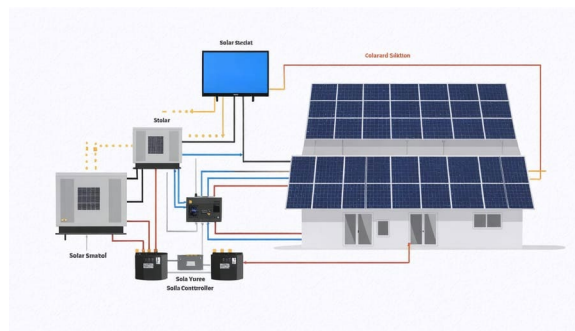


Рисунок 3.1 - Ілюстративна схема домашньої мікромережі з фотоелектричними панелями, акумуляторним накопичувачем, інвертором, контролером EMS та підключеннями до мережі/навантаження

Запропонована архітектура EMS складається з наступних ключових компонентів, що працюють разом.

Генерація фотоелектричної енергії.

Сонячна фотоелектрична батарея на даху (≈ 5 кВт потужності) перетворює сонячне світло на постійний струм, який подає енергію на гібридний інвертор або контролер заряду сонячної енергії. У сонячні періоди фотоелектричні панелі можуть безпосередньо живити побутові навантаження та заряджати акумулятор; будь-який надлишок може подаватися в мережу, якщо це дозволено.

Зберігання енергії в акумуляторі.

Акумуляторний блок потужністю 5 кВт, ~ 10 кВт·год (літій-іонний у рекомендованій конструкції) накопичує надлишок енергії для подальшого використання. Акумулятор керується системою керування акумулятором (BMS), яка контролює стан заряду (SOC), напругу, струм і температуру для забезпечення безпечної роботи. BMS встановлює обмеження (наприклад, відключення при високому/низькому рівні заряду або температурі) для захисту акумулятора та зв'язується з EMS.

Двонаправлений інвертор/зарядний пристрій

Гібридний інвертор (вихід змінного струму 5 кВт) з'єднує компоненти постійного струму (фотоелектричні панелі та акумулятор) та сторону змінного струму (мережа та навантаження). Він перетворює постійний струм у змінний для живлення побутових навантажень або подачі в мережу, а також змінний струм у постійний для заряджання акумулятора від фотоелектричних панелей або мережі. Інвертор працює як у режимі мережевого підключення (синхронізація з мережею), так і в режимі ізолюваного живлення (формування локальної мережі змінного струму під час перебоїв). Він відповідає мережевим нормам безпеки (включаючи вимкнення з функцією запобігання ізолюваному живленню у разі збою мережі).

Контролер EMS:

Система управління енергією (СУЕ) є «мозком» установки – це може бути вбудований контролер в інверторі або окремий блок (часто з хмарним

підключенням для оновлень та віддаленого моніторингу). Вона контролює дані в режимі реального часу (вихід фотоелектричних систем, рівень заряду акумулятора, навантаження, стан мережі) та виконує алгоритми керування для визначення потоків енергії. СУЕ надсилає команди інвертору (наприклад, заряджати або розряджати акумулятор при X кВт, за необхідності обмежувати вихід фотоелектричних систем), а також може активувати реле або інтелектуальні перемикачі для керування навантаженням (відключення або відновлення навантаження) та відключення від мережі. Вона забезпечує скоординовану роботу та оптимізує роботу для досягнення обраних цілей (економія коштів, готовність до резервного копіювання тощо).

Навантаження (критичні та некритичні)

Електричні навантаження домогосподарства поділяються на групу критичних навантажень (важливі кола, які акумулятор підтримуватиме під час відключень) та групу некритичних навантажень (відкладені або потужні навантаження, які можна відключити в режимі острова для збереження енергії). Система EMS/резервного живлення автоматично надає пріоритет важливим навантаженням під час резервного живлення від акумулятора, забезпечуючи першочергове живлення критично важливих пристроїв (наприклад, холодильника, освітлення, інтернету, медичних приладів) [58]. Під час нормальної роботи EMS також може планувати або обмежувати циклічні недетерміновані навантаження (такі як зарядні пристрої для електромобілів, водонагрівачі) відповідно до періодів високої сонячної енергії або позапікової потужності мережі.

Інтерфейс мережі

Система підключається до комунальної мережі в точці спільного підключення (PCC) через інтелектуальний лічильник та пристрій мікромережевої взаємодії (MID) (часто це автоматичний перемикач або вбудоване реле в інверторі). MID/перемикач чітко відключає домашню мікромережу від мережі під час перебоїв або нестабільності мережі, запобігаючи будь-якому зворотному потоку для безпеки [52], [53]. Коли живлення мережі справне, система енергопостачання (EMS) може отримувати енергію з мережі або

експортувати надлишок до неї, дотримуючись заздалегідь визначених режимів або тарифних стимулів. Пара трансформаторів струму (СТ) в мережі вимірює імпорту/експорт потужності в режимі реального часу, що дозволяє EMS точно контролювати обмін енергією з мережею [54].

Потік даних та керування:

Система управління енергоспоживанням (EMS) безперервно збирає дані з датчиків та підсистем – вихідну потужність фотоелектричних систем від MPPT-трекера інвертора, стан акумулятора від BMS (%), напругу, температуру, споживання електроенергії вдома від датчиків СТ або інтелектуального лічильника, а також параметри мережі (напруга, частота, перебої) від MID. Вона також може використовувати зовнішні дані (наприклад, прогнози погоди для фотоелектричних систем, ціни на електроенергію на наступний день), якщо використовується прогнозне керування. На основі цих вхідних даних EMS зазвичай приймає рішення щодо керування кожні кілька секунд або хвилин. Наприклад, якщо виробництво сонячної енергії перевищує поточне навантаження, а акумулятор не повністю заряджений, EMS накаже інвертору спрямувати надлишкову фотоелектричну енергію в акумулятор (зарядка) [53]. Якщо акумулятор досягає свого ліміту заряду акумулятора, EMS може експортувати надлишок до мережі (якщо це дозволено) або обмежити генерацію фотоелектричних систем, щоб уникнути перезарядки. І навпаки, ввечері, коли навантаження високе, а фотоелектричні системи низькі, EMS розряджатиме акумулятор для живлення будинку, зменшуючи або усуваючи імпорту електроенергії з мережі.

Система управління енергоспоживанням (EMS) підтримує заряд акумулятора в безпечних межах, визначених системою BMS. Якщо заряд акумулятора досягає мінімального рівня заряду (наприклад, 20 %), він переводиться в режим заряду, щоб уникнути глибокого розряду, який може скоротити термін його служби. Під час відключення мережі контролер подає сигнал перемикачу на автономне живлення будинку, а потім плавно перемикає інвертор у режим живлення від акумулятора; не критичні навантаження можна відключити, і живлення подається лише на критичну підпанель, щоб підтримувати роботу

основних приладів [51]. Коли живлення від мережі стабілізується, EMS повторно синхронізується та знову підключається до мережі, відновлюючи нормальну роботу.

3.2 Опис алгоритму роботи

За типових умов EMS підтримує оптимальний баланс: максимізує власне споживання сонячної енергії, підтримує акумулятор у середньому діапазоні заряду для ефективного використання та резервного копіювання, а також мінімізує використання дорогої енергії з мережі. У періоди пікових тарифів вона сприяє розряду акумулятора для живлення будинку (уникаючи купівлі дорогої електроенергії) [53]. У періоди позапікових годин (або якщо доступна надлишкова дешева сонячна чи позапікова енергія з мережі) вона заряджає акумулятор, щоб накопичена енергія була доступна на потім. Вона також стежить за піковими навантаженнями – якщо вмикаються великі прилади, EMS може миттєво підтримувати пікове навантаження за допомогою енергії з акумулятора (пікове скорочення), щоб уникнути споживання понад 5 кВт з мережі або відключення головного вимикача. Всі ці рішення приймаються автоматично на основі налаштованої стратегії керування.

Стратегії управління системи енергетичного менеджменту

Ефективне керування мікромережею досягається за допомогою ієрархії стратегій в рамках EMS, починаючи від базової логіки на основі правил і закінчуючи передовими алгоритмами прогнозування.

Керування на основі правил (RBC):

Простий, детермінований набір правил формує базову поведінку EMS. Ці правила використовують рішення на основі порогів, часто пов'язані з рівнем заряду акумулятора, вихідною потужністю фотоелектричних систем та рівнями навантаження. Наприклад: «Якщо рівень заряду акумулятора $> 90\%$ і фотоелектричні системи активні, то експортувати надлишкові фотоелектричні системи до мережі» або «Якщо навантаження > 5 кВт (порог), розрядити акумулятор, щоб підтримувати споживання енергії в мережі на рівні максимум 5 кВт» (правило скорочення пікових значень). EMS на основі правил є надійним та швидкодіючим, оскільки рішення є простими логічними оцінками.

Вона зазвичай зустрічається в комерційних акумуляторних системах – укомплектовані спеціалізованими алгоритмами RBC можуть керувати багатоцільовими системами, такими як підтримка певного резерву заряду та мінімізація імпорту даних з мережі без складних обчислень [55], [56]. Перевагою RBC є надійність та простота: вона вимагає мінімальної обчислювальної потужності та може реагувати на зміни в режимі реального часу. Однак, суто підходи, засновані на правилах, не завжди можуть давати оптимальний економічний результат, оскільки їм бракує передбачення – вони діють недалекоглядно, виходячи з поточних умов.

Політики на основі SOC (State of Charge / Стан заряду)

Щодо керування RBC, багато реалізацій EMS включають специфічні стратегії, пов'язані зі станом заряду акумулятора. Наприклад, правила резервування SOC гарантують, що акумулятор залишається, наприклад, на рівні $\geq 20\%$ SOC, резервному для резервного копіювання під час відключення або для покриття вечірнього піку. Аналогічно, гістерезис SOC може запобігти швидким коливанням (циклічному перемиканню заряду/розряду), визначаючи різні тригерні точки заряду та розряду (наприклад, розряд починати лише тоді, коли $SOC > 80\%$ і зупинитися на 40%). Правила на основі SOC також керують відключенням заряду для продовження терміну служби – наприклад, не заряджати вище 90% , окрім випадків очікування відключення або відомого високого вечірнього навантаження. Ці політики захищають стан акумулятора, уникаючи стресових станів високого або низького заряду, та забезпечують його доступність для критичних потреб.

Прогнозне керування та планування:

Виходячи за рамки статичних правил, прогнозна система управління енергоспоживанням (СУЕ) використовує прогнози та алгоритми оптимізації (часто модельно-прогнозируюче керування, MPC) для планування заряджання/розряджання на майбутній горизонт (зазвичай на 24 години вперед). Вхідні дані для прогнозного керування включають прогнози погоди (для прогнозування генерації сонячних фотоелектричних систем), історичні або вивчені моделі навантаження та відомі графіки цін на електроенергію на наступний день.

Моделюючи поведінку акумулятора та системи, СУЕ може визначити оптимальний графік – наприклад, зарядити акумулятор до 80 % до полудня, якщо очікується хмарний день, або розрядити більш агресивно перед прогнозованим сонячним днем, щоб максимізувати використання майбутньої сонячної енергії . Прогнозна система управління енергоспоживанням може значно покращити економію коштів та ефективність системи, передбачаючи події, а не просто реагуючи. Дослідження показують, що прогнозні алгоритми (такі як ті, що мають MPC) можуть ще більше скоротити витрати на електроенергію та зменшити пікові навантаження порівняно з простим керуванням на основі правил, хоча й з більшою складністю [58], [59]. Підхід на основі штучного інтелекту може забезпечити до ~ 30 % додаткової економії та покращити термін служби обладнання завдяки розумнішому циклу [60]. Недоліком є потреба в точних моделях та прогнозах; помилки в прогнозуванні (наприклад, неочікуваний шторм, що знижує вихід фотоелектричних систем) можуть призвести до неоптимальних рішень. Таким чином, прогнозоване керування часто реалізується за допомогою резервних правил – якщо прогнози не відповідають дійсності, система повертається до безпечних правил за замовчуванням.

Стратегії на основі штучного інтелекту та машинного навчання

Найновіші розробки систем енергопостачання (2024 – 2026) все частіше включають машинне навчання для покращення прийняття рішень [61], [62]. ШІ можна використовувати кількома способами: прогнозування навантаження (використання даних про минуле споживання та навіть даних у режимі реального часу, таких як заповненість або погода, для прогнозування піків використання), прогнозування сонячної енергії (використання даних про погоду, можливо, супутникових знімків) та навчання з підкріпленням або оптимізація, яка вивчає найкращу стратегію заряджання з досвіду. Наприклад, система енергопостачання на основі штучного інтелекту може вивчати моделі поведінки домовласника (коли відбувається заряджання електромобіля, коли використовується система опалення, вентиляції та кондиціонування повітря) та автоматично коригувати використання акумулятора або навіть налаштування

термостата, щоб вирівняти піки попиту. Вона також може розпізнавати, коли заряджатися від мережі за низькими нічними тарифами, щоб підготуватися до майбутнього пікового періоду. Ці підходи на основі штучного інтелекту можуть координувати кілька цілей – мінімізувати витрати, а також мінімізувати деградацію акумулятора, уникаючи непотрібних циклів [63]. Вони ефективно створюють енергетичну екосистему розумного дому, яка з часом покращується. Однак, керування на основі штучного інтелекту вимагає надійного підключення до даних (для хмарних алгоритмів або потоків даних), надійної кібербезпеки (для захисту команд керування) та ретельної перевірки для забезпечення безпеки. Зазвичай це шари поверх базових елементів керування – наприклад, ШІ може рекомендувати оптимальний графік, але остаточні команди все одно проходять обмеження, встановлені BMS, та перевірки безпеки на основі правил (жодна дія ШІ не може порушувати безпечні межі акумулятора або правила мережі).

На практиці рекомендується гібридна стратегія керування. Система управління енергопостачанням (СЕМП) використовує логіку на основі правил для безпеки ядра та керування в режимі реального часу (швидкі реакції, такі як відключення при збоях, захист від перевантаження, базові правила заряджання), доповнену прогнозною оптимізацією, яка періодично оновлює задані значення (наприклад, щогодини СЕМП може оновлювати цільовий рівень заряду (SOC) на наступні кілька годин на основі прогнозів ШІ). Це забезпечує надійну роботу (правила обробляють будь-які непередбачені ситуації), одночасно забезпечуючи економічну ефективність за допомогою прогнозування. Примітно, що СЕМП на основі правил є обчислювально легка та дуже швидка, що вигідно в критичних для часу сценаріях – одне дослідження показало, що RVC виконується в 100 разів швидше, ніж повна оптимізація MPC, що робить його кращим, коли обчислювальні ресурси обмежені або для негайного керування [56], [64]. Тим часом прогнозоване керування забезпечує кращу продуктивність за певними показниками (наприклад, зменшення пульсацій струму або більш оптимальне циклування заряду/розрядки акумулятора) [15], тому поєднання сильних сторін обох є ідеальним.

3.3 Режими керування

Система управління енергоспоживанням (EMS) зазвичай може бути налаштована в таких режимах, як максимізація власного споживання, оптимізація часу використання, лише резервне копіювання або користувацький режим. У режимі власного споживання (поширеному в сценаріях мережевого обліку в ЄС) EMS надає пріоритет використанню сонячної енергії та акумуляторів для дому, мінімізуючи експорт, тим самим використовуючи мережу лише як крайній засіб. В оптимізації TOU (часу використання) EMS може періодично заряджати акумулятор від мережі в години поза піковою енергією (дешеві години) для використання в години пікової енергоспоживання (дорогі години) – по суті, арбітражуючи ціни на енергію. Режим лише резервного живлення (якщо його обрано користувачем) підтримуватиме акумулятор переважно повністю зарядженим і розряджатиметься лише під час перебоїв, що максимізує доступність резервного живлення, але відмовляється від щоденної економії коштів. Рекомендований режим роботи часто поєднує ці два режими: постійно підтримувати резервний заряд (наприклад, 20 % SOC), але в іншому випадку використовувати акумулятор для власного споживання та оптимізації TOU. EMS плавно переходить між режимами, коли змінюються умови (наприклад, якщо відбувається відключення електроенергії, вона миттєво перемикається в режим резервного живлення).

3.4 Пріоритетність навантаження та зменшення пікових навантажень

Пріоритизація навантаження.

Під час проектування системи енергопостачання вдома важливо розрізнити критичні та некритичні навантаження. Критичні навантаження (такі як освітлення, охолодження, опалення, зв'язок, системи безпеки, важливе медичне обладнання тощо) – це ті, які повинні бути живими під час відключення електроенергії. Вони підключені до окремої панелі критичного навантаження, яку інвертор живить в острівному режимі. Система енергопостачання гарантує, що ці життєво важливі навантаження отримують найвищий пріоритет для живлення. Під час відключення електроенергії система

автоматично відключає або регулює не критичні навантаження, щоб заощадити енергію для основних потреб.

Наприклад, якщо акумулятор розряджається під час тривалого відключення, система енергопостачання може відключити помпу басейну або гарячого водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря, щоб продовжити заряд акумулятора для критичних потреб. Навіть за нормальної роботи пріоритизація може відігравати певну роль: якщо акумулятор майже розряджений, а сонячної енергії недостатньо, система енергопостачання може тимчасово вимкнути додаткові навантаження (такі як зарядний пристрій для електромобілів або посудомийна машина), щоб уникнути споживання дорогої пікової електроенергії від мережі – по суті, це форма реагування на попит на домашньому рівні. Сучасні продукти системи енергопостачання для дому часто включають інтелектуальні контролери навантаження або інтеграцію з інтелектуальними розетками Інтернету речей, що дозволяє автоматизовано керувати приладами. Це дозволяє використовувати такі стратегії, як запуск водонагрівача або заряджання електромобіля опівдні, коли сонячна енергія висока (зменшення циклів розряду акумулятора та покращення використання сонячної енергії), або попереднє охолодження/попереднє нагрівання будинку, коли доступна надлишкова енергія. Таке перерозподіл навантаження підвищує загальну ефективність та узгоджує використання з генерацією.

Зменшення пікового навантаження

Зменшення пікового навантаження означає використання акумулятора для зменшення пікових стрибків споживання електроенергії з мережі, тим самим обмежуючи максимальне навантаження, яке фіксує комунальне підприємство (або головний «запобіжник» будинку). На практиці, система управління енергоспоживанням (EMS) контролює загальне навантаження будинку; якщо воно починає перевищувати встановлений поріг (наприклад, 5 кВт, що може бути контрактним лімітом мережі або метою для уникнення вищих тарифних категорій), вона негайно розряджає акумулятор, щоб забезпечити додаткову потужність, щоб споживання електроенергії з мережі залишалось на рівні 5 кВт або нижче.

Наприклад, якщо електрична духовка та чайник вмикаються одночасно, що викликає пік 7 кВт, EMS може відреагувати, подаючи ~ 2 кВт від акумулятора, щоб підтримувати імпорт електроенергії з мережі на рівні 5 кВт. Це дозволяє уникнути перевантаження підключення до мережі та може зменшити плату за споживання або тарифи в пікові години. Це також запобігає випадковим спрацьовуванням автоматичних вимикачів у системах, де ліміти інвертора або мережевий запобіжник перегорають при перевищенні певного струму.

Зменшення пікового навантаження особливо корисне для малого бізнесу з тарифами з платою за споживання – зменшення щомісячних пікових значень лише на кілька кВт може значно знизити рахунки. Навіть для будинків деякі європейські тарифи мають компоненти, що базуються на піковому навантаженні, або просто може бути бажаним не навантажувати підключення до мережі.

Система управління енергоспоживанням (EMS) може реалізовувати зменшення пікового навантаження як у режимі, прив'язаному до мережі (як описано, згладжуючи споживання електроенергії), так і в режимі островного навантаження (керуючи навантаженням, щоб не перевищувати ліміт вихідної потужності інвертора 5 кВт). В режимі островного навантаження зменшення пікового навантаження – це, по суті, управління навантаженням – наприклад, якщо ввімкнення фена призводить до загального перевищення потужності 5 кВт, EMS може тимчасово знизити навантаження (наприклад, вимкнути водонагрівач), щоб залишатися в межах лімітів. У режимі мережі, оскільки мережа технічно може постачати великі навантаження, мотивація є економічною – уникати піків, які коштують дорожче. Система управління енергоспоживанням на базі штучного інтелекту може навіть передбачити пік (наприклад, знаючи, що щовечора о 19:00 певні прилади викликають пікове навантаження) та проактивно розряджати акумулятор безпосередньо перед цим і під час цього часу, щоб вирівняти профіль. Зменшуючи пікове навантаження, EMS не тільки економить кошти, але й зменшує навантаження як на акумулятор (короткі сплески навантаження обробляються акумулятором, який

може реагувати швидше, ніж нарощування потужності мережі), так і на мережу (допомагаючи підтримувати стабільність мережі).

Деякі системи включають суперконденсатори або вдосконалену силову електроніку для допомоги в подоланні дуже швидких піків, але в житлових умовах літієва батарея, що реагує протягом секунди, зазвичай достатньо швидка, щоб ефективно позбутися піків.

Координація з навантаженнями

Система управління енергопостачанням (СУЕ) часто використовує комбінацію методів для управління навантаженнями: жорстке керування (регулювання, тобто вимкнення некритичних навантажень за допомогою реле або розумних розеток за необхідності) та м'яке керування (регулювання або планування навантажень). Наприклад, зарядні пристрої для електромобілів та системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є кандидатами на використання керуючих сигналів – багато зарядних пристроїв для електромобілів можуть приймати зовнішнє керування для зниження швидкості зарядки, а сучасні термостати можуть дозволяти незначне коригування використання змінного струму.

Приклад на основі правил: якщо загальне навантаження > 4 кВт, а заряд акумулятора < 30 % SOC, то зарядку електромобіля слід відкласти на потім. Це запобігає подальшому розрядженню низького заряду акумулятора в години пік. Загалом, пріоритетність навантаження гарантує, що найважливіші функції будинку продовжують виконуватися з високою надійністю, тоді як менш важливі або гнучкі за часом навантаження керуються для підвищення ефективності та витрат.

3.5 Захист акумулятора та оптимізація життєвого циклу

Захист акумулятора та подовження терміну його служби є основною функцією EMS та BMS разом. Ключові заходи включають:

- Управління глибиною розряду (DoD): Як правило, уникнення дуже глибоких розрядів ($< 10 - 20$ % SOC) та перезаряджання ($> 90 - 100$ % SOC) значно покращує термін служби акумулятора . Система управління

енергоспоживанням (EMS) забезпечує дотримання обмежень SOC, рекомендованих для хімічного складу акумулятора – наприклад, вона може використовувати лише діапазон 10 % – 90 % SOC для щоденного циклу заряджання/розряджання, залишаючи буфер на обох кінцях. Це зменшує навантаження, оскільки високий рівень SOC прискорює старіння (особливо в деяких хімічних системах, таких як NMC) [7]. На практиці багато літєвих житлових систем резервують певну ємність (наприклад, Tesla Powerwall резервує ~ 5 %, інші налаштовуються). EMS може динамічно регулювати це: наприклад, зазвичай максимальний рівень SOC підтримується на рівні 90 %, але якщо прогнозується сильний шторм (вищий ризик відключення), вона може дозволити заряджання до 100 % для максимізації резервної енергії. Наша конструкція передбачає базовий рівень ~ 1 цикл на день при, можливо, 80 % DoD; Якщо акумулятор більший (15 кВт·год для того самого щоденного навантаження), ефективний рівень деградації (DoD) на день менший (~ 50 %), що значно подовжує термін служби, але призводить до вищих початкових витрат. Ми розглядаємо цей компроміс в аналізі вартості життєвого циклу.

- Обмеження струму заряджання/розряджання: швидкість заряджання/розряджання акумулятора обмежується безпечними значеннями інвертором та системою управління будинком (BMS). Висока швидкість заряджання/розряджання (швидке заряджання/розряджання відносно ємності) призводить до більшого зносу та нагрівання [66]. Для акумулятора потужністю 5 кВт та 10 кВт·год швидкість заряджання $0,5\text{ C} = 5\text{ кВт}$ є помірною. Система управління зарядом (EMS) гарантує, що за нормальної роботи акумулятор не заряджається до екстремальних струмів – наприклад, вона може повільно нарощувати потужність, щоб зменшити перенапруження від стрибків струму, або обмежувати розряд до максимуму інвертора потужністю 5 кВт (що становить 1 C, якщо акумулятор має 5 кВт·год; 0,33 C, якщо акумулятор має 15 кВт·год тощо).

Під час відключень електроенергії в мережі інвертор може мати короткочасну здатність до стрибків напруги (наприклад, 6 кВт протягом кількох секунд) для запуску двигунів; BMS дозволить короткочасні стрибки напруги, але захистить від тривалого перевантаження по струму. Завдяки правильному

підбору розміру акумулятора (5 кВт·год при 1 С може забезпечити 5 кВт, але акумулятор ємністю 10 кВт·год при 0,5 С зазнає менше навантаження при тому ж навантаженні 5 кВт), система може досягти кращого терміну служби. Зменшення піків навантаження також тут допомагає – обробка коротких піків за допомогою акумулятора може фактично запобігти тривалому високому споживанню енергії, оскільки ці піки є короткочасними. EMS також може координувати роботу кількох менших акумуляторних модулів, якщо вони є, розподіляючи навантаження між ними.

- Термічний менеджмент: Температура має суттєвий вплив на термін служби та безпеку акумулятора. Зазначений діапазон навколишнього середовища ($-10 \dots +35$ °C) означає, що система повинна працювати як з холодними зимами, так і з теплим літом. За низьких температур літій-іонні акумулятори не можуть ефективно заряджатися (ризик літійового покриття нижче ~ 0 °C); за високих температур хімічна деградація прискорюється, а ризик теплового виходу зростає. Акумуляторний блок слід встановлювати в середовищі з контрольованою температурою або ізольованому середовищі (наприклад, у приміщенні або в гаражі). Багато сучасних акумуляторних блоків містять обігрівачі та вентилятори. Наприклад, якщо акумулятор знаходиться в неопалюваному приміщенні, а температура навколишнього середовища падає до -10 °C, BMS зазвичай запобігає заряджанню, доки елементи не нагріються до безпечної температури (деякі системи перенаправляють частину енергії на обігрівач, або тепло, що генерується повільним зарядом, поступово нагріває його). Аналогічно, якщо температура акумулятора перевищує ~ 40 °C, BMS/EMS може знизити потужність заряду/розряду або активувати вентилятори охолодження.

Хімічний склад LFP має перевагу в термічній стабільності та краще переносить нагрівання, ніж NMC. Він набагато менш схильний до теплового розгону (початок ~ 270 °C для LFP проти ~ 210 °C для NMC). Тим не менш, всі акумулятори виграють від перебування при помірній температурі. Наша система управління енергоспоживанням може враховувати температуру у своїй логіці: наприклад, у надзвичайно холодний ранок відкладіть заряджання, доки

аккумулятор не прогріється, або використовуйте частину фотоелектричної енергії для м'якого нагрівання аккумулятора, якщо це необхідно. У спекотну погоду уникайте заряджання в піковий час доби, якщо аккумулятор перегрівається – можливо, заряджайте більше в прохолодні ранкові години. Протягом терміну служби, підтримка температури аккумулятора в межах 15 – 30 °C якомога довше значно подовжує термін його служби.

- Моніторинг стану (SoH): З часом ємність та внутрішній опір аккумулятора змінюються. Система управління аккумуляторною батареєю (BMS) відстежує SoH (за допомогою кулонівського підрахунку, вимірювань імпедансу тощо), і ця інформація може передаватися системі управління енергоспоживанням (EMS). Якщо аккумулятор починає помітно втрачати ємність (скажімо, через кілька років він може утримувати лише 90 % початкової ємності), EMS може адаптуватися, коригуючи операційну стратегію – наприклад, якщо ємність нижча, вона може зменшити глибину розряду, що використовується щодня, щоб уникнути занадто частого досягнення нового нижчого мінімуму, або може сигналізувати про необхідність частішої зарядки від мережі для задоволення навантажень.

Спеціалізоване передове програмне забезпечення EMS рекомендуватиме цикли технічного обслуговування або відновлення (для хімічних речовин, які це дозволяють) або навіть заміну модулів, коли SoH падає занадто сильно. EMS також забезпечує балансування елементів (зазвичай це здійснюється на рівні BMS за допомогою пасивних балансувальних схем, але EMS іноді може виконувати повний цикл зарядки, щоб забезпечити максимальне балансування).

- Захисні засоби: EMS та BMS разом реалізують кілька блокувань безпеки. Якщо будь-який параметр виходить за межі допустимих значень (перенапруга елемента, знижена напруга, перегрів, перевантаження по струму), BMS може відключити аккумулятор (через контактори), щоб запобігти пошкодженню. EMS, у свою чергу, може перенаправити живлення (наприклад, якщо аккумулятор відключається, коли мережа увімкнена, вона буде жити навантаження від мережі, щоб уникнути переривання). Система включає запобіжники та автоматичні вимикачі на лініях аккумулятора, а EMS контролює

наявність несправностей, таких як теплові перепади або короткі замикання. Хоча теплові перепади в літєвій батареї трапляються рідко, вони є серйозною небезпекою – LFP зменшує цей ризик завдяки своїй притаманній стабільності (набагато менша ймовірність займання під навантаженням) . Крім того, конструкція системи розміщує акумулятор у відповідному місці (сухому, вентиляваному, подалі від житлових приміщень, якщо можливо, або в батарейній шафі з вогнестійкою конструкцією). Для таких хімічних речовин, як свинцево-кислотні або нікелеві, необхідна вентиляція, щоб уникнути накопичення газу. EMS запобігатиме, наприклад, перезаряду свинцево-кислотних акумуляторів, щоб запобігти надмірному утворенню водню. Регулярно проводяться самоперевірки – багато служб екстреної медичної допомоги щодня проводять діагностику, а щомісяця або щокварталу – поглиблені тести (деякі системи повідомляють про ємність акумулятора, проводячи контрольований тест розряду, якщо користувач дозволяє, для повторного калібрування показників заряду).

- Оптимізація життєвого циклу: Щоб максимізувати як термін служби циклів, так і календарний термін служби, система управління енергоспоживанням (EMS) може використовувати такі стратегії, як часткове циклування та періодична повна зарядка. Літєві акумулятори насправді віддають перевагу частковим циклам (наприклад, багаторазове циклування між 40 – 80 % може призвести до десятків тисяч мікроциклів з мінімальним зносом). Наша щоденна експлуатація часто природним чином підтримує рівень заряду (SOC) у середньому діапазоні (розрядка з ~ 90 % до 20 – 30 % протягом ночі, а потім повторна зарядка) – це добре. Однак тривале перебування на дуже високому рівні заряду може бути шкідливим, а відсутність повної зарядки може призвести до дисбалансу. Тому EMS може час від часу (скажімо, раз на тиждень або місяць) дозволяти акумулятору зарядитися до 100 %, щоб збалансувати елементи, а потім відновити нормальну роботу – це балансує потребу в повному заряді для обслуговування, мінімізуючи час, проведений на 100 %. З іншого боку, EMS уникає залишення акумулятора на 0 % – якщо він

майже розряджений, він перемикається на мережу, щоб зберегти невеликий залишковий заряд.

Ще один аспект – це підрахунок циклів для гарантійного терміну – багато акумуляторів мають гарантійні обмеження (наприклад, 10 років або пропускну здатність X МВт·год). Система управління енергоспоживанням (EMS) може відстежувати загальну пропускну здатність енергії та попереджати користувача, коли він наближається до гарантійних обмежень або кінця терміну служби. Знаючи це, користувач може вирішити, чи хоче він скоригувати використання (наприклад, якщо цикли розряду/заряду швидші, ніж очікувалося, можливо, додати другий акумулятор, щоб зменшити кількість циклів розряду/заряду на акумулятор).

Наш аналіз чутливості для 5 проти 10 проти 15 кВт·год ілюструє це: більший акумулятор означає, що кожен кВт·год навантаження викликає менший відсоток циклів, що потенційно подвоює термін служби (акумулятор 15 кВт·год, що циклічно розряджається/розряджається приблизно на 33 % щодня, може прослужити приблизно вдвічі довше, ніж акумулятор 7,5 кВт·год, що циклічно розряджається/розряджається приблизно на 66 % щодня тощо). Однак віддача від більшого акумулятора зменшується, і початкові витрати та втрати від більшого акумулятора повинні бути виправдані продовженням терміну служби – ми розглядаємо це в розділі про сукупну вартість володіння.

Підсумовуючи, підхід EMS до управління акумуляторами є консервативним за своєю суттю: він призведе до невеликої втрати корисної ємності або ефективності заряджання/розрядки, якщо суттєво подовжить термін служби акумулятора або підвищить безпеку. Наприклад, обмеження заряду до 90 % може дещо зменшити корисну ємність кВт·год, але дасть більше циклів до деградації [69], [70]. Ці заходи, у поєднанні з притаманною сучасним літій-іонним (особливо LFP) акумуляторам, спрямовані на досягнення життєвого циклу 10 – 15 + років (що відповідає $\sim 4000 - 5000$ циклам при 1 циклі/день). Це відповідає можливостям LFP (типово 3000 – 6000 циклів до 80 % ємності [69]), що означає, що акумулятор LFP, який використовується щодня, все ще повинен зберігати, можливо, 70 – 80 % своєї ємності після десятиліття

експлуатації, тоді як свинцево-кислотний акумулятор, ймовірно, потребуватиме кількох замін протягом цього періоду, .

Взаємодія з електромережею та переходи між режимами.

Система управління енергопостачанням (EMS) керує інтерфейсом з мережею як у підключеному, так і в відключеному сценаріях.

3.6 Режим власного споживання, прив'язаного до мережі.

- За нормальної роботи з доступною електромережею, система управління енергією (EMS) оптимізує роботу для максимального власного використання сонячної енергії та найнижчої вартості електроенергії. Сонячна енергія спочатку забезпечує навантаження будинку; будь-який надлишок йде на зарядку акумулятора. Якщо акумулятор повний, а сонячна енергія все ще перевищує навантаження, надлишок можна експортувати в мережу (якщо це дозволено політикою – у деяких регіонах це нараховує кредити через мережевий облік, в інших може бути встановлений «зелений» тариф або ліміт нульового експорту). Наше припущення схиляється до пріоритету власного споживання, тобто експорт мінімізований, якщо акумулятор не повний. Коли сонячної енергії недостатньо (ніч або хмарно), EMS використовує акумулятор (якщо він є) для живлення навантажень, таким чином уникаючи використання енергії з мережі. Тільки коли акумулятор досягає межі розряду, EMS починає отримувати енергію з мережі для живлення навантажень.

Ця стратегія може значно зменшити імпорт енергії з мережі – домовласники можуть досягти 60 – 80 % самозабезпечення сонячною енергією залежно від фотоелектричних панелей та розміру акумулятора. Якщо діють тарифи, що базуються на часі використання (TOU), EMS відповідно підраховує час використання акумулятора: у періоди пікових тарифів акумулятор розряджатиметься, щоб уникнути купівлі дорогої енергії ; у дешеві години поза піком (зазвичай пізно вночі) він може навіть заряджати його від мережі, якщо акумулятор має низький заряд, щоб пізніше використовувати цю дешеву енергію в період пікового навантаження. Наприклад, у сценарії з дуже низькими нічними тарифами EMS може зарядити акумулятор, скажімо, до 50 % о 2 годині ночі, щоб мати додаткову енергію для ранкового піку о 7 ранку, але

це буде зроблено лише в тому випадку, якщо очікується, що акумулятор буде розряджений до появи сонячної енергії. Ці рішення щодо імпорту/експорту точно налаштовуються EMS для забезпечення економічної ефективності. Важливо, що будь-яка зарядка від мережі контролюється з урахуванням обмежень акумулятора та не конфліктує з фотоелектричними системами (більшість систем не заряджатимуться одночасно від фотоелектричних систем та мережі; EMS надаватиме пріоритет фотоелектричним системам, оскільки це безкоштовна енергія).

3.7 Резервний (острівний) режим.

Коли мережа виходить з ладу (або виходить за межі допустимого діапазону напруги/частоти), система управління енергоспоживанням (EMS) переводить систему в острівний режим роботи. Вимикач живлення (MID) або перемикач вимикається, щоб ізолювати будинок від мережі. Інвертор негайно бере на себе функцію джерела живлення, використовуючи акумулятор (і фотоелектричні панелі, якщо є сонячне світло) для підтримки живлення змінного струму. EMS підготується до цього, підтримуючи резервний зарядний стан (SOC) – наприклад, він може постійно підтримувати щонайменше 20 % заряду в акумуляторі спеціально для випадків перебоїв. У резервному режимі забезпечується пріоритетність навантаження: несуттєві навантаження можуть бути автоматично відключені, щоб продовжити час роботи від акумулятора. Інвертор регулюватиме напругу та частоту відповідно до стандартів мережі (230 В, 50 Гц). Якщо сонце не світить, фотоелектричні панелі продовжуватимуть заряджати акумулятор та/або живити навантаження; якщо заряд акумулятора був низьким під час відключення, а фотоелектричні панелі доступні, EMS може тимчасово відключити більше навантажень, щоб забезпечити зарядку від сонячної енергії та гарантувати, що акумулятор не розрядиться до нуля. Більшість гібридних інверторів мають вбудований захист від островування, який зазвичай запобігає роботі, коли мережа не працює; однак у спроектованій мікромережі наявність перемикача та логіки керування дозволяє навмисне островування.

У Європі такі стандарти, як VDE-AR-N 4105 або EN 50549, визначають вимоги до таких систем – інвертор повинен відключатися протягом мілісекунд після втрати мережі та підключатися знову лише після стабільного відновлення мережі, що обробляє наша система управління енергоспоживанням (EMS). Протягом періоду острівного режиму функціонування енергосистеми, якщо акумулятор починає розряджатися, а фотоелектричних батарей недостатньо (наприклад, під час нічного відключення), EMS може надсилати сповіщення користувачеві для зменшення споживання. У деяких конфігураціях допоміжний дизельний генератор може ввімкнутися, якщо заряд акумулятора стає критично низьким; наша конструкція не передбачає наявності генератора, але EMS здатна інтегрувати його (багато інверторів мають вхід генератора).

Повторне підключення до мережі.

Після відновлення живлення від мережі, система управління енергопостачанням (EMS) повторно синхронізує інвертор з мережею. Це передбачає узгодження фази та напруги – сучасні інвертори роблять це за кілька секунд. Потім MID (розподільник напруги) замикається, знову підключаючи будинок. EMS плавно переводить навантаження назад до мережі або нормального режиму роботи. Якщо акумулятор не повністю заряджений, а мережа повернулася, система може вирішити зарядити акумулятор від мережі залежно від часу та прогнозу на наступний день (особливо якщо відключення розрядило акумулятор вночі, а вранці мережа повернулася, система може зарядити його у разі чергового відключення або для підготовки до наступного пікового періоду).

Захисні блокування гарантують, що зворотне живлення не відбудеться, коли цього не повинно бути – наприклад, MID підключиться знову лише тоді, коли інвертор буде фазово заблокований і коли мине певний час з моменту відновлення живлення мережі (щоб уникнути вібрацій від нестабільної мережі). Все це автоматизовано та відповідає стандартам, щоб гарантувати, що жоден лінійний працівник не зазнає небезпеки через напругу під напругою.

3.8 Функції підтримки мережі.

Багато систем EMS та інверторів сьогодні також пропонують послуги підтримки мережі (хоча для приватного домогосподарства вони є необов'язковими/ бонусними). Наприклад, інвертор може виконувати регулювання напруги або частотну характеристику, трохи коригуючи свою вихідну потужність у відповідь на відхилення частоти мережі. Деякі європейські правила вимагають, щоб розподілені ресурси мали реакцію на падіння – це означає, що якщо частота мережі підвищується (що вказує на надлишок), інвертор повинен припинити експорт (або навіть споживати електроенергію, якщо це можливо), а якщо частота падає (дефіцит), інвертор може вводити електроенергію (якщо є акумулятор), щоб допомогти. Передбачається, що наш EMS/інвертор відповідає місцевим мережевим кодексам, які вимагають такої поведінки. Крім того, можлива участь у програмах віртуальної електростанції (VPP) або реагування на попит : EMS може отримувати сигнали від комунального підприємства або агрегатора для заряджання або розряджання в певний час, щоб допомогти мережі, часто в обмін на стимули. Наприклад, якщо вночі є надлишок енергії вітру, сигнал може вказати акумулятору поглинати енергію (заряджатися), або під час перевантаження мережі акумулятор може розряджатися, щоб зменшити навантаження. Хоча це складні випадки використання, архітектура підтримує їх через хмарне підключення EMS та стандарти, такі як IEEE 2030.5 або OpenADR для зв'язку.

3.9 Тарифи за часом використання (TOU).

Ми припустили сценарій TOU, який EMS явно оптимізує. Практичний профіль може бути таким: позапіковий з 23:00 до 7:00 (дешево), пологий з 9:00 до 17:00 (помірно), піковий з 17:00 до 21:00 (дорого).

EMS відповідно плануватиме використання акумулятора: забезпечить зарядку акумулятора до 17:00 (або від фотоелектричних панелей протягом дня, або підживлення від мережі о 16:00, якщо було хмарно), потім інтенсивний розряд з 17:00 до 21:00 для живлення будинку, коли електроенергія найдорожча . Після 21:00, якщо акумулятор має низький заряд, система може заряджатися від мережі протягом решти позапікових нічних годин (особливо взимку, коли

сонячної енергії недостатньо для повної зарядки). Влітку однієї сонячної енергії може бути достатньо для покриття пікового навантаження. Кількісно оптимізуючи це, EMS забезпечує значне зниження рахунків – ефективно використовуючи енергію акумулятора там, де вона має найвищу цінність.

Якщо тарифи фіксовані, а чистий облік повний, стратегія полягатиме виключно у максимізації циклів сонячної енергії та мінімізації будь-якого експорту (оскільки експортовані кВт·год зараховуються рівними імпортованим кВт·год при повному чистому обліку). В умовах України/ЄС чистий облік або чисте виставлення рахунків часто зараховує надлишок за нижчою ставкою, тому власне споживання справді є фінансово розумнішим.

3.10 Відповідність нормативним вимогам.

Уся експлуатація повинна відповідати нормам безпеки ЄС. Це включає сертифікати електромагнітної сумісності та безпеки для інвертора (маркування CE, IEC/EN 62109 для інверторів, IEC 62477), стандарти безпеки акумуляторів (наприклад, IEC 62619 для стаціонарних літій-іонних акумуляторів) та стандарти взаємодії комунальних підприємств (згадані норми VDE або EN 50549, а також місцеві вимоги DNO).

Система також повинна відповідати новим рекомендаціям Директиви ЄС щодо акумуляторів, щодо сталого розвитку (наприклад, належна переробка акумулятора після закінчення терміну служби, хоча це виходить за рамки щоденної експлуатації). Система управління енергоспоживанням веде журнали продуктивності та подій, що може бути корисним для дотримання вимог та гарантійних претензій. Наприклад, якщо комунальне підприємство хоче перевірити функціональність захисту від островування, журнали можуть показувати, що щоразу, коли мережа виходила з ладу, інвертор припиняв експорт протягом встановлених 0,2 секунди тощо.

Таким чином, система енергомережі (СЕМ) забезпечує гнучку взаємодію з мережею: споживає енергію, коли це вигідно або необхідно, постачає енергію, коли це вигідно, і плавно переходить на незалежну роботу, коли це необхідно для забезпечення стійкості.

Ризики взаємодії з мережею.

Існує незначний ризик зворотного живлення, якщо система захисту від островування вийде з ладу – це може поставити під загрозу працівників комунальних енергетичних служб. Саме тому передбачено кілька рівнів захисту (зсув частоти, моніторинг напруги, а також фізичне реле). Випробування на відповідність практично усувають цей ризик у сертифікованих інверторах. Іншим ризиком є ненавмисне островування, коли система може самостійно живити частину мережі, якщо автоматичний вимикач неправильно налаштовано – знову ж таки, правильне встановлення дозволяє уникнути будь-якої такої лазівки (усі підключення до мережі проходять через MID, який є безпечним у розімкненні під час відключення). Перехідні процеси та перенапруги з мережі (наприклад, удар блискавки в лінії) можуть пошкодити електроніку – для захисту інвертора та EMS рекомендується використовувати мережеві фільтри (SPD) на головній панелі та на входах фотоелектричних панелей.

3.11 Кібербезпека та конфіденційність даних.

Оскільки системи енергетичної безпеки стають розумнішими (підключеними до хмари, керованими штучним інтелектом), кібербезпека стає проблемою. Зламана система енергетичної безпеки теоретично може вимкнути живлення або спричинити нестабільну поведінку. Надійні системи використовують шифрування та автентифікацію для віддаленого зв'язку. Оновлення прошивки є важливим, оскільки виробники виправляють будь-які вразливості. Конфіденційність даних є незначною проблемою – дані про споживання енергії надсилаються в хмару в багатьох системах; користувачі повинні давати згоду та розуміти, що передається. Загалом, переваги (моніторинг, оновлення прошивки) переважають ці проблеми, але можна обрати повністю локальну систему енергетичної безпеки (без інтернету) для максимальної безпеки, але за рахунок відсутності віддаленого моніторингу чи розширеного прогнозування.

Гарантія та відповідальність.

Використання системи поза проектними параметрами (наприклад, глибші цикли, ніж гарантовано, або встановлення в неналежному середовищі) може

призвести до анулювання гарантії. Тому налаштування EMS повинні відповідати гарантійним умовам – наприклад, якщо на акумулятор поширюється гарантія на 6000 циклів при 80 % здатності до розряду, не перевищуйте це значення регулярно. У нашій конструкції ми залишаємо певний запас. Крім того, інсталятор та користувач повинні дотримуватися інструкцій виробника – неправильне підключення або охолодження можуть становити небезпеку пожежі, а також призвести до анулювання гарантії. Багато гарантій на акумулятори вимагають ізольованого або кондиціонованого простору для підтримки температури в певному діапазоні – ці умови повинні дотримуватися, особливо в холодніших регіонах.

Документація відповідності.

Для підключення до мережі енергопостачальне підприємство або регулятор часто потребує документації – однолінійні схеми, результати випробувань реле тощо. Власник системи повинен подати заявку на затвердження з'єднання, якщо це необхідно (у ЄС, як правило, спрощено для систем потужністю до певного рівня кВт, але документи все одно потрібні). Крім того, з 2025 року Регламент ЄС щодо батарей вимагатиме, щоб стаціонарні акумуляторні системи мали «паспорт батареї» та можливість повернення батареї після закінчення терміну служби. Користувач повинен купувати батарею у постачальника, який пропонує переробку або повернення, щоб залишатися відповідним вимогам, коли батарея врешті-решт вийде з ладу.

Міркування щодо малого бізнесу:

Якщо цю систему розгорнути в середовищі малого бізнесу, безпека та відповідність вимогам можуть бути ще суворішими (наприклад, протипожежні вимоги можуть вимагати спеціального приміщення для акумуляторів із системою пожежогасіння, залежно від кількості кВт·год). Крім того, фінансові ставки через прості вищі – бізнес може втратити дохід у разі відключення електроенергії. Тому можна додати резервування: можливо, два менші інвертори замість одного, щоб у разі виходу з ладу одного залишалася хоча б частина потужності. Або включити резервний дизельний генератор як вторинне джерело, якщо акумулятор розрядиться під час тривалого відключення

(особливо для підприємств, таких як магазини, які потребують охолодження). Система управління енергопостачанням може координувати запуск/зупинку генератора за потреби [60].

Підсумовуючи, конструкція відповідає всім чинним стандартам і включає кілька рівнів безпеки – хімічну стабільність (вибір безпечного хімічного складу акумулятора), електронні засоби захисту (системи управління BMS, EMS), механічний захист (корпуси, запобіжники) та відповідність процедурам (стандарти та найкращі практики). За умови правильного впровадження ризику низькі, і система повинна безпечно працювати протягом усього терміну служби. Будь-які залишкові ризики (такі як пожежа або ураження електричним струмом) зменшуються завдяки вищезазначеним заходам та забезпеченню професійного монтажу та введення в експлуатацію.

Висновки та заключні рекомендації по третьому розділу

Для побутової мікромережі (система 5 кВт, ~ 10 кВт·год): як оптимальне рішення рекомендується використовувати акумуляторну систему на основі LFP акумулятора, враховуючи її баланс між тривалим терміном служби, безпекою та економічною ефективністю. Така система, як гібридний інвертор потужністю 5 кВт у поєднанні з акумуляторним блоком LFP потужністю ~ 10 кВт·год (який може бути окремим або модульним), зазвичай задовольняє потреби стандартного будинку. Це забезпечує приблизно 8 кВт·год корисної електроенергії щодня (при 80 % DoD), що при типовому щоденному споживанні 15 – 20 кВт·год може покрити значну частину використання та пікові періоди. Система управління енергоспоживанням (EMS) повинна бути налаштована таким чином, щоб пріоритезувати власне споживання та економію TOU – тобто використовувати сонячну енергію та акумулятори на повну потужність, щоб мінімізувати дорогу енергію мережі, але завжди залишати ~ 20 % акумулятора резервним для резервного копіювання. Для надійності дотримуйтесь перевірених, сертифікованих компонентів від авторитетних виробників, які мають місцеву підтримку (важливо для технічного обслуговування або гарантії). Система управління енергоспоживанням (СУЕ) повинна

використовувати гібридну стратегію керування: базове керування на основі правил для негайного реагування (зарядка при перевищенні фотоелектричної потужності, розрядка в пік, зниження пікової потужності при порозі 5 кВт) з шаром прогнозової оптимізації для точного налаштування (використання прогнозів сонячної енергії на наступний день, щоб уникнути непотрібного використання мережі або прийняти рішення про попередню зарядку акумулятора, якщо очікується негода). Це забезпечує економію коштів без суттєвого зниження терміну служби акумулятора. Протягом 10-річного періоду така система має дуже вигідну загальну вартість – незважаючи на вищі початкові витрати, ніж простіші рішення, вона окупається за рахунок економії енергії та довговічності [67]. Типова акумуляторна батарея LFP у 2024 році постачається з 10-річною гарантією (часто ~ 6000 циклів або гарантія пропускну здатності енергії), що добре узгоджується з нашими проектними припущеннями.

Побутові потреби – Пріоритетні корективи - Орієнтація на найнижчу вартість. Якщо головною метою домовласника є зниження витрат протягом терміну служби, рекомендацією залишається акумулятор LFP, але, можливо, помірною розміру ($\approx 5 - 10$ кВт·год), щоб уникнути надмірних інвестицій. Треба забезпечити, щоб система енергозбереження (EMS) агресивно щодня використовувала акумулятор, щоб максимізувати віддачу від покупки акумулятора (кожен кВт·год циклу заміщує куплений кВт·год, тому використовуйте акумулятор повністю). Також доцільним є використання будь-яких програм стимулювання: наприклад, якщо є «зелені» тарифи або платежі за реагування на попит, EMS програмується так, щоб скористатися їхньою перевагою. Хоча менший акумулятор має більшу глибину циклу, LFP може з ним впоратися, і дещо коротший термін служби є прийнятним, враховуючи початкову економію від купівлі меншого блоку. Рекомендується уникати таких хімічних речовин, як свинцево-кислотні акумулятори, навіть якщо вони здаються дешевшими, оскільки їх часта заміна призведе до збільшення вартості. Якщо це абсолютно необхідно (наприклад, бюджет надзвичайно обмежений), можна почати з невеликого LFP (наприклад, 5 кВт·год), який згодом можна

розширити, замість того, щоб вибирати більший, але короткочасний свинцево-кислотний акумулятор.

Фокус на максимальній довговічності. Якщо користувач хоче, щоб система працювала 15 – 20 років з мінімальною втратою ємності, розгляньте можливість вибору трохи більшого акумулятора LFP (≈ 15 кВт·год), але використовуючи лише $\sim 30 - 50$ % його ємності для щоденного циклу. Це значно зменшує навантаження на цикл. Система управління енергоспоживанням (EMS) може запровадити більш вузький діапазон заряду (наприклад, діапазон циклів $30 - 80$ %), щоб продовжити термін служби до 15+ років, можливо, залишаючи $70 - 80$ % ємності наприкінці. Все технічне обслуговування (наприклад, будь-які оновлення прошивки, балансування тощо) слід ретельно виконувати для забезпечення довговічності. У цьому сценарії також може допомогти трохи більший розмір фотоелектричних систем (щоб акумулятор не розряджався глибоко взимку через брак сонячної енергії). Для ще більшої довговічності можна розглянути акумулятори LTO, але враховуючи вартість, це зазвичай має сенс лише для малого бізнесу з критичними потребами. Для дому LFP достатньо для досягнення бажаного терміну служби.

Максимальний акцент на безпеці. Для домовласників, які дбають про безпеку, доцільним є використання LFP та переконання, що встановлення виконано з особливою обережністю щодо безпеки: розміщення акумулятора у нежитловому місці (гараж або підсобне приміщення з вогнестійкими стінами), доповнення поруч детекторами диму та, можливо, автоматичним вогнегасником. Система управління енергоспоживанням (EMS) повинна підтримувати акумулятор на помірному рівні заряду (SOC) (не накопичуючи надмірно високий рівень енергії, коли це не потрібно) – наприклад, якщо наступного дня сонячно, він може розрядити акумулятор до 50 % за ніч замість 20 %, щоб до ранку накопичувалося менше енергії (а потім він знову заряджався, коли зійде сонце). Це мінімізує час високого рівня заряду, що трохи безпечніше та також краще для життя. Якщо бажана максимальна безпека, і користувач відкритий до альтернатив, варіантом може бути проточний цинк-бромний акумулятор (оскільки він просто не може спалахнути). Але

враховуючи проблеми з обслуговуванням та ефективністю, більшість віддасть перевагу простішому LFP з вищезгаданими заходами безпеки. Доцільні є забезпечення дотримання будь-яких місцевих протипожежних норм – наприклад, у деяких місцях може знадобитися повідомляти органи влади під час встановлення літєвих акумуляторів > 5 кВт·год вдома. Необхідно обрати акумуляторний продукт із належними сертифікатами безпеки (багато європейських побутових акумуляторів наголошують на своїх випробуваннях на пожежну безпеку).

Орієнтація на максимальну продуктивність. Для використання, орієнтованого на продуктивність (наприклад, домовласник також може мати швидкий зарядний пристрій для електромобілів або планує використовувати акумулятор для допоміжних послуг), ви можете включити додаткову підтримку живлення. Один із підходів полягає у використанні інвертора з вищою імпульсною потужністю або кількох інверторів (для розділених фаз або просто паралельного підключення). Інший підхід полягає у поєднанні акумулятора з невеликим суперконденсаторним блоком або елементами з високим С для буферизації перехідних навантажень – однак на практиці це рідко потрібно для будинку. Один акумулятор LFP вже може реагувати за мілісекунди та видавати повні 5 кВт. Якщо в будинку трапляються короточасні перебої або мерехтіння, інвертор у режимі UPS забезпечує безперебійне перемикання (деякі мають час перемикання < 20 мс, непомітно). Для мережевих послуг переконайтеся, що EMS здатний видавати швидкі сигнали – деякі інвертори дозволяють режим прямої частотної характеристики (без затримки контролера). Якщо користувач має намір займатися такими справами, як керування важкою технікою або, скажімо, заряджання електромобіля потужністю 7 кВт, одночасно забезпечуючи роботу домашнього навантаження, може знадобитися більший інвертор та акумулятор, щоб уникнути перевищення лімітів. Підсумовуючи, для продуктивності рекомендується акумулятор LFP або NMC відповідного розміру (за обмеженого простору) з надійним інвертором. NMC слід розглядати лише в тому випадку, якщо простір для встановлення надзвичайно обмежений, і потрібно розмістити максимальну енергію на невеликій площі, оскільки NMC

має більшу щільність енергії, але слід пам'ятати про короткий термін служби, який це передбачає. Для більшості кращим варіантом є просто придбання трохи більшого LFP (якщо потрібно більше енергії).

Малий бізнес (наприклад, магазин, невеликий офіс або господарська будівля на фермі) може мати схожі потреби в енергії, але часто трохи вище пікове навантаження або трифазне живлення.

Рекомендації для бізнесу зберігаються з деякими коригуваннями.

Якщо бізнесу потрібне трифазне живлення змінного струму 400 В, можна використовувати або три однофазні інвертори потужністю 5 кВт (по одному на фазу, поширений підхід у ЄС для трифазних будинків/бізнесів), або один трифазний інверторний блок. Переконайтеся, що система акумуляторів/інверторів може балансувати фази за потреби (деякі дозволяють нерівномірне навантаження на фази). Можливо, для більших навантажень малого бізнесу можна використовувати установку потужністю 5 кВт на фазу (15 кВт загалом) з більшою батареєю. Принципи керування EMS залишаються тими ж, просто розширені до 3-фазного живлення та, можливо, більшої потужності.

Підприємства можуть надавати більший пріоритет резервному живленню – якщо воно критичне (наприклад, сервер або важливе обладнання), розгляньте можливість резервування. Наприклад, використання двох акумуляторних модулів таким чином, щоб у разі виходу з ладу один інший все ще міг забезпечувати певну потужність. Крім того, інтеграція з генератором може бути доцільною для тривалих перебоїв (невеликий генератор, який може заряджати акумулятор і жити навантаження, якщо мережа не працює протягом багатьох годин). Система управління енергоспоживанням (EMS) повинна мати можливість автоматичного запуску генератора [40] – багато гібридних інверторів мають порт для цього. EMS може керувати роботою генератора лише тоді, коли акумулятор розряджений, тим самим мінімізуючи використання палива.

Бізнес може схилитися до економії коштів (якщо рахунки за електроенергію є великою статтею експлуатаційних витрат) або довговічності

(щоб мінімізувати перебої). Якщо плата за пікове навантаження є частиною тарифу, зменшення пікового навантаження стає дуже цінним – наша система вже це робить, але для бізнесу можливо встановити поріг ще нижче або динамічно на основі тарифних діапазонів. Наприклад, утримуйте навантаження нижче 10 кВт, щоб залишатися в дешевшому тарифному класі.

Для більшості малих підприємств знову рекомендується LFP (багато комерційних продуктів для зберігання енергії зараз є LFP через безпеку в комерційних будівлях та життєвий цикл). Якщо бізнес має високий цикл використання (кілька циклів на день, наприклад, якщо вони використовують акумулятор для зменшення пікового навантаження двічі на день плюс перемикавання навантаження – хоча навіть це зазвичай < 2 цикли/день), LFP все ще може з цим впоратися. Якщо це значно більше (деякі підприємства можуть заряджати та розряджати спонукально багато разів на день), то використання акумулятора LTO може бути виправданим дуже високою циклічною стійкістю – але це трапляється рідко і лише якщо підприємство, скажімо, надає мережеві послуги для отримання доходу, що вимагає великої кількості циклів.

Приклад. Невеликий виробничий цех в Україні може мати трифазне підключення та обладнання, яке споживає піки 10 кВт. Вони можуть розгорнути інвертор потужністю 15 кВт (3×5 кВт) з акумулятором LFP ємністю ~ 30 кВтг. Система управління енергоспоживанням (SEF) зменшуватиме піки, щоб підтримувати споживання від мережі на рівні, можливо, 5 кВт на фазу, а під час перебоїв вона може підтримувати роботу критично важливих машин (або принаймні комп'ютерів та освітлення). Принципи управління SEF залишаються незмінними, просто масштабуються.

РОЗДІЛ 4.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ EMS ТА ОКУПНІСТЬ ІНВЕСТИЦІЙ (ROI)

4.1. Методологія оцінки витрат та вигод (CBA)

Економічний успіх BESS вимірюється її здатністю максимізувати окупність інвестицій (ROI). Методологія аналізу витрат і вигод (CBA) для BESS повинна бути багатогранною, враховуючи не тільки капітальні витрати на обладнання (батареї, PCS/інвертори), але й довгострокові переваги. Для отримання точної оцінки ROI необхідно проводити сценарне моделювання, що порівнює фінансові результати за різних умов використання, тарифних структур та хімічного складу батарей.

EMS функціонує як фінансовий менеджер, оскільки вона відповідає за "аналіз тарифів" та оптимізацію роботи системи відповідно до цінової структури. Це вимагає від EMS можливості оперувати складними змінними, а не лише технічними показниками.

4.2. Вплив тарифної структури на стратегію EMS

Структура тарифів безпосередньо диктує найбільш вигідну стратегію EMS:

- Тарифи Time-of-Use (TOU): ці тарифи чітко стимулюють енергетичний арбітраж. EMS програмується на заряджання у періоди найнижчих цін і розряджання у періоди найвищих.

- Demand Charges (Плата за потужність): У сегменті малих підприємств зниження плати за пікову потужність є часто найбільшим джерелом фінансової економії. Це означає, що EMS повинна мати високоточні можливості прогнозування для ефективного *Peak Shaving*, оскільки лише незначні зменшення пікового навантаження можуть призвести до значної щомісячної економії.

Аналіз ROI також повинен включати "прогнозування стимулів" (Incentive Forecasting) — врахування державних субсидій, податкових кредитів та інших фінансових програм, які можуть суттєво скоротити термін окупності.

4.3. Аналіз життєвого циклу та деградація батареї

Термін служби батареї є ключовим обмежуючим фактором для ROI. BMS та EMS повинні працювати спільно, щоб максимізувати загальну кількість циклів батареї (наприклад, понад 6000 циклів для LiFePO₄ при 2-5C).

Використання MPC дозволяє інтегрувати *стан здоров'я* (SoH) батареї як обмежувальний фактор в оптимізаційну модель. Це запобігає надмірному або надто глибокому розряду, який міг би принести тимчасову фінансову вигоду, але прискорив би деградацію та необхідність заміни. Сучасні батарейні системи пропонують 100% глибину розряду (DoD), що максимізує утилізацію енергії. Однак, фінансовий аналіз завжди повинен включати "планування заміни" (Replacement Planning), враховуючи вплив деградації на потужність системи протягом її повного життєвого циклу [12].

Існує важливий компроміс між резильєнтністю (надійністю) та ROI. Наприклад, вибір більш резильєнтної установки (5 кВт / 20 кВт год) вимагає більших початкових інвестицій порівняно з системою, оптимізованою лише для короткочасного Peak Shaving. Якщо додаткова ємність (20 кВт год проти, скажімо, 6 кВт*год) рідко використовується для TOU арбітражу, вона збільшує капітальні витрати та подовжує термін окупності.

4.4 Приклади розрахунків: термін окупності та економічна ефективність системи акумуляторних батарей потужністю 5 кВт/10 кВт·год

Розглянемо систему домашніх акумуляторів на основі літій-залізо-фосфату (LFP, або LiFePO₄) з інвертором потужністю 5 кВт і корисною ємністю 10 кВт·год. Це типовий розмір для побутового акумулятора (наприклад, настінного пристрою), який підходить для зберігання сонячної енергії або перерозподілу енергії з електромережі. Для розрахунків ми будемо

використовувати умови України (тарифи на електроенергію та моделі споживання).

Таблиця 4.1. Джерела ROI для 5 кВт BESS (житловий/малий C&I)

Джерело Доходу/Економії	Керуючий Режим EMS	Цільовий Сегмент	Фактори, що впливають на ROI
Зниження рахунків (Self-Consumption)	Максимізація використання PV, Zero Import	Житлові та C&I	Наявність PV, точність прогнозу навантаження
Енергетичний арбітраж (Arbitrage)	TOU Optimization, Dynamic Pricing	Житлові (TOU) та C&I	Різниця між піковими та непіковими тарифами
Зниження плати за потужність (Demand Charge Reduction)	Peak Shaving	Малі та середні C&I	Суворість Demand Charges, точність прогнозу піків
Допоміжні послуги (VPP)	Frequency Regulation, Voltage Support	Обидва (через агрегатор)	Наявність регуляторних механізмів та готовність EMS (Grid Code Compliance)

Припущення:

– Тип та термін служби акумулятора: акумулятор LFP з тривалим циклом служби (приблизно 6000+ циклів або 10+ років при щоденному використанні). Цей хімічний склад відомий своєю довговічністю (часто ~80% ємності залишається після 10 років).

– Ємність: 10 кВт·год корисної енергії, максимальна вихідна потужність 5 кВт (достатньо для роботи типових побутових навантажень).

– Вартість установки: приблизно 10 000 доларів США (за акумулятор, гібридний інвертор, установку тощо). Це відповідає типовому діапазону 9600–16 500 доларів США для домашньої системи LFP потужністю 10 кВт·год. Для довідки, за поточним курсом це приблизно 370 000 українських гривень (УГ).

– Профіль щоденного використання: Акумулятор розряджається приблизно на 10 кВт·год на день для забезпечення побутових потреб.

Наприклад, можливий розподіл використання акумулятора протягом 24 годин може бути таким:

- 00:00–07:00: ~1 кВт·год (низьке використання вночі)
- 07:00–09:00: ~2 кВт·год (ранкові процедури)
- 09:00–16:00: ~2 кВт·год (мінімальне використання вдень, сонячна енергія може покривати більшу частину навантаження вдень)
- 16:00–19:00: ~3 кВт·год (вечірній пік використання)
- 19:00–00:00: ~2 кВт·год (використання пізно ввечері)

Це становить до 10 кВт·год на добу від акумулятора. На практиці акумулятор заряджатиметься або від сонячних фотоелектричних (PV) батарей протягом дня, або від електромережі в нічні години, коли споживання електроенергії найменше.

- Тарифи на електроенергію (Україна): з 2025–2026 рр. в Україні діє система тарифів залежно від часу споживання. Для домогосподарств з двозонним лічильником електроенергія вдень (07:00–23:00) коштує приблизно 4,32 грн/кВт·год, а вночі (23:00–07:00) у непікові години — 2,16 грн/кВт·год [4] (приблизно 0,10 дол. США/кВт·год вдень проти 0,05 дол. США/кВт·год вночі). Існує також піковий тариф (до 6,48 грн/кВт·год у тризональному лічильнику в певні вечірні години), але для простоти ми будемо використовувати двозональні тарифи. З цими припущеннями ми можемо тепер розрахувати термін окупності та економічну ефективність системи зберігання енергії потужністю 5 кВт/10 кВт·год:

Приклад 1: Розрахунок періоду окупності

Період окупності — це час, необхідний для того, щоб сукупні заощадження або вигоди дорівнювали початковим інвестиційним витратам. Іншими словами, скільки років потрібно, щоб акумулятор «окупився» за рахунок економії витрат на електроенергію.

Початкові інвестиційні витрати:

Почнемо з загальної вартості встановлення акумуляторної системи потужністю 5 кВт/10 кВт·год. Припустимо, що початкова вартість становить приблизно 10 000 доларів США ($\approx 370\,000$ гривень).

Річний обсяг енергії:

Акумулятор забезпечує ~ 10 кВт·год корисної енергії на добу (згідно з профілем використання, наведеним вище). За рік це становить:

$10 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{день} \times 365 \text{ днів} \approx 3,650 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ на рік.

Це загальна кількість електроенергії, яку акумулятор постачає до будинку щорічно. (Ми припускаємо один повний цикл на день. Насправді, в деякі дні споживання може бути меншим, але для оцінки ми будемо використовувати $3,650 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$).

Річна економія витрат:

Нам потрібно визначити, скільки грошей батарея економить щороку, використовуючи ці $3650 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ з батареї замість того, щоб купувати їх з мережі. Є кілька сценаріїв, які слід врахувати:

Сценарій А – Самоспоживання сонячної енергії: Якщо акумулятор заряджається за рахунок надлишкової сонячної енергії (яка, по суті, є «безкоштовною» після встановлення сонячних панелей), кожен кВт·год, який постачає акумулятор, замінює кВт·год, який ви б придбали за ціною електромережі. В Україні це становить $\sim 4,32$ грн економії на кВт·год (якщо таке споживання відбувалося б у денний тарифний період). У цьому випадку економія становить $\approx 3650 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 4,32 \text{ грн} \approx 15\,768 \text{ грн}$ на рік. Це приблизно 420 доларів на рік (використовуючи $4,32 \text{ грн} \approx 0,10$ долара).

Сценарій Б – Арбітраж за часом використання: Якщо акумулятор заряджається від мережі вночі (за $2,16 \text{ грн}/\text{кВт}\cdot\text{год}$) і використовується в дорогі денні години ($4,32 \text{ грн}/\text{кВт}\cdot\text{год}$), чиста економія дорівнює різниці в тарифах. Це $2,16 \text{ грн}$ економії на кожен перенесений кВт·год ($4,32$ мінус $2,16$). У цьому сценарії економія становить $\approx 3650 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 2,16 \text{ грн} \approx 7884 \text{ грн}$ на рік, що дорівнює приблизно 210 дол. на рік. (Для спрощення припускається майже 100% ефективність циклу заряджання-розряджання. Насправді втрати батареї $\sim 10\%$ дещо зменшать чисту економію).

Для нашого прикладу припустимо, що акумулятор в основному використовується для максимізації власного споживання сонячної енергії та покриття пікових навантажень, тому ми будемо використовувати вищу оцінку економії

(~15 768 грн або 420 дол. США на рік). (Якщо акумулятор використовувався б тільки для тарифного арбітражу без сонячної енергії, окупність була б набагато довшою, як показано в сценарії Б.)

Розрахунок періоду окупності: ділимо початкову вартість на щорічну економію: Окупність (роки) = Початкова вартість \ Щорічна економія

Використовуючи економію за сценарієм А:

Окупність = 370,000 грн / 15,768 грн/рік \approx 23,5 роки.

У доларах США це приблизно 10 000 дол. / 420 дол. \approx 23,8 роки.

Якщо ми використаємо нижчу економію зі сценарію Б (без сонячної енергії, тільки перенесення з пікового на непіковий час), окупність буде такою: 370 000 грн / 7884 грн \approx 46,9 років (приблизно 10 000 дол. / 210 дол. \approx 47,6 років).

Інтерпретація: Для сценарію із сонячною зарядкою термін окупності становить приблизно 23–24 роки. Це довше, ніж очікуваний термін експлуатації акумуляторної системи (зазвичай ~10–15 років для LFP при щоденному циклічному використанні). Іншими словами, система не окупиться повністю за рахунок економії енергії до того, як, ймовірно, потребуватиме серйозної заміни (акумулятор може втратити значну ємність або потребувати оновлення, скажімо, через 10–15 років).

Навіть у найкращому випадку з сонячною енергією ви зможете окупити лише близько половини витрат протягом 10 років. У сценарії чистого тарифного арбітражу окупність становить ~47 років, що значно перевищує термін експлуатації акумулятора, а це означає, що в цьому випадку він ніколи не окупить лише за рахунок економії на рахунках за електроенергію.

Вказані вище розрахунки не враховують потенційну інфляцію цін на електроенергію або зміни тарифів. Якщо ціни на електроенергію в мережі істотно зростуть у майбутньому, щорічна економія збільшиться (скоротивши термін окупності). Наприклад, у багатьох європейських країнах ціни або стимули вищі, що призводить до скорочення терміну окупності. (У Португалії 10-кіловатна батарея з сонячною енергією та субсидіями мала приблизний термін окупності ~6 років завдяки вищим тарифам та авансовим грантам). Однак у поточній ситуації

в Україні з відносно низькими тарифами для населення терміни окупності є відносно довгими.

Приклад 2: Розрахунок економічної ефективності акумуляторної системи

Крім простої окупності, ми можемо оцінити економічну ефективність або рентабельність акумулятора. Є кілька способів зробити це; два поширені показники:

– Вартість за кВт·год протягом терміну експлуатації (вирівняна вартість зберігання): скільки коштує зберігання та використання кожного кВт·год електроенергії протягом терміну експлуатації акумулятора? При цьому враховуються загальна вартість і загальний енергоспоживання системи.

– Рентабельність інвестицій (ROI) або чисті заощадження: який відсоток інвестицій повертається у вигляді прибутку (або чистих заощаджень) протягом терміну експлуатації системи? Це становить загальні заощадження мінус витрати.

Ми продемонструємо підхід на основі вирівняної вартості за кВт·год, оскільки він безпосередньо вимірює економічну ефективність використання акумулятора для зберігання енергії:

1. Оцінка загального енергоспоживання протягом терміну експлуатації:

Акумулятор LFP зазвичай може витримати ~6000 повних циклів, перш ніж його ємність значно знизиться (часто визначається як ~80% залишкової ємності). У нашому випадку 1 цикл \approx 10 кВт·год (повна зарядка та розрядка 10 кВт·год). Припускаючи один цикл на день, 6000 циклів відповідають приблизно 16,4 рокам експлуатації. Для більш консервативної оцінки ми можемо використовувати 10-річний термін експлуатації, що складе ~3650 циклів (як розраховано в прикладі 1). Щоб отримати енергію, що постачається протягом терміну експлуатації:

Консервативний 10-річний варіант: $3650 \text{ циклів} \times 10 \text{ кВт·год} = 36\,500 \text{ кВт·год}$.

Максимальний варіант 6000 циклів: $6000 \text{ циклів} \times 10 \text{ кВт·год} = 60\,000 \text{ кВт·год}$.

Також слід врахувати ефективність циклу (не вся вкладена енергія повертається). На практиці системи LFP мають ефективність близько 90 %. Це означає, що на кожні 10 кВт·год заряду фактично виходить ~9 кВт·год. Застосовуючи 90% ефективність, корисний вихід за термін експлуатації становитиме ~90% від наведених вище цифр:

- 10-річний термін експлуатації: $36\,500 \times 0,9 \approx 32\,850$ кВт·год корисного виходу.

- 6000 циклів: $60\,000 \times 0,9 \approx 54\,000$ кВт·год корисного виходу.

Розраховуємо середню вартість за кВт·год: ділимо загальну початкову вартість на загальну кількість кВт·год, яку акумулятор постачатиме протягом свого терміну експлуатації. Використовуючи консервативну 10-річну потужність (~32 850 кВт·год) і вартість ~10 000 доларів:

Вартість за кВт·год (збережена) = $\$10\,000 / 32\,850 \text{ кВт·год} \approx \$0,304$ за кВт·год

У гривнях це приблизно 11,4 грн за кВт·год (оскільки $\$0,304 \approx 11,4$ грн). Це означає, що фактично кожна кіловат-година, що постачається батареєю, «коштує» 11,4 грн з точки зору інвестицій у батарею.

Якщо ж припустити, що батарея витримує повні 6000 циклів (54 000 кВт·год за ~16 років), вартість за кВт·год становитиме: $10\,000 \text{ доларів США} / 54\,000 \approx 0,185$ долара США за кВт·год, що становить приблизно 6,8 грн/кВт·год.

Порівняння з вартістю електроенергії з мережі:

Поточна ціна електроенергії з мережі: домогосподарства платять приблизно 4,32 грн/кВт·год вдень (а вночі ще менше). Навіть оптимістична вартість зберігання (6,8 грн/кВт·год) вища, ніж вартість електроенергії з мережі за сьогоднішніми тарифами. Для 10-річного сценарію (11,4 грн/кВт·год) це майже в 2–3 рази перевищує тариф мережі. Це свідчить про низьку економічну ефективність виключно з точки зору витрат — ви платите набагато більше за використання збереженої енергії, ніж за електроенергію з мережі.

Цінність під час пікових навантажень/відключень: Однак, якщо акумулятор використовується під час пікових навантажень з високою вартістю (наприклад, якщо у вас 3-зонний лічильник з піковими навантаженнями 6,48

грн/кВт·год) або під час відключень електроенергії (де альтернативою може бути бензиновий генератор, який коштує 20–30 грн/кВт·год на паливо), економічна ефективність покращується. У пікові періоди при 6,48 грн/кВт·год ефективна вартість акумулятора (6,8 грн/кВт·год) відповідає ціні електроенергії — це майже беззбитковий рівень. А порівняно з роботою генератора, 6,8–11,4 грн/кВт·год набагато дешевше, ніж ~25 грн/кВт·год за електроенергію від генератора, тому використання акумулятора в цьому контексті є економічно ефективним (крім того, він тихіший і чистіший).

Рентабельність інвестицій (ROI):

Інший спосіб оцінити економічну ефективність — це розглянути чисті заощадження протягом терміну експлуатації батареї: використовуючи сценарій самоспоживання сонячної енергії з прикладу 1: заощадження ~15 768 грн на рік. За 10 років це становить ~157 680 грн загальних заощаджень. Початкова вартість становить 370 000 грн, тому чистий збиток становить $370\,000 - 157\,680 = -212\,320$ грн. Іншими словами, за 10 років окупається лише ~42% вартості (ROI = -58% за 10 років). Навіть за ~16 років (якщо акумулятор прослужить так довго) загальна економія складе ~252 288 грн, що все одно менше 370 тис. грн. Акумулятор повинен пропрацювати значно довше, ніж його очікуваний термін експлуатації, щоб окупитися в чисто грошовому вираженні.

У сценарії тарифного арбітражу (без сонячної енергії, тільки купівля дешевої електроенергії вночі): економія за 10 років складе ~78 840 грн, що становить лише ~21% від інвестицій (великий чистий збиток).

Ці цифри підтверджують, що за поточних українських тарифів домашня батарея не є економічно вигідною, якщо її використовувати лише для економії на рахунках — інвестиції не окупаються повністю за рахунок економії. «Економічна ефективність» з точки зору фінансової рентабельності інвестицій у цьому випадку є низькою або негативною.

Висновок до четвертого розділу:

В умовах України, де ціни на електроенергію для населення є відносно низькими, 5 кВт/10 кВт·год акумулятор має дуже довгий термін окупності (що

значно перевищує термін його експлуатації, який становить десятки років, якщо враховувати лише економію на рахунках за електроенергію). Середня вартість енергії, що зберігається в акумуляторі (в нашому прикладі близько 7–11 грн/кВт·год), є вищою за звичайний тариф на електроенергію (4,32 грн/кВт·год), що означає, що за нинішніх умов вона не є економічно ефективною виключно для арбітражу енергії або власного споживання сонячної енергії.

Однак важливо зазначити, що ці розрахунки означають: економічна цінність акумулятора є обмеженою в суто грошовому вираженні, якщо ціни на електроенергію не зростуть або не з'являться інші джерела цінності. Багато людей все ще встановлюють акумулятори заради негрошових вигод. Резервне живлення: під час відключень електроенергії (що є проблемою в Україні через нестабільність електромережі) акумулятор забезпечує електроенергією критично важливі навантаження. Економічна цінність уникнення відключень (запобігання простою бізнесу, псуванню продуктів харчування або необхідності використання генератора) може бути значною, навіть якщо її важко кількісно оцінити в рахунку. Цей аспект надійності може виправдати інвестиції для деяких, навіть якщо пряма окупність є тривалою.

Майбутня гнучкість: тарифи та енергетична політика можуть змінюватися. Наприклад, якщо розрив між цінами залежно від часу використання збільшиться (вищі пікові ціни) або будуть введені стимули для зберігання, та сама батарея може стати більш фінансово ефективною. «Більш вигідна економіка зберігання» очікується, коли існують передбачувані різниці між цінами в непікові та пікові періоди.

Отже, для розрахунку періоду окупності необхідно розділити вартість акумулятора на щорічну економію (що в нашому прикладі 5 кВт/10 кВт·год дало ~24 роки з сонячною енергією або ~47 років без неї). Економічну ефективність можна оцінити за вартістю за кВт·год накопиченої енергії (~0,18–0,30 дол. США/кВт·год у даному випадку) та загальною рентабельністю інвестицій (яка за поточних цін виявилася негативною протягом терміну експлуатації системи). Ці приклади показують, що хоча домашня батарея технічно може постачати ~10 кВт·год на день і підвищувати енергетичну незалежність, її фінансова окупність в Україні за типових умов є досить повільною. Потенційні користувачі повинні зважити нематеріальні вигоди (резервне живлення, захист від майбутніх змін) проти скромної прямої економії при оцінці такої інвестиції.

ВИСНОВКИ

Реалізація ефективної системи енергоменеджменту для BESS потужністю 5 кВт є багатоплановою інженерно-економічною задачею. Успіх визначається переходом від простого керування на основі правил до інтелектуального, предиктивного керування, здатного до багатоцільової оптимізації.

Система EMS повинна бути реалізована на основі модельно-предиктивного керування (MPC), що використовує прогнози навантаження, PV генерації та ціни. Для забезпечення обчислювальної ефективності на вбудованих контролерах рекомендується застосування методів опуклої апроксимації (наприклад, RSA).

Враховуючи аналіз за кількома пріоритетами, сформовано цільові рекомендації щодо систем зберігання енергії потужністю 5 кВт для дому та малого бізнесу. Для малого бізнесу (наприклад, невеликої виробничої майстерні, роздрібного магазину чи офісу) варіанти використання можуть відрізнятися – часто це включає скорочення пікового навантаження для зменшення плати за комунальні послуги, арбітраж енергії за часом використання та, можливо, резервне копіювання для критичних навантажень. Таким чином, вимоги можуть встановлювати вищий рівень вихідної потужності (забезпечення короточасних стрибків напруги) та кількості циклів (якщо працюють щоденні піки). Тим не менш, LFP, як правило, є кращим вибором для невеликих комерційних накопичувачів з тих самих причин, що й для житлових приміщень: він економічно ефективний протягом тисяч циклів та безпечний. Бізнес може обрати трохи більший акумулятор (наприклад, 20 – 30 кВт·год) для обробки як перемикання енергії, так і кількох годин резервного копіювання для критичних ланцюгів. Здатність LFP видавати високу потужність (багато систем можуть витримувати 2С, тому 20 кВт·год можуть витримувати пікову потужність 40 кВт) означає, що він може покривати короточасні піки. Якщо пікові навантаження бізнесу дуже високі порівняно з енергетичною потужністю – скажімо, заводський двигун, який при пуску втричі перевищує середнє навантаження – однією зі стратегій є збільшення розміру акумулятора LFP

(щоб коефіцієнт заряду на елемент був низьким, і він міг би комфортно забезпечити пік). Навіть з урахуванням збільшення розміру, LFP зазвичай залишається економічно оптимальним.

За варіантом використання для домогосподарства (сонячне власне генерування, резервне живлення) в порівнянні з малим бізнесом літій-залізофосфатні (LFP) є оптимальним вибором у 2024 – 2026 роках. Вони досягають оптимального рівня ефективності (~ 95 %), довговічності (10+ років), не потребують обслуговування та безпечності для встановлення всередині приміщень. Практично всі нові побутові акумуляторні продукти (останні версії Powerwall від Tesla, LG ESS, BYD, Pylontech, Huawei LUNA тощо) перейшли на LFP з цих причин. Акумулятор LFP потужністю 8 –15 кВт·год у поєднанні з гібридним інвертором потужністю 5 кВт комфортно справлятиметься з щоденним циклічним живленням, забезпечуючи вечірнє/нічне живлення з мінімальними втратами, і матиме резервну потужність для випадкових вищих навантажень або перебоїв. Домогосподарства отримують вигоду від високої корисної ємності LFP (наприклад, ви можете використовувати 90 % її під час перебоїв, що забезпечує більше часу резервного живлення). Надійний термін служби означає, що він, ймовірно, прослужить довше, ніж гарантія інвертора.

В умовах України, де ціни на електроенергію для населення є відносно низькими, 5 кВт/10 кВт·год акумулятор має дуже довгий термін окупності (що значно перевищує термін його експлуатації, який становить десятки років, якщо враховувати лише економію на рахунках за електроенергію). Середня вартість енергії, що зберігається в акумуляторі (в нашому прикладі близько 7–11 грн/кВт·год), є вищою за звичайний тариф на електроенергію (4,32 грн/кВт·год), що означає, що за нинішніх умов вона не є економічно ефективною виключно для арбітражу енергії або власного споживання сонячної енергії.

Однак важливо зазначити, що ці розрахунки означають: економічна цінність акумулятора є обмеженою в суто грошовому вираженні, якщо ціни на електроенергію не зростуть або не з'являться інші джерела цінності. Багато

людей все ще встановлюють акумулятори заради негрошових вигод. Резервне живлення: під час відключень електроенергії (що є проблемою в Україні через нестабільність електромережі) акумулятор забезпечує електроенергією критично важливі навантаження. Економічна цінність уникнення відключень (запобігання простою бізнесу, псуванню продуктів харчування або необхідності використання генератора) може бути значною, навіть якщо її важко кількісно оцінити в рахунку. Цей аспект надійності може виправдати інвестиції для деяких, навіть якщо пряма окупність є тривалою.

Приклади розрахунків показали, що хоча домашня система накопичення електроенергії технічно може постачати ~ 10 кВт·год на день і підвищувати енергетичну незалежність, її фінансова окупність в Україні за типових умов є досить повільною. Потенційні користувачі повинні зважити нематеріальні вигоди (резервне живлення, захист від майбутніх змін) проти скромної прямої економії при оцінці такої інвестиції.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Residential Battery Storage. Electricity. 2021 - ATB . NREL, доступ 15.01. 2026, https://atb.nrel.gov/electricity/2021/residential_battery_storage
2. Battery energy storage system - Wikipedia, доступ 15.01. 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_energy_storage_system
3. Reduxi Controller as a BESS controller and EMS, доступ 15.01. 2026, <https://www.redux.eu/redux-controller-bess-ems/>
4. Battery Energy Storage System Components. Power-Sonic, доступ 15.01. 2026, <https://www.power-sonic.com/battery-energy-storage-system-components/>
5. BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS - HiePRO, доступ 11.11. 2025, <https://hiepro.hawaii.gov/resources/147122/481713%20BESS%20FTZ%20SPECS.pdf>
6. Energy management system (ems), доступ 15.01. 2026, <https://discoverenergysys.com/products/commercial-industrial-solutions/c-i-controls/ems>
7. Maximize Your Home Battery Storage: Smart BESS Optimization Techniques That Pay Off, доступ 15.01. 2026, <https://www.residentialpanels.org/financial-aspects/maximize-your-home-battery-storage-smart-bess-optimization-techniques-that-pay-off/>
8. BESS Battery Energy Storage Solutions - EnSmart Power, доступ 15.01. 2026, <https://www.ensmartpower.com/products/solar-and-storage/energy-storage-systems/>
9. 5-In-One Energy Storage System & Home ESS Solutions - Sigenergy, доступ 15.01. 2026, <https://www.sigenergy.com/en/products/sigenstor>
10. Carpinelli, Guido et al. "Battery energy storage sizing when time of use pricing is applied." *TheScientificWorldJournal* vol. 2014 (2014): 906284. doi:10.1155/2014/906284, доступ 15.01. 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4177186/>
11. Understanding BESS Functions: A Complete Guide to Battery Energy Storage Systems, доступ 15.01. 2026, <https://www.tls-containers.com/tls-blog/understanding-bess-functions-a-complete-guide-to-battery-energy-storage-systems>
12. The Ultimate Guide to ROI for Battery Energy Storage Systems (BESS) - EticaAG, доступ 15.01. 2026, <https://eticaag.com/roi-for-battery-energy-storage-systems/>
13. BESS Solutions for PV Integration | FFD Power, доступ 15.01. 2026, <https://ffdpower.com/bess-for-pv-integration/>

14. How to Achieve Smart Peak Shaving Through Home Battery Energy Storage System?, доступ 15.01. 2026, <https://tursan-pps.com/article/how-to-achieve-smart-peak-shaving-through-home-battery-energy-storage-system/>
15. The Power of Peak Shaving: A Complete Guide, доступ 15.01. 2026, <https://www.power-sonic.com/the-power-of-peak-shaving-a-complete-guide/>
16. Itsainii/energy-management-systems-using-deep-learning - GitHub, доступ 15.01. 2026, <https://github.com/itsainii/energy-management-systems-using-deep-learning>
17. Polimeni, S., Moretti, L., Manzoloni, G., Leva, S., Meraldi, L., & Raboni, P. (2019). Numerical and experimental testing of predictive EMS algorithms for PV-BESS residential microgrid. *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1-6., доступ 15.01. 2026, <https://www.semanticscholar.org/paper/Numerical-and-experimental-testing-of-predictive-Polimeni-Moretti/179127877b1178fc6f0b21bc44aac98fc2c8628b>
18. H. H. Abdeltawab and Y. A. -R. I. Mohamed, "Market-Oriented Energy Management of a Hybrid Wind-Battery Energy Storage System Via Model Predictive Control With Constraint Optimizer," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 6658-6670, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2435694., доступ 15.01. 2026, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7110555>
19. Grisales-Noreña, L.F.; Montoya, O.D.; Hernández, J.C. An Efficient EMS for BESS in Monopolar DC Networks with High Penetration of Renewable Generation: A Convex Approximation. *Batteries* **2023**, *9*, 84. <https://doi.org/10.3390/batteries9020084>
20. Prabpal, P.; Kongjeen, Y.; Bhumkittipich, K. Optimal Battery Energy Storage System Based on VAR Control Strategies Using Particle Swarm Optimization for Power Distribution System. *Symmetry* **2021**, *13*, 1692. <https://doi.org/10.3390/sym13091692>
21. Battery Energy Storage Systems | BESS - HMS Networks, доступ 15.01. 2026, <https://www.hms-networks.com/battery-energy-storage-systems-bess>
22. Communication Protocols (Modbus, CAN, SunSpec, IEEE 2030.5), доступ 15.01. 2026, <https://www.anernstore.com/blogs/costs-incentives-policy/communication-protocols-modbus-ieee>
23. Industrial Networking for Energy Storage - Neteon, доступ 15.01. 2026, <https://www.neteon.net/neteon-blogs/industrial-networking-for-energy-storage>
24. Modbus - Home Assistant, доступ 15.01. 2026, <https://www.home-assistant.io/integrations/modbus/>
25. Your Guide to Battery Energy Storage Regulatory Compliance - UL Solutions, доступ 15.01. 2026, <https://www.ul.com/resources/your-guide-battery-energy-storage-regulatory-compliance>
26. Codes & Standards Draft – Energy Storage Safety - Sandia National Laboratories, доступ 15.01. 2026, <https://www.sandia.gov/energystoragesafety/codes-and-standards/>
27. OpenEMS - Open Source Energy Management System - GitHub, доступ 15.01. 2026, <https://github.com/OpenEMS/openems>

28. Energy-storage · GitHub Topics, доступ 15.01. 2026, <https://github.com/topics/energy-storage>
29. DIY Easy Home Battery for Solar Energy (on Grid) : 4 Steps - Instructables, доступ 15.01. 2026, <https://www.instructables.com/DIY-Easy-Home-Battery-for-Solar-Energy-on-Grid/>
30. Understanding EN 50549: A Comprehensive Guide for Distributed Energy Resources in Europe - SCU Power, доступ 15.01. 2026, <https://www.scupower.com/understanding-en-50549-a-comprehensive-guide-for-distributed-energy-resources-in-europe/>
31. Energy Storage Battery Certifications in Europe: Complete Guide for 2025 - battlink, доступ 15.01. 2026, <https://battlink.com/news/energy-storage-battery-certifications-in-europe/>
32. Grid Code Compliance - Intertek, доступ 15.01. 2026, <https://www.intertek.com/power-transmission-distribution/grid-code-compliance/>
33. IEEE 1547 and 2030 Standards for Distributed Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid - NREL, доступ 15.01. 2026, <https://docs.nrel.gov/docs/fy15osti/63157.pdf>
34. Exhibit A.7 – BESS Energy Management System (EMS) Scope of Work, доступ 15.01. 2026, <https://www.xcelenergy.com/staticfiles/xcel-responsive/Company/Rates%20&%20Regulations/Regulatory%20Filings/Exhibit%20A.7%20-%20BESS%20EMS%20Scope%20of%20Work,%20R0,%2020231107.pdf>
35. I. B. Sperstad *et al.*, "Cost-Benefit Analysis of Battery Energy Storage in Electric Power Grids: Research and Practices," *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 2020, pp. 314-318, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248895, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9248895>
36. Акумулятор Pylontech US5000 - E-energy, доступ 15.01. 2026, <https://e-energy.in.ua/akumuljatorni-batarje/akumulyator-pylontech-us5000.html>
37. Eway Energy – *Інформація про інверторні акумулятори: відмінності між свинцево-кислотними та літій-іонними* . (Допис у блозі, 2023 р.) – Обговорюється ефективність (~80–85% свинцево-кислотних проти ~95% літій-іонних), термін служби (500–1000 проти 2000+ циклів) та корисна глибина розряду.
38. LanPower (FYU) – *Свинцево-кислотні проти літій-залізофосфатних акумуляторів: порівняння на 6000 слів* . (7 травня 2025 р.) – Комплексне порівняння з галузевими джерелами на основі даних. Зазначає термін служби LFP 3500–7000 циклів проти AGM 500–1200 циклів , ефективність роботи LFP 95–98% проти свинцево-кислотних 70–85% [,

обмеження швидкості заряджання та 10-річний аналіз загальної вартості володіння на користь LFP .

39. Anern Store – *LFP проти NMC для побутового зберігання: компроміси між циклом та терміном служби* . (Блог, ~2024)

40. OUPES – *LTO проти LiFePO₄, що краще?* (Блог, 5 листопада 2025 р.) – Детальне порівняння титанату літію та LFP. Наведено характеристики LTO.

41. Новини ESS / Журнал PV – *Естонська компанія Freen запускає побутову натрій-іонну батарею ємністю 10 кВт·год* . (18 березня 2025 р.) – Новини про домашній натрій-іонний акумулятор.

42. Вуд Маккензі (Ед Крукс) – *Натрій-іонні акумулятори виходять на ринок накопичувачів енергії* . (24 листопада 2025 р.) – Перспектива галузі щодо натрій-іонних акумуляторів.

43. Університет батарей – *BU-808: Як продовжити термін служби літій-іонних акумуляторів* . (Останнє оновлення 2020 р.) – Надає базові дані про термін служби літій-іонних акумуляторів у порівнянні з даними Міністерства оборони США (таблиці, що показують, наприклад, LFP ~600 циклів при 100% проти 15000 при 10%).

44. Університет акумуляторів – *BU-804b: Сульфатація та як її запобігти* . (Оновлено 8 лютого 2024 р.) –

45. Огляди чистої енергії – *Свинцево-кислотні проти літійових акумуляторів для автономного зберігання даних* . (2021) – Незалежний огляд, що підтверджує придатність для використання згідно з вимогами Міністерства оборони США:.

46. Driven EU – *LFP-акумулятори готові повністю витіснити традиційні NMC-накопичувачі* . (2022) – Звіти про ринкову тенденцію LFP, що випереджає NMC у стаціонарному зберіганні завдяки безпеці та перевагам ланцюга поставок [49]. Відображає зміни в галузі, що узгоджуються з рекомендаціями цього аналізу.

47. LFP проти NMC для побутового зберігання: компроміси між циклом та терміном служби <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar->

[guides/lfp-vs-nmc-cycle-life-ess?srsltid=AfmBOopKjlt0yPcIJCbu3SRsepxJbx78lNmGj-vrCf7du22UQziw8Tk5](https://oupes.com/a/blog/post/lto-battery-vs-lifepo4-which-is-better?srsltid=AfmBOopKjlt0yPcIJCbu3SRsepxJbx78lNmGj-vrCf7du22UQziw8Tk5)

48. LTO-акумулятор проти LiFePO₄, що краще?

https://oupes.com/a/blog/post/lto-battery-vs-lifepo4-which-is-better?srsltid=AfmBOopIA9jUkh1_EPFoA303_G12DIEzfmSytrFU7Yiv8BHNTowVa4r6

49. Свинцево-кислотні та літій-залізофосфатні (LFP) акумулятори: Технічний звіт на 6000 слів <https://lanpwr.com/blogs/news/lead-acid-vs-lithium-iron-phosphate-lfp-batteries-a-6-000-word-technical-and-economic-showdown>

50. Камблонг, Х. та ін. (2023). «Система управління енергією на основі правил для підвищення власного споживання фотоелектричної енергії в будівлі: реальний випадок». *Energies*, 17 (23), 6099. –

51. FranklinWH (2025). «Що таке система управління енергією вдома та як вона працює». – Огляд сучасних функцій домашньої системи управління енергією: координація джерел, перемикач TOU, контроль ізольованого режиму, інтелектуальне управління навантаженням.

52. Residential Solar Panels .org (2025). «Сонячні мікромережі: забезпечте свій дім живленням навіть під час відключення електроенергії».

53. Anern Store (2023). «LFP проти NMC для побутового зберігання: компроміси між циклом та терміном служби».

54. Пан, Лі (2025). «Порівняння літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів для сонячних енергетичних систем». – Стаття в блозі Large-Battery.

55. Чаттер, Мукеш (2023). Журнал «Power». *«Не нехуйте ефективністю туди й назад та вартістю заряджання...»*.

56. Reddit r/Energy (2023). Обговорення натрій-іонного домашнього акумулятора Heiwit ємністю 9,8 кВт·год. .

57. Вуд Маккензі (2024). «Натрій-іонні акумулятори виходять на ринок накопичення енергії». – Галузевий звіт, у якому зазначається поява натрій-іонних акумуляторів для стаціонарного накопичення енергії з потенційною

вартістю ~40–80 \$/кВт·год елемента до середини 2020-х років та використанням у великомасштабних проектах .

58. Сонячні мікромережі: Забезпечте свій дім живленням навіть під час відключення електроенергії - Сонячні панелі для житлових приміщень <https://www.residentialpanels.org/emerging-technologies-and-innovation/solar-microgrids-power-your-home-even-when-the-grid-goes-down-2/>

59. Що таке система енергоменеджменту вдома та як вона працює <https://www.franklinwh.com/blog/what-is-a-home-energy-management-system-and-how-does-it-work>

60. Порівняльний аналіз алгоритмів керування на основі правил та моделей у реконфігурованих акумуляторних системах для станцій швидкої зарядки електромобілів – ScienceDirect <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25007212>

61. LFP проти NMC для побутового зберігання: компроміси між циклом та терміном служби <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/lfp-vs-nmc-cycle-life-ess?srsltid=AfmBOorCvp53t2Z8Re58gFZLeifHlkD8R-ADeav7BBYz2oAZA-vQhPzk>

62. Система управління енергією на основі правил для покращення власного споживання фотоелектричної енергії в будівлі: реальний випадок <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6099>

63. Як оптимізоване штучним інтелектом накопичення енергії веде наступне покоління.. <https://www.energycentral.com/energy-biz/post/how-ai-optimized-energy-storage-leads-the-next-generation-of-energy-1M0Cncx7w9eR01b>

64. Оптимізація ефективності за допомогою управління енергією на основі штучного інтелекту - Pecan AI <https://www.pecan.ai/blog/optimize-efficiency-with-ai-energy-management/>

65. Комплексний огляд класичної та штучно керованої енергетики ... <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671125001925>

66. Порівняння літій-іонних та свинцево-кислотних акумуляторів для сонячних енергетичних систем — Велика батарея <https://www.large-battery.com/blog/lithium-vs-lead-batteries-solar-storage/>

67. Не нехуйте ефективністю передачі даних туди й назад та вартістю заряджання, розглядаючи вирівняну вартість зберігання. <https://www.powermag.com/dont-neglect-round-trip-efficiency-and-cost-of-charging-when-considering-levelized-cost-of-storage/>

68. Розшифровка потужності літій-титанових акумуляторів <https://www.evlithium.com/Blog/lto-batteries-advantages-lifespan-comparisons.html>

69. Італійський стартап випускає натрій-іонний акумулятор ємністю 9,8 кВт·год для житлових приміщень, який дешевший за літієвий еквівалент https://www.reddit.com/r/energy/comments/1ldgmxx/italian_startup_releases_98_kwh_sodiumion_battery/

70. Натрієві батареї до 2027 року революційно вплинуть на ринок накопичення енергії <https://sodiumbatteryhub.com/2024/07/01/sodium-batteries-to-disrupt-energy-storage-market-by-2027/>

71. Найкращі типи акумуляторів для зберігання енергії: посібник – EticaAG <https://eticaag.com/best-battery-types-for-energy-storage-guide/>

72. Вартість натрій-іонних акумуляторних елементів може впасти до 40 доларів США/кВт·год, повідомляє IRENA. <https://www.pv-magazine.com/2025/11/28/sodium-ion-battery-cells-could-drop-to-40-kwh-says-irena/>

73. Літій проти свинцево-кислотних: 3 головні міфи про літієві акумулятори | RELiON https://reliionbattery.com/blog/debunking-the-top-3-lithium-battery-myths?srsltid=AfmBOooPI7TTdPi0nX3itZKoEW-aY17anl-qIx_AdXhk0JRCLpJebDAP

74. Яскраві ідеї: роль штучного інтелекту в сонячній енергетиці <https://www.nextenergy.ai/ai-in-solar-energy>