

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 621.311.1:620.92

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

«\_\_» грудня 2025 р.

## **Магістерська дисертація**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

освітня програма Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «Підвищення ефективності гібридних систем енергозабезпечення за рахунок застосування установок зберігання електроенергії»

Виконав: студент II курсу, групи ГЕ-41мп

Шаповалов Олександр Олександрович \_\_\_\_\_

Науковий керівник к.т.н., ст.викл. Притискач Іван Васильович \_\_\_\_\_

Нормоконтроль провідний інженер Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Шапалову Олександровичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення ефективності гібридних систем енергозабезпечення за рахунок застосування установок зберігання електроенергії»

науковий керівник дисертації к.т.н., ст. викл. Притискач Іван Васильович,

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

затверджені наказом по університету від 03 листопада 2025 р. №4749-с

2. Строк подання студентом дисертації 17 грудня 2025 року

3. Об'єкт дослідження система електропостачання комерційного підприємства з інтегрованою сонячною електростанцією та установкою зберігання енергії.

4. Предмет дослідження методи та алгоритми керування установкою зберігання енергії, режими її заряджання, а також схемні рішення інтеграції УЗЕ у систему електропостачання споживача.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Проаналізувати сучасний стан та напрями застосування установок зберігання енергії в системах електропостачання підприємств. 2. Розглянути основні типи та режими роботи промислових установок зберігання енергії. 3. Дослідити схемні рішення інтеграції УЗЕ в систему електропостачання підприємства. 4. Оцінити техніко-економічну ефективність застосування установок зберігання енергії. 5. Проаналізувати вимоги до безпеки, стандартизації та сертифікації промислових УЗЕ. 6. Розробити стартап-проект

комерційного впровадження рішення на базі установок зберігання енергії.

6.Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження (алгоритми розрахунків та результати моделювання)

7.Орієнтовний перелік публікацій на науковій конференції PEMS-2025 на тему «Підвищення ефективності гібридних систем енергозабезпечення за рахунок застосування установок зберігання енергії»

8.Консультанти розділів дисертації

*Нормоконтроль*

*Прокопенко І.Д.*

9.Дата видачі завдання 30 жовтня 2025 року

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	01.04.2025	
2	Визначення методів дослідження	01.05.2025	
3	Оформлення першого розділу	01.06.2025	
4	Робота над другим розділом	01.07.2025	
5	Робота над третім розділом, практичного впровадження дисертаційної роботи	26.10.2025	
6.	Розробка стартап проєкту	15.11.2025	
7.	Оформлення дисертації	01.12.2025	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	15.12.2025	
9.	Захист дисертації	24.12.2025	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Шаповалов О.О.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис) (ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_

Притискач І.В

## РЕФЕРАТ

Обсяг магістерської дисертації налічує 172 аркуші, 32 рисунки, 21 таблиця, 44 літературних джерела.

**Актуальність:** Існує низка факторів, що зумовлюють актуальність впровадження установок зберігання енергії у складі систем електропостачання комерційних та промислових споживачів. Насамперед це пов'язано з міжнародними та національними вимогами щодо зменшення викидів парникових газів, які передбачають активне впровадження відновлювальних джерел енергії та підвищення гнучкості енергосистем. Зростання частки сонячної генерації призводить до нерівномірного виробітку електричної енергії, що, в свою чергу, формує потребу у використанні систем накопичення для балансування генерації та споживання. Додатковим чинником є зростання тарифів на електричну енергію та впровадження погодинного або динамічного обліку, що стимулює споживачів шукати інструменти оптимізації власного енергоспоживання.

Значна частина комерційних і промислових об'єктів характеризується наявністю навантажень із вираженим динамічним характером, зокрема електродвигунів, насосів, вентиляційних систем, компресорів, виробничого обладнання тощо. Такі споживачі формують пікові навантаження та нерівномірний профіль споживання електричної енергії, що ускладнює ефективне використання генерації сонячної електростанції без додаткових технічних рішень. У цьому контексті установка зберігання енергії виступає як засіб згладжування пікових навантажень, зменшення імпорту електроенергії з мережі у критичні періоди та підвищення стабільності електропостачання.

Необхідність дослідження режимів роботи та методів керування установкою зберігання енергії зумовлена потребою досягнення оптимального балансу між технічною надійністю, ефективністю використання енергії та економічною доцільністю впровадження таких систем. Раціонально обрані стратегії заряджання і розряджання УЗЕ дозволяють підвищити рівень само

споживання електроенергії, виробленої сонячною електростанцією, зменшити витрати на електропостачання та забезпечити більш прогнозовану й стійку роботу енергетичної системи споживача. У сукупності це робить установки зберігання енергії важливим елементом сучасних розподілених енергетичних систем.

**Метою даного дослідження є** аналіз та обґрунтування доцільності впровадження установки зберігання енергії у складі системи електропостачання підприємства з власною сонячною електростанцією з урахуванням особливостей подинного обліку електричної енергії, режимів використання УЗЕ для підвищення ефективності роботи сонячної генерації та оптимізації енергоспоживання підприємства.

**Об'єкт дослідження:** система електропостачання комерційного підприємства з інтегрованою сонячною електростанцією та установкою зберігання енергії.

**Предмет дослідження:** методи та алгоритми керування установкою зберігання енергії, режими її заряджання, а також схемні рішення інтеграції УЗЕ у систему електропостачання споживача.

**Наукова новизна:** Розроблено новий підхід до моделювання гібридної системи електропостачання комерційного споживача, який враховує змінність графіків генерації та споживання, технічні обмеження УЗЕ за потужністю й енергоємністю, динаміку стану заряду, а також втрати перетворення енергії, що забезпечує адекватне відтворення реальних енергетичних потоків і режимів роботи.

Запропоновано техніко-економічне обґрунтування впровадження установки зберігання енергії у системі електропостачання комерційного споживача з власною СЕС, яке базується на оптимізації режимів заряджання/розряджання з урахуванням часово-диференційованих тарифів та експлуатаційних обмежень і дозволяє оцінити економічний ефект (зниження витрат на електроенергію, підвищення частки самоспоживання генерації СЕС, зменшення пікових перетоків із мережі) та показники ефективності інвестицій.

**Практичне значення роботи.** За основу дисертаційної роботи було взято реальний об'єкт як вихідні дані для моделювання та аналізу роботи установок зберігання енергії. На основі реальних профілів навантаження та генерації сонячної електростанції було досліджено різні режими експлуатації УЗЕ, що дозволило оцінити їхній вплив на ефективність використання електричної енергії, зменшення пікових навантажень та економічні показники роботи енергетичної системи підприємства.

**Апробація результатів дослідження:** Результати деяких досліджень магістерської дисертації були оприлюднені на XI Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції, «ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: стан та перспективи розвитку – PEMS'25» м. Київ 18-20 листопада 2025 р. URL: <http://pems.kpi.ua/proc/issue/archive>

**Ключові слова:** УСТАНОВКА ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, КОМЕРЦІЙНИЙ СПОЖИВАЧ, ПІКОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ПОГОДИННИЙ ОБЛІК.

## ABSTRACT

The master's thesis comprises 172 pages, 32 figures, 21 tables, 44 references.

Relevance of the study: There are numerous factors that determine the relevance of implementing energy storage systems as part of the power supply systems of commercial and industrial consumers. First of all, this is related to international and national requirements aimed at reducing greenhouse gas emissions, which imply the active deployment of renewable energy sources and an increase in the flexibility of power systems. The growing share of solar generation leads to uneven electricity production, which in turn creates a need for energy storage systems to balance generation and consumption. An additional driving factor is the increase in electricity tariffs and the introduction of hourly or dynamic metering, which encourages consumers to seek tools for optimizing their own energy consumption.

A significant share of commercial and industrial facilities is characterized by loads with a pronounced dynamic nature, including electric motors, pumps, ventilation systems, compressors, and various types of industrial equipment. Such consumers form peak loads and an uneven electricity consumption profile, which complicates the efficient use of electricity generated by solar power plants without additional technical solutions. In this context, energy storage systems serve as a means of peak load smoothing, reducing electricity imports from the grid during critical periods, and increasing the stability of power supply.

The need to study operating modes and control methods of energy storage systems is driven by the necessity to achieve an optimal balance between technical reliability, energy efficiency, and economic feasibility of their implementation. Properly selected charging and discharging strategies make it possible to increase the level of self-consumption of electricity generated by a solar power plant, reduce electricity supply costs, and ensure more predictable and stable operation of the consumer's energy system. Taken together, this makes energy storage systems an important element of modern distributed energy systems.

The purpose of the study is to analyze and substantiate the feasibility of implementing an energy storage system as part of the power supply system of an enterprise with its own solar power plant, taking into account the specifics of hourly electricity metering and the operating modes of energy storage systems aimed at improving the efficiency of solar generation and optimizing the enterprise's energy consumption.

Object of the study: the power supply system of a commercial enterprise with an integrated solar power plant and an energy storage system.

Subject of the study: methods and algorithms for controlling an energy storage system, its charging modes, as well as circuit solutions for integrating the energy storage system into the consumer's power supply system.

Scientific novelty: A new approach to modeling a hybrid power supply system for a commercial consumer has been developed. The proposed approach takes into account the variability of generation and consumption profiles, technical constraints of the energy storage system in terms of power and energy capacity, the dynamics of the state of charge, as well as energy conversion losses. This ensures an adequate representation of real energy flows and operating modes.

A techno-economic justification for the implementation of an energy storage system in the power supply system of a commercial consumer with its own photovoltaic power plant is proposed. The justification is based on the optimization of charging and discharging modes considering time-differentiated electricity tariffs and operational constraints. It enables the assessment of the economic effect, including a reduction in electricity costs, an increase in the share of self-consumption of PV generation, and a decrease in peak power exchanges with the grid, as well as key investment performance indicators.

Practical significance of the study. The master's thesis is based on a real facility used as input data for modeling and analyzing the operation of energy storage systems. Based on real load profiles and solar power generation data, various operating modes of the energy storage system were investigated, which made it possible to assess their

impact on energy efficiency, peak load reduction, and the economic performance of the enterprise's energy system.

Approbation of research results. Some of the results of the master's thesis research were presented at the XI International Scientific, Technical, and Educational Conference "Energy Management: Current State and Development Prospects – PEMS'25", Kyiv, November 18–20, 2025. URL:<http://pems.kpi.ua/proc/issue/archive>

Keywords: ENERGY STORAGE SYSTEM, SOLAR POWER PLANT, COMMERCIAL CONSUMER, PEAK LOAD, HOURLY METERING.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
1 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ РОБОТИ З МЕРЕЖЕЮ .....	16
1.1 Мета, задачі та функціональні ролі УЗЕ на підприємстві .....	16
1.1.1 Основні положення.....	17
1.1.2 Порівняння способів встановлення УЗЕ ВТМ (Behind the meter) та FTM (Front the meter) .....	19
1.2 Аналіз типів установок зберігання енергії .....	22
1.2.1 Літій-іонні системи зберігання енергії .....	26
1.2.2 Свинцево-кислотні системи зберігання енергії .....	30
1.2.3 Натрій-іонні системи зберігання енергії .....	33
1.2.4 Натрій-сірчані установки зберігання енергії .....	35
1.2.5 Редокс-ванадієві системи зберігання енергії .....	38
1.3 Класифікація установок зберігання енергії за режимом і тривалістю .....	41
1.4 Схемні рішення інтеграції установок зберігання енергії в системи електропостачання підприємств.....	43
1.5 Основні компоненти перетворення та керування в установках зберігання енергії .....	46
1.6 Показники та методи оцінювання техніко-економічної ефективності установок зберігання енергії.....	48
1.6.1 Економічні показники .....	49
1.6.2 Технічні показники .....	52
1.7 Стандарти та вимоги до безпеки і сертифікації промислових установок зберігання енергії.....	54
1.7.1 Електробезпека установок зберігання енергії.....	54
1.7.2 Забезпечення кібербезпеки установок зберігання енергії .....	56
1.8 Тенденції та перспективи розвитку технологій для промислових застосувань.....	58
Висновки до розділу 1 .....	60
2 АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТУ З УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ВЛАСНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ .....	62
2.1 Математичні моделі потоків потужності та енергетичного балансу в гібридній системі енергозабезпечення.....	62
2.2.1 Загальні припущення та структура моделі.....	63

2.2.2	Баланс активної потужності у вузлі приєднання.....	64
2.2.3	Модель активної потужності сонячної електричної станції .....	65
2.2.4	Модель установки зберігання електроенергії та її енергетичної динаміки.....	66
2.2.5	Модель навантаження споживача та втрат активної потужності .....	68
2.2.6	Інтегральні рівняння енергетичного балансу .....	69
2.2.7	Узагальнення для подальших оптимізаційних задач .....	70
2.3	Опис режимів роботи установки зберігання енергії .....	71
2.3.1	Режим заряджання .....	71
2.3.2	Режим розряджання .....	73
2.3.3	Стаціонарний режим.....	74
2.3.4	Режим очікування .....	75
2.3.5	Аварійний режим .....	76
2.3.6	Режим зупинки .....	77
2.4	Моделі установки зберігання електроенергії та обмеження її функціонування в складі гібридної системи .....	78
2.4.1	Роль установок зберігання електроенергії та вимоги до математичного опису.....	79
2.4.2	Класифікація моделей установки зберігання електроенергії.....	80
2.4.3	Енергетична модель стану заряду установки зберігання .....	81
2.4.4	Моделі на основі еквівалентних електричних схем .....	82
2.4.5	Моделі деградації ємності та ресурсу установки зберігання .....	83
2.4.6	Обмеження функціонування установки зберігання в складі гібридної системи.....	85
2.4.7	Інтеграція моделей установки зберігання в оптимізаційні задачі гібридної системи.....	86
2.5	Постановка задачі оптимального керування режимами роботи гібридної системи з установкою зберігання електроенергії.....	88
2.5.1	Загальна ідея задачі та вибір горизонту планування.....	88
2.5.2	Змінні керування, змінні стану та вхідні дані задачі.....	89
2.5.3	Формулювання цільової функції економічної оптимізації.....	90
2.5.4	Система обмежень задачі оптимального керування .....	92
2.5.5	Розширені постановки задачі оптимального керування .....	95

2.6	Опис та порівняння розглянутих методів керування установкою зберігання енергії .....	96
2.6.1	Використання УЗЕ для заряджання від надлишкової генерації СЕС ..	96
2.6.2	Використання УЗЕ для заряджання від надлишкової генерації СЕС та у нічні години .....	98
2.6.3	Використання УЗЕ на основі прогнозу майбутньої генерації СЕС, цін на електроенергію та споживання .....	100
	Висновки до розділу 2 .....	103
3	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ З УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ .....	105
3.1	Вихідні дані для моделювання та характеристика досліджуваних промислових підприємств .....	105
3.1.1	Загальна характеристика досліджуваних об'єктів .....	105
3.1.2	Використання площі промислових підприємств для розміщення сонячної електричної станції .....	107
3.1.3	Електричне навантаження та графіки споживання електроенергії ...	108
3.1.4	Параметри установки зберігання електроенергії .....	109
3.2	Моделювання сонячної електричної станції у середовищі System Advisor Model.....	111
3.2.1	Вибір типу моделі та конфігурації проєкту .....	112
3.2.2	Формування вхідних метеорологічних даних та вибір місцезнаходження .....	113
3.2.3	Налаштування конструкції фотоелектричного поля та електричних параметрів .....	114
3.2.4	Моделювання втрат та допоміжних елементів системи .....	116
3.2.5	Імпорт часових профілів навантаження та узгодження з моделлю сонячної електричної станції .....	118
3.2.6	Розрахунок енергетичних показників та підготовка даних для інтеграції з моделлю установки зберігання електроенергії.....	120
3.3	Моделювання установки зберігання електроенергії та алгоритмів її диспетчеризації в складі гібридної системи.....	122
3.3.1	Вибір конфігурації моделі установки зберігання електроенергії .....	122
3.3.2	Задання параметрів УЗЕ .....	123
3.3.3	Обмеження режимів роботи та модель довговічності установки зберігання.....	125

3.3.4 Налаштування джерел заряджання та напрямків розряджання в гібридній системі .....	127
3.3.5 Алгоритми диспетчеризації установки зберігання електроенергії за обліковим приладом .....	129
3.4 Аналіз результатів моделювання та оцінювання ефективності впровадження гібридної системи енергозабезпечення .....	134
3.4.1 Структура сценаріїв моделювання гібридної системи .....	134
3.4.2 Налаштування моделі установки зберігання електроенергії в програмному середовищі System Advisor Model .....	136
3.4.3 Алгоритми диспетчеризації установки зберігання електроенергії та їх реалізація у програмному середовищі System Advisor Model.....	139
3.4.4 Аналіз часових профілів потужності та стану заряду за результатами моделювання.....	142
3.4.5 Порівняння енергетичних показників гібридної системи за сценаріями .....	144
3.4.6 Техніко економічна оцінка ефективності впровадження гібридної системи.....	145
3.4.7 Узагальнення результатів аналізу ефективності впровадження гібридної системи.....	147
Висновки до розділу 3 .....	148
4 СТАРТАП-ПРОЄКТ .....	151
4.1 Опис ідеї стартап-проєкту .....	151
4.2 Технологічний аудит проєкту .....	153
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	154
4.4 Розробка маркетингової програми старап-проєкту .....	161
Висновок до розділу 4 .....	164
ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	168

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОЕС – об'єднана енергетична система;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

СЕС – сонячна електростанція;

УЗЕ – установка зберігання енергії;

АКБ – акумуляторна батарея;

ОСР – оператор системи розподілу;

BMS – система керування батареєю (Battery Management System);

EMS – система енергетичного менеджменту (Energy Management System);

BTM – система накопичення енергії, встановлена на стороні споживача (Behind-the-Meter);

FTM – система накопичення енергії, підключена до мережі (Front-of-the-Meter);

SOC – стан заряду акумуляторної батареї (State of Charge);

SOH – стан здоров'я акумуляторної батареї (State of Health);

ККД – коефіцієнт корисної дії;

LiFePO<sub>4</sub> – літій-залізо-фосфатний тип акумулятора;

РП – розподільчий пункт;

АС – змінний струм;

DC – постійний струм;

## ВСТУП

Існує низка факторів, що зумовлюють актуальність впровадження сонячних електростанцій у поєднанні з установками зберігання енергії для комерційних та промислових споживачів. Насамперед це міжнародні та національні вимоги щодо зменшення викидів парникових газів, які передбачають активний розвиток відновлюваних джерел енергії та підвищення гнучкості енергетичних систем. Розбудова розподіленої генерації сприяє підвищенню надійності та енергетичної незалежності електропостачання споживачів, особливо в умовах зростаючої частки сонячної генерації. Додатковим стимулювальним чинником є підвищення тарифів на електричну енергію та впровадження погодинного або динамічного обліку, що спонукає споживачів до встановлення власних генеруючих установок і пошуку ефективних інструментів оптимізації енергоспоживання. Для бізнесу інтеграція об'єктів «зеленої» енергетики створює можливості як для зменшення витрат на електропостачання, так і для використання передбачених законодавством стимулюючих механізмів.

Значна частина комерційних і промислових споживачів характеризується нерівномірним профілем електроспоживання та наявністю пікових навантажень, що ускладнює ефективне використання електроенергії, виробленої сонячною електростанцією. За відсутності додаткових технічних рішень надлишкова генерація СЕС часто обмежується або передається в мережу за економічно не вигідними умовами, тоді як у періоди пікового споживання виникає необхідність імпорту дорогої електроенергії з мережі. У цьому контексті установка зберігання енергії виступає як ключовий елемент, що дозволяє акумулювати надлишкову генерацію, згладжувати пікові навантаження, зменшувати імпорт електроенергії у критичні години та підвищувати стабільність і прогнозованість роботи системи електропостачання споживача.

# 1 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ РОБОТИ З МЕРЕЖЕЮ

## 1.1 Мета, задачі та функціональні ролі УЗЕ

Під час впровадження установки зберігання енергії у складі сонячної електростанції виникає низка питань, пов'язаних з інтеграцією такої системи до електричних мереж об'єднаної енергетичної системи України або до мережі оператора системи розподілу. Для коректного приєднання необхідно враховувати технічні вимоги, що встановлюються нормативно-правовими актами та державними і міжнародними стандартами щодо експлуатації установок зберігання енергії, а також вимоги до споживача – власника таких установок.

За наявності УЗЕ у складі СЕС змінюється підхід до управління надлишковою електричною енергією. Окрім безпосереднього використання електроенергії для власних потреб, з'являється можливість її накопичення з подальшим використанням у інші часові періоди, що дозволяє підвищити економічну ефективність проєкту. У певних випадках накопичена енергія може бути використана для оптимізації балансу споживання або для участі у механізмах ринку електричної енергії відповідно до чинного законодавства, зокрема шляхом зменшення споживання в години високих тарифів або компенсації небалансів.

У даному підрозділі розглядаються можливі моделі інтеграції установки зберігання енергії у систему електропостачання споживача, основні технічні та нормативні вимоги до власника УЗЕ, а також потенційні сценарії використання накопиченої електричної енергії в умовах сучасного ринку електричної енергії України.

### 1.1.1 Основні положення

УЗЕ (установка зберігання енергії або СНЕ – система накопичення енергії) – це система, яка використовує акумулятори для накопичення електричної енергії. Вони можуть виконувати цілий ряд функцій в електромережі або для інтеграції відновлюваних джерел енергії. УЗЕ розділяються на дві основні категорії:

1. Установка зберігання енергії встановлена на стороні споживача – це система накопичення електричної енергії, встановлена на стороні споживача електроенергії і фізично підключена після точки комерційного обліку, тобто всередині електрогосподарства підприємства. Такі системи працюють переважно для внутрішніх цілей споживача – підвищення надійності живлення, зниження плат за максимальну потужність, покращення якості електроенергії, інтеграції власної генерації з ВДЕ та керування добовим графіком навантаження.
2. Установка зберігання енергії встановлена на стороні генерації – це системи накопичення електричної енергії, підключені до мережевого боку, які взаємодіють із системним оператором/операторами мереж і націлені на надання системних або ринкових послуг (резерви, балансування, регулювання частоти тощо).

УЗЕ зазвичай називають стаціонарними акумуляторами, які можуть дуже гнучко зберігати та вивільняти електроенергію. Залежно від їхньої конструкції та розміру, вони можуть використовуватися та комерціалізуватися дуже різними способами.

В енергетичній галузі УЗЕ використовуються для різних цілей, таких як балансування попиту та пропозиції енергії в мережі, надання допоміжних послуг та забезпечення інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Системи акумуляторного накопичення енергії бувають абсолютно різних масштабів – від житлових систем акумуляторного накопичення розміром з холодильник до так званих акумуляторних електростанцій, великих

комунальних систем, які займають цілі вулиці або промислові зони. Їхня ємність (кількість енергії, яку можна зберігати або вивільняти) та потужність (швидкість, з якою енергія може вивільнятися) відповідно різняться[1].

Більшість енергетичних систем мають змінний попит з деякими короткостроковими, але значними піковими потребами в потужності, що призводить до потреби в потужності, яка може використовуватися лише протягом частки часу. Акумуляування енергії дозволяє зберігати енергію для подальшого використання, створює можливості та ефективність низьковитратної енергії для електромережі та допомагає пом'якшити зміну клімату.

Відновлювані джерела енергії мають переривчастий характер, тобто їхня потужність з виробництва енергії змінюється з часом. Акумуляування енергії з відновлюваних джерел енергії може уникнути будь-якого скорочення відновлюваних джерел енергії за сприятливих погодних умов, коли генерується надлишок вітрової або сонячної енергії[2].

Найпоширеніші категорії акумуляторних батарей, доступні на ринку зараз:

- свинцево-кислотні (вдосконалені, із затопленими елементами та герметичні)
- літійові (іонні та полімерні)
- нікелеві (гідриди металів та кадмій)
- проточні (окисно-відновні, бром цинку та ванадію)
- аналогові натрій-іонні.

Свинцево-кислотні акумулятори є найпоширенішим типом акумуляторів у побутових та невеликих комерційних системах зберігання енергії. Вони мають довгу історію використання в Австралії, а з кінця 1980-х років використовуються для автономного та резервного живлення. Літій-іонні акумулятори набувають все більшої популярності, оскільки вони мають тривалий термін служби та високу щільність енергії (тобто можуть зберігати багато енергії на одиницю об'єму)[3].

Нікелеві, проточні та натрій-іонні аналогові акумулятори менш поширені, але можуть бути корисними в певних застосуваннях (наприклад, проточні акумулятори можуть добре підходити для щоденного перемикання енергії, або натрій-іонні можуть бути найкращим вибором за певних температур навколишнього середовища). На рисунку 1.1 показано широкі категорії акумуляторних накопичувачів енергії, доступних на даний момент. Список для кожної категорії розміщено в порядку, причому найбезпечніший тип знаходиться зверху. Крім того, технології впорядковані зліва направо відповідно до їхньої технологічної та ринкової зрілості, причому найзріліші знаходяться зліва[8].

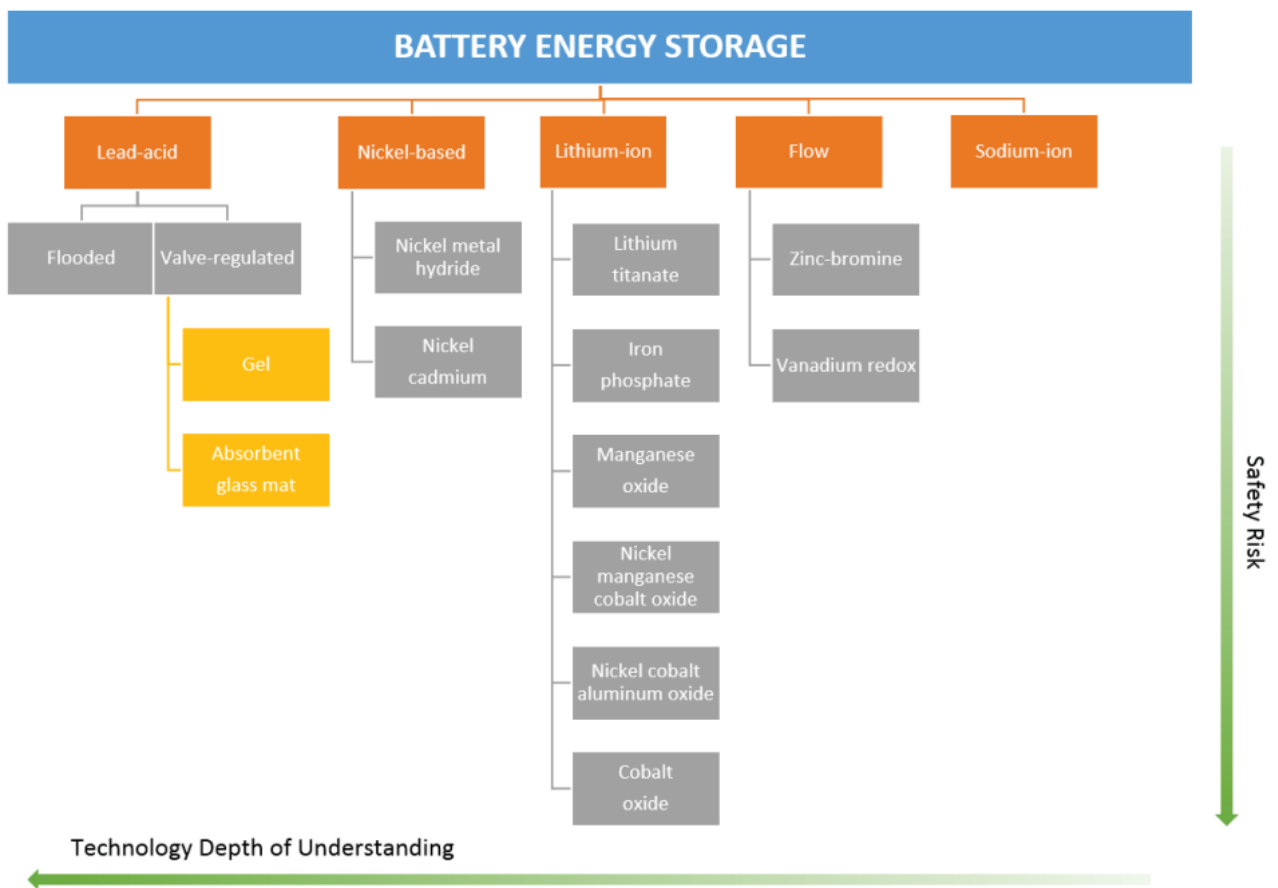


Рисунок 1.1 – Категорії акумуляторних накопичувачів енергії[3]

### 1.1.2 Порівняння способів встановлення УЗЕ ВТМ (Behind the meter) та FTM (Front the meter)

Залежно від місця підключення установки зберігання енергії відносно точки комерційного обліку електричної енергії розрізняють два основні способи

її встановлення: на стороні споживача (Behind-the-Meter, BTM) та на стороні мережі (Front-of-the-Meter, FTM). Така класифікація є принциповою, оскільки визначає не лише технічну схему інтеграції УЗЕ, але й її функціональне призначення, режими роботи, економічні механізми використання та нормативні вимоги до експлуатації.

Установки зберігання енергії типу BTM розміщуються безпосередньо у системі електропостачання споживача, за приладом комерційного обліку, і призначені насамперед для оптимізації власного енергоспоживання. Такі системи дозволяють підвищити рівень самоспоживання електроенергії, виробленої сонячною електростанцією, зменшити пікові навантаження та знизити витрати на електропостачання. Натомість установки типу FTM підключаються до електричної мережі перед точкою обліку та розглядаються як окремий елемент енергетичної інфраструктури, що може надавати послуги балансування, регулювання потужності та підтримки стабільності енергосистеми.

Вибір між BTM- та FTM-рішеннями залежить від цілей проєкту, характеру навантаження, структури тарифів, регуляторного середовища та можливостей участі у ринку електричної енергії. Для комерційних і промислових споживачів пріоритетним зазвичай є варіант BTM, орієнтований на зменшення витрат і підвищення енергетичної незалежності, тоді як FTM-рішення більш характерні для операторів мережі або незалежних інвесторів, які працюють у межах ринкових і балансуєчих механізмів. Саме тому порівняльний аналіз цих двох підходів у таблиці 1.1 є важливим етапом при обґрунтуванні доцільності впровадження установок зберігання енергії.

Таблиця 1.1 - Порівняння BTM та FTM систем установок зберігання енергії

Критерії	Behind the meter	Front the meter
Місце підключення	Після комерційного лічильника, всередині електрогосподарства споживача	До мережі оператора до комерційного лічильника споживача

Продовження таблиці 1.1

Власність/операція	Споживач або стороння компанія	Власник – генератор/оператор активів Оператор – диспетчер або ринковий оператор
Головна мета	Зменшення витрат і технологічних ризиків на майданчику (резервне живлення, згладжування піків і т.п.	Надання системних/ринкових послуг (резерви, балансування, регулювання частоти, відкладені мережеві інвестиції)
Джерела вигоди	Економія на платі за потужність і енергію; підвищення якості напруги	Дохід від ринків допоміжних послуг, арбітраж енергії, мережеві контракти
Типові сервіси	ДБЖ, згладжування піків навантаження, компенсація реактиву, згладжування сонячної генерації	первинне регулювання частоти/вторинне регулювання частоти, перетікання по годинах/ринках
Сигнали керування	Локальні правила EMS - система енергоменеджменту (власні ККД процесу, графіки роботи)	Диспетчерські/ринкові (AGC (автоматичне керування генерацією), розпорядження ОСП/ОСР, графіки торгів)
Облік	Комерційний облік на РСС(точка спільного приєднання) відображає лише обмін з мережею; внутрішні лічильники	Комерційний облік усіх перетоків з мережею/ринком
Регуляторні вимоги	Як «установка споживача» (електробезпека, пожежна безпека об'єкта)	Додатково: вимоги до генераторів та підключення до мереж СН/ВН
Режими	Від секунд (ДБЖ) до 1–4 год (піки/підтримка режиму споживання);	1–4 год і більше; конфігурація під конкретний ринок послуг
Масштаби	Десятки–сотні кВт, до кількох МВт/МВт·год	Десятки МВт і вище (промислового масштабу)
Безпека	Завадостійкість, вентиляція/ОВіК, системи виявлення/гасіння в будівлі або контейнері	Додаткові мережеві погодження, відстані/санітарні зони, вимоги до проммайданчика

## Продовження таблиці 1.1

Складність дозволів	Переважно внутрішні регламенти підприємства + погодження ОСР по зворотних перетоках	Повноцінна мережево-регуляторна процедура (проект, експертизи, договори приєднання)
КРІ (ключові показники ефективності)	Зниження максимумів, годин «дорогої» енергії, скорочення простоїв/браку, ККД циклу «заряд-розряд», SOH/DoD(ємність батареї, глибина розряду)	Дохід/МВт, надійність надання послуг, доступність, точність слідування сигналам
Доцільність	Є пікові штрафи, чутливість до перебоїв живлення, власна сонячна генерація/нестабільний профіль	Потрібні системні послуги, є ринок/контракти й мережевий дефіцит у вузлі

Зазвичай ВТМ системи встановлюються на підприємствах за потреби самого підприємства або при суттєвій економічній вигоді для нього, в деяких випадках встановлюється на підприємствах сторонньою компанією для використання вже оформленого підключення підприємства.

FTM в більшості будують великі гравці або держава, це відбувається через доволі високий економічний поріг входу в таке будівництво та складність оформлення/реєстрації такої установки.

## 1.2 Аналіз типів установок зберігання енергії

В умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії, підвищення вимог до надійності електропостачання та необхідності балансування електроенергетичних систем особливого значення набувають установки зберігання електроенергії (УЗЕ). Вони забезпечують накопичення електричної енергії у періоди надлишкової генерації з подальшим її використанням у моменти підвищеного попиту або виникнення дисбалансів у системі.

Установки зберігання електроенергії характеризуються значною різноманітністю технічних рішень, що зумовлює необхідність їх систематизації та класифікації. Аналіз типів УЗЕ дозволяє визначити їх функціональні можливості, переваги та обмеження, а також обґрунтувати доцільність застосування конкретних технологій залежно від умов експлуатації та поставлених завдань.

Найбільш поширеним є поділ установок зберігання електроенергії за фізичним принципом накопичення енергії. Відповідно до цього критерію виділяють електрохімічні, механічні, електричні та теплові установки зберігання електроенергії. Кожна з наведених груп має специфічні характеристики, що визначають сферу її практичного використання.

Крім принципу дії, установки зберігання електроенергії можуть класифікуватися за потужністю та енергоємністю, що дозволяє умовно поділити їх на системи короткотривалого, середньотривалого та довготривалого зберігання енергії. Такий поділ є важливим з точки зору вибору УЗЕ для задач регулювання частоти, згладжування пікових навантажень, добового вирівнювання графіків споживання або сезонного балансування.

Класифікація установок зберігання електроенергії за принципом дії є наступна:

1. Електрохімічні установки зберігання електроенергії - це батарейні системи, які можуть швидко реагувати на зміну навантаження, мають високу ефективність та добре підходять для інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. У них накопичення енергії відбувається за рахунок оборотних електрохімічних реакцій. Під час заряджання електрична енергія перетворюється на хімічну, а під час розряджання – знову на електричну. Прикладами є:
  - Літій-іонні батареї;
  - Літій-залізно-фосфатні батареї;
  - Натрій-іонні батареї;
  - Проточні батареї.

2. Механічні установки зберігання енергії – це установки які зазвичай мають велику потужність і значну енергоємність, але потребують спеціальних географічних або інфраструктурних умов. У них електрична енергія перетворюється на механічну енергію руху або положення, яка зберігається протягом певного часу, а потім знову перетворюється на електричну. Прикладами є:
  - Гідроакумуючі електростанції;
  - Установки зі стисненим повітрям;
  - Маховикові накопичувачі енергії.
3. Електричні установки зберігання електроенергії - це установки які характеризуються надзвичайно швидкою реакцією, але, як правило, мають обмежену енергоємність, що обмежує тривалість зберігання електроенергії. У них енергія зберігається безпосередньо в електричному або магнітному полі без проміжного перетворення в інші форми. Прикладами є:
  - Суперконденсатори;
  - Надпровідні магнітні накопичувачі енергії
4. Теплові установки зберігання електроенергії – це установки які доцільні для довготривалого зберігання, однак повторне перетворення в електричну енергію супроводжується втратами. Принципом роботи є наступний процес – електрична енергія перетворюється на теплову, яка накопичується в теплоносії, а згодом може бути використана безпосередньо або знову перетворена на електричну. Прикладами таких установок є:
  - Системи акумулювання тепла з використанням розплавлених солей;
  - Установки з твердотільними теплоаккумуляторами.

Таким чином, класифікація установок зберігання електроенергії за принципом дії дозволяє чітко розмежувати технології за фізичною природою процесів накопичення енергії. Кожен тип УЗЕ має власні технічні та

експлуатаційні особливості, що зумовлює доцільність їх застосування для різних задач електроенергетичних систем..

Електрохімічні системи накопичення енергії нині є домінуючим класом технологій для промислових та комерційних УЗЕ завдяки поєднанню високої питомої потужності, швидкої динаміки, порівняно високого ККД циклу та модульності. На відміну від механічних або теплових акумуляторів, батареїні рішення легко масштабуються, мають зрозумілі інтерфейси до електромереж 0,4/6/10 кВ і добре інтегруються з системами керування (BMS/EMS). Для задач підприємства – від зрізання піків та тарифного арбітражу до резервування критичних навантажень і згладжування генерації ВДЕ – саме електрохімічні УЗЕ найчастіше забезпечують оптимальний баланс технічної ефективності, безпеки та вартості володіння[4][5][6].

У межах цього підрозділу розглядаються п'ять основних хімії, які реально використовуються у великих УЗЕ: літій-іонні (насамперед LFP і NMC), свинцево-кислотні (включно з свинцево-вуглецевими), натрій-іонні (Na-ion), натрій-сірчані (NaS) та редокс-ванадієві проточні (VRFB). Літій-іонні системи формують умовний стандарт для короткотривалих та середньотривалих режимів ( $\approx 1-4$  год), поєднуючи високий ККД і компактність; LFP зазвичай обирають за кращі показники безпеки/ресурсу та вартість, тоді як NMC – коли критична обмежена площа/маса. Свинцеві рішення історично поширені й привабливі низьким стартовим CAPEX та простою утилізацією, але поступаються за щільністю енергії і цикловою стійкістю. Na-ion – новий економічний кандидат для стаціонарних систем із помірними вимогами до щільності та доволі привабливою вартістю за кВт·год. Для довших вікон віддачі (4-8+ год) використовують NaS і VRFB: перші – як зріле високотемпературне рішення великої ємності, другі – як проточні системи з дуже високою цикловою витривалістю і гнучким масштабуванням тривалості[4][5][6].

Вибір конкретної хімії в ВТМ-проектах визначається не лише тривалістю та потужністю, а й вимогами безпеки (пожежна стійкість, газо/димовиділення), температурним режимом, доступним простором, допустимим рівнем

шуму/тепловиділення, інфраструктурою OВiK, а також економікою життєвого циклу (TCO/LCOS), наявністю сервісної підтримки і вимогами регулятора/страховика. Загалом, коли основні функції – зрізання піків навантаження, тарифний арбітраж, якість електроенергії та швидкий резерв, у більшості промислових кейсів доцільною стартовою опцією буде LFP; коли ж потрібно довший період віддачі без суттєвої деградації або коли площа не є обмеженням, варто аналізувати VRFB чи NaS, а Na-іон може стати бюджетним компромісом. Детальний аналіз електрохімічних установок зберігання енергії наведено у наступних підрозділах[4][5][6].

### 1.2.1 Літій-іонні системи зберігання енергії

Літій-іонні системи зберігання енергії – базова технологія для промислових та ВТМ-застосувань. Ключова відмінність між родинами LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ) і NMC ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) – у катодному матеріалі: олівінна фосфатна структура LFP забезпечує вищу термостійкість і довший ресурс, тоді як шаруваті оксиди NMC дають вищу щільність енергії (менший габарит/маса на кВт·год), більшої чутливості до температури, режимів заряду та хімічної стабільності. На рисунку 1.2 показано хімічні процеси у літій-іонних батареях. А на рисунку 1.3 приклад реалізованої установки на основі таких батарей.

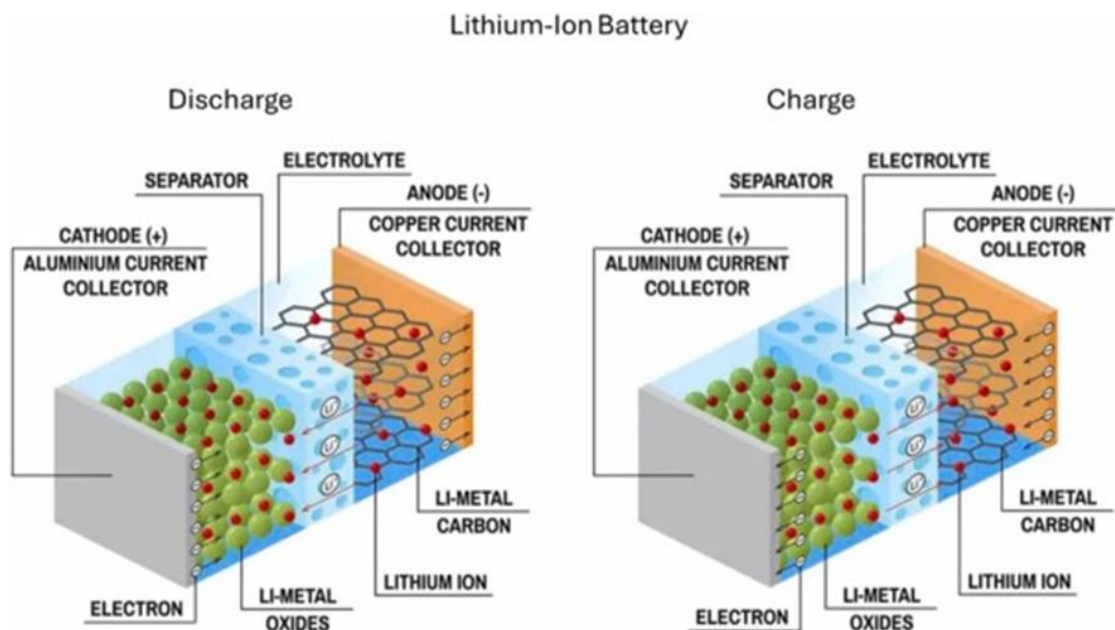


Рисунок 1.2 Ілюстрація хімічних процесів літій-іонних батарей[7]

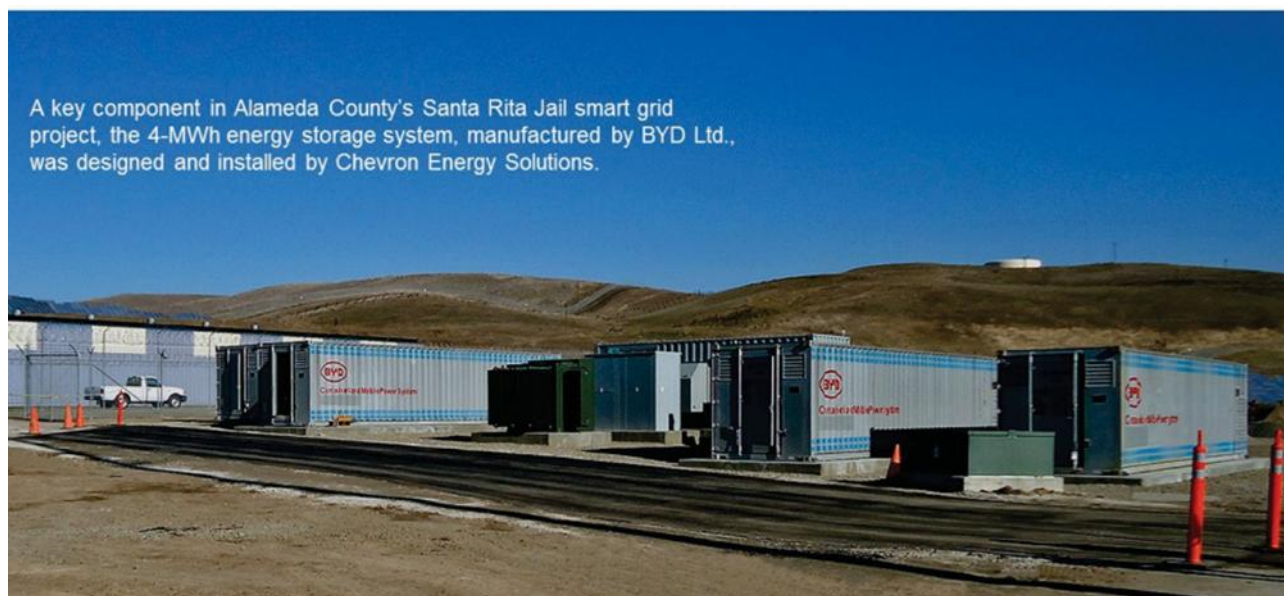


Рисунок 1.3 – 2МВт/4МВт\*год літій іонна УЗЕ в Аламеді[7]

У таблиці 1.2 подано порівняння впливу старіння та деградації на акумулятори.

Таблиця 1.2 - Порівняння впливу старіння та деградації на акумулятори LFP та NMC[7].

Аспект	LFP	NMC
Термін циклічного ресурсу та втрата ємності	Довший циклічний ресурс і менша втрата ємності з часом.	Коротший циклічний ресурс і швидше згасання ємності.
Термічна стабільність і тепловиділення	Вища термічна стабільність; менш схильна до перегрівання .	Нижча термічна стабільність; більш схильна до тепловиділення та термічної деградації.
Механічна стабільність і структурні зміни	Краща механічна стабільність, мінімальні структурні зміни під час циклування .	Комірки схильні до структурних змін (тріщини, руйнування часток), що прискорює деградацію.
Електрохімічна стабільність і побічні реакції	Стабільніше електрохімічне середовище; менше побічних реакцій, що сприяють деградації .	Схильна до побічних реакцій, зокрема розклад електроліту та розчинення перехідних металів.
Вплив ступеня заряду (SoC) та глибини розряду (DoD)	Стійка за SoC і DoD; менша деградація від глибоких циклів.	Більш чутлива до високого SoC і глибокого DoD; швидша деградація за екстремальних режимів циклування.

## Продовження таблиці 1.2

Швидкість заряду та протоколи заряджання	Витримує різні швидкості заряду; швидке заряджання слід виконувати обережно, щоб мінімізувати деградацію.	Більш чутлива до високих швидкостей заряду, ніж інші типи; можливе прискорене старіння за протоколів швидкого заряджання.
Умови навколишнього середовища	Менш чутлива до несприятливих умов і добре працює в ширшому діапазоні температур.	Під час роботи може знадобитися контрольоване середовище, щоб уникати екстремальних/ненормальних умов, які спричиняють нестабільність і скорочують строк служби.

У таблиці 1.3 подано порівняння вартісних аспектів акумуляторів.

Таблиця 1.3 – Порівняння вартісних аспектів акумуляторів LFP та NMC[7].

Вартісний чинник	LFP	NMC
Вартість матеріалів	Загалом нижча завдяки поширеним і дешевшим сировинним матеріалам, таким як залізо та фосфат.	Вища через використання дорогих матеріалів, зокрема нікелю та кобальту.
Витрати на виробництво	Потенційно нижчі завдяки простішим виробничим процесам і менш суворим екологічним вимогам.	Вищі через складніші виробничі процеси та потребу в суворішому екологічному контролі.
Співвідношення щільності енергії та вартості	Нижча щільність енергії, але економічно вигідніша для застосувань, де потрібні довговічність і тривалий ресурс.	Вища щільність енергії, але за вищою вартістю; підходить для застосувань із потребою у високій потужності.
Тенденції ринкових цін	З часом витрати знижуються завдяки технологічним удосконаленням і масштабуванню виробництва.	Витрати коливаються, але загалом зростають через волатильність цін на сировину.

## Продовження таблиці 1.3

Загальна вартість володіння (ТСО)	Нижча протягом життєвого циклу батареї завдяки довшому строку служби та стабільності.	Вища початкова вартість і потенційно вища ТСО через коротший строк служби та потребу замін.
Ефект масштабу	Переваги від економії на масштабі зростають у міру поширення технології.	Технологія добре відпрацьована, але може стикатися з викликами через ризики постачання сировини.

LFP зазвичай дешевша на рівні матеріалів і часто на виробництві (простіші процеси), тому дає нижчу ТСО завдяки довшому строку служби. NMC дорожча через нікель/кобальт і складніші процеси, але виграє щільністю енергії там, де критичні габарити/вага; її собівартість чутливіша до волатильності цін на сировину. Ефекти масштабу працюють для обох, однак ризики постачання «критичних металів» сильніше впливають на NMC.

Типові техпараметри (рівень осередку / системи):

- номінальна напруга: LFP ~ 3,2 В, NMC ~ 3,6–3,7 В;
- RTE системи зазвичай ~ 88–95% в обох;
- робочі C-rate у стаціонарних УЗЕ часто обмежують 0,25–0,5С для ресурсу; імпульсні значення вищі для LFP;
- цикловий ресурс (порядку): LFP ~ 4 000–10 000 EFC при DoD ≤80%; NMC ~ 2 000–5 000 EFC (сильно залежить від температури/режимів).

Термічна безпека: LFP має вищу температуру початку теплового розгону і менший кисневий викид, тому загалом «поблажливіша» до збоїв теплового менеджменту. Для обох потрібні BMS, виявлення газів/димів і належне ОВіК та пожежогасіння.

Щільність енергії та габарити: NMC дозволяє компактніші рішення (актуально для обмежених площ/висот), тоді як LFP частіше обирають, коли площа є прийнятною ціною за безпеку/ресурс.

Низькі температури: обидві хімії вимагають підігріву при заряді нижче 0 °С; без активного термоменеджменту деградація прискорюється.

Ланцюги постачання та переробка: LFP базується на залізі/фосфаті (менше «критичних» металів), але має нижчу «металеву» вартість у переробці; NMC містить Ni/Co, що підвищує вартість і ризики постачання, зате робить переробку економічно привабливішою.

Типові ролі в УЗЕ:

- LFP: згладжування піків навантаження, резерв/ДБЖ, сервіси якості електроенергії, тривалості 1–4 год (і більше при відповідному Р/Е).
- NMC: там, де критична компактність або задані специфікації на високі питомі енергію/потужність при обмеженому об'ємі; у стаціонарних УЗЕ нині застосовується рідше, ніж LFP.

Практичне правило вибору: якщо головні критерії – безпека, довговічність, ТСО і тривалості до ~4 год, то стартово LFP. Якщо вирішальними є габарити/маса при збереженні високої продуктивності та є готовність до суворішого теплового контролю, то розглянути NMC.

### 1.2.2 Свинцево-кислотні системи зберігання енергії

Удосконалені свинцеві акумулятори використовуються в багатьох системах для комунальних та невеликих побутових та комерційних застосувань накопичення енергії. Термін "удосконалені" або "вуглецево-покращені" (LC) свинцеві акумулятори використовується тому, що, окрім стандартних свинцево-кислотних акумуляторів, за останні два десятиліття були розроблені пристрої з інтегрованою функцією суперконденсатора. Вони можуть мати негативний електрод з комбінованим негативним свинцево-кислотним акумулятором та негативним вуглецевим суперконденсатором, або вони можуть мати лише негативний суперконденсатор (PbC акумулятор), або добавки вугільного порошку до негативного активного матеріалу. У всіх випадках позитивний електрод такий самий, як у звичайному свинцево-кислотному акумуляторі. Свинцево-кислотні акумулятори можуть бути затопленими або герметичними з

клапанним регулюванням (VRLA), а сітки можуть бути у формі плоских пастоподібних або трубчастих пластин. Різні конструкції мають різні технічні характеристики та можуть бути адаптовані до певних робочих циклів. Акумулятори з трубчастими пластинами пропонують тривалий термін служби після глибоких циклів розрядки/розрядки. Для використання з відновлюваними джерелами енергії, особливо сонячними фотоелектричними (ФЕ) джерелами, схема використання передбачає регулярні розряди, при цьому акумулятор не обов'язково регулярно повертається до повного стану заряду. Такий режим часткового заряду (PSoC) може бути шкідливим для свинцево-кислотних акумуляторів, оскільки призводить до незворотної сульфатації негативних пластин, і методи подолання цієї проблеми є предметом інтенсивної розробки[8].

На рисунку 1.4 зображено фізико-хімічну схему свинцево-кислотного акумулятора, що ілюструє будову електродів, наявність сепаратора та основну електрохімічну реакцію під час процесів заряджання і розряджання.

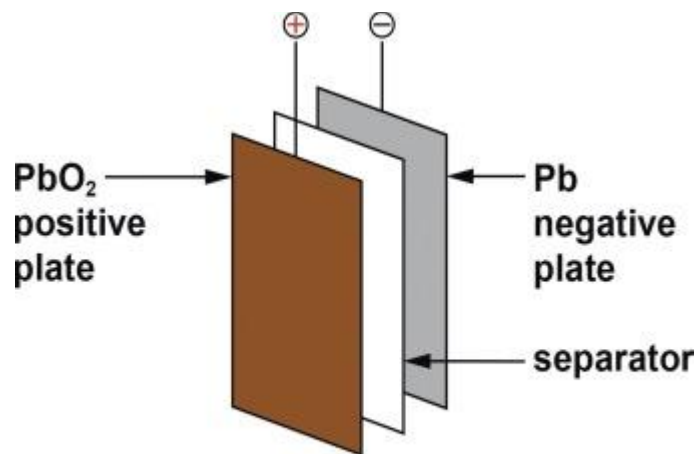


Рисунок 1.4 – Фізико-хімічна схема свинцево-кислотного акумулятора[8]

На рисунку 1.5 зображено промислову установку зберігання електроенергії на основі свинцево-кислотних акумуляторів потужністю 1 МВт та енергоємністю 1,5 МВт·год, встановлену в місті Метлакатла (Аляска), що демонструє приклад масштабного застосування даної технології в енергетичних системах.



Рисунок 1.5 – 1МВт/1.5МВт\*год свинцево-кислотного УЗЕ встановлений у місті Метлакатла на Алясці[8]

Технічні характеристики (статичні УЗЕ): типові потужності – до кількох МВт, енергоємність – до  $\sim 10$  МВт·год, час віддачі – від хвилин до понад 20 год; час реакції - мілісекунди. ККД циклу зазвичай  $\sim 75$ – $85\%$ . Ресурс циклів – близько 500–3000 (залежно від режимів глибини розряду/заряду та температури), календарний строк служби  $\sim 5$ – $15$  років. Орієнтовна питома енергія на рівні системи  $\sim 25$ – $35$  Вт·год/кг. За капітальними витратами наведено діапазони  $\sim 100$ – $200$  €/кВт·год (за енергію) та  $\sim 100$ – $500$  €/кВт (за потужність). Для виконання систем частіше застосовують VRLA або затоплені (VLA) конструкції, що дають потрібні масштаби (від стелажів до контейнерів) і забезпечують роботу в задачах резерву, вирівнювання навантаження та мережевих сервісів середньої тривалості[3].

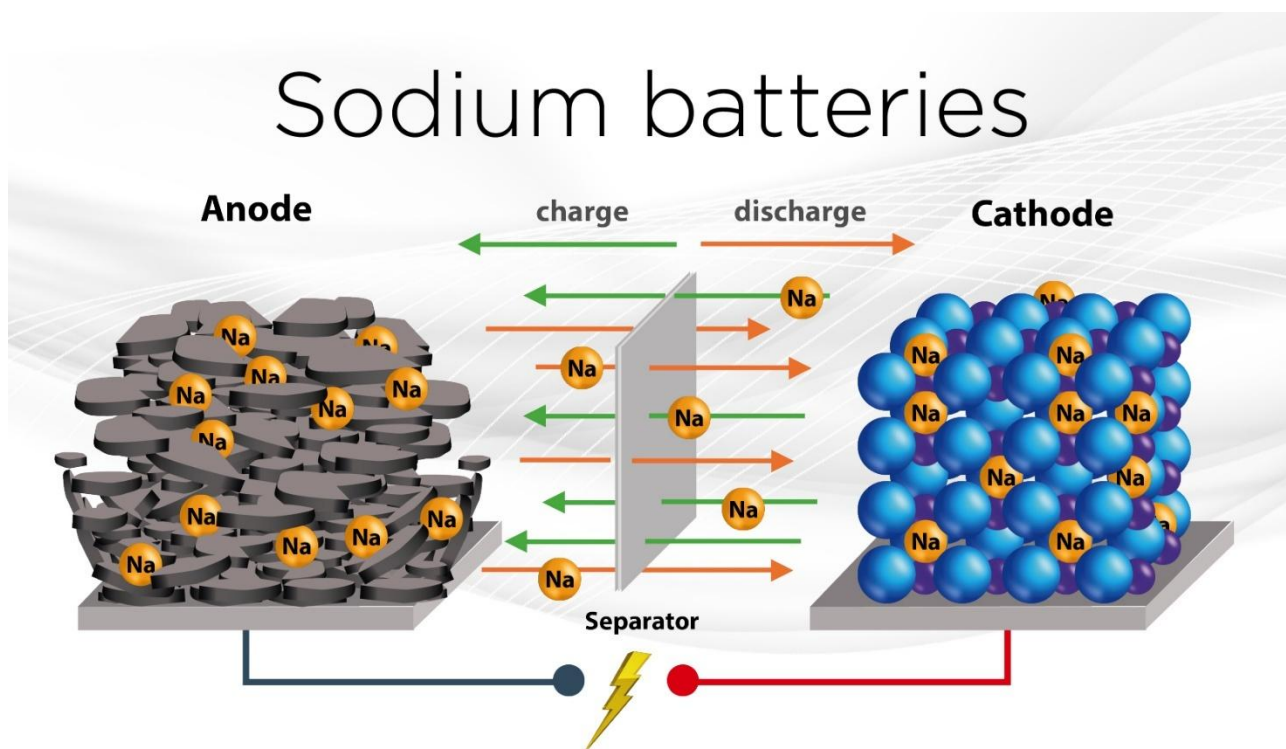
Сталий розвиток є одним із найважливіших аспектів будь-якої технології, і свинцеві акумулятори не є винятком. Переробка свинцево-кислотних акумуляторів є усталеною практикою з моменту їх першого використання та продовжує зростати. Рівень переробки наближається до 100% у західних країнах, і дуже високі показники досягаються в інших країнах. На акумулятори використовується 85% свинцю, що виробляється у світі, а перероблений свинець

становить 60% від загального обсягу виробництва свинцю. Свинцево-кислотні акумулятори легко розбиваються, тому компоненти, що містять свинець, можна відокремити від пластикових контейнерів та кислоти, які потім можна відновити. Майже повне відновлення та повторне використання матеріалів можна досягти з відносно низькими енерговитратами на процеси, тоді як викиди свинцю підтримуються в межах низьких норм, встановлених екологічними нормами. Ціни на металобрухт такі, що переробка відбувається ефективно та економічно. Це відрізняється від інших хімічних речовин акумуляторів, особливо літій-іонних, де рівень переробки набагато нижчий, процеси повинні стати ефективнішими, необхідно розвивати збір та розділення, а економічні показники не є сприятливими [8].

### **1.2.3 Натрій-іонні системи зберігання енергії**

Натрій-іонні батареї привертають увагу для великих систем зберігання через доступність сировини й потенційно нижчу вартість: IEA очікує, що Na-іон «становитимуть зростаючу частку батарей для енергетичного зберігання», адже вони базуються на дешевших матеріалах і можуть мати виробничу собівартість до  $\approx 30\%$  нижчу за LFP (для відповідних застосувань). Це робить технологію перспективною саме в стаціонарному секторі, де щільність енергії не є вирішальною.

На рисунку 1.6 зображено фізико-хімічну ілюстрацію принципу роботи натрій-іонного акумулятора, що демонструє процеси міграції іонів натрію між анодом і катодом під час заряджання та розряджання.



На рисунку 1.7 наведено приклад промислової натрій-іонної установки зберігання електроенергії енергоємністю 10 МВт·год, реалізованої компанією China Southern Power Grid у регіоні Гуансі–Чжуан, що ілюструє можливість масштабного застосування даної технології в енергетичних системах.

Рисунок 1.6 – Фізико-хімічна ілюстрація Sodium-іон акумулятора[9]



Рисунок 1.7 - Натрій-іонний акумулятор потужністю 10 МВт·год від China Southern Power Grid у китайському регіоні Гуансі-Чжуан[9]

Технічні характеристики:

Ефективність циклу: базовий рівень для Na-ion у моделюванні ~80%.

Ресурс / календарне життя: у тій самій оцінці моделювання прийнято ~1 000 циклів (база для моделі 100 МВт·10 год) та ~15 років календарного життя; це консервативний «орієнтир» для аналізу витрат/переваг.

Масштаб та тривалість: моделювання аналізує Na-ion саме як довготривале зберігання (~10 год) на масштабі ~100 МВт, що відображає цільовий клас задач (зсув енергії, вирівнювання профілю).

Діючі об'єкти: у 2024 р. запущено 50 МВт/100 МВт·год Na-ion у Цяньцзяні (пров. Хубей, Datang Group, елементи 185 А·год від HiNa). За даними проєкту, система зберігає ~85% ККД навіть при -20 °С і витримує ~1 500 циклів при +60 °С.

Питома енергія (на рівні осередку, орієнтир): останні промислові анонси фіксують до ~175 Вт·год/кг (CATL NaXtra, 2025; рівень комірки – для розуміння порядку). Для стаціонарних модулів системний показник нижчий через упаковку та безпеку[9].

Na-ion – реальний кандидат для довших тривалостей і великомасштабних УЗЕ, коли ціна та доступність матеріалів важливіші за компактність. Порівняно з LFP, Na-ion зазвичай має нижчу щільність енергії, але кращий ціновий профіль і відчутну толерантність до низьких температур (за даними польових запусків), що робить технологію привабливою для «стаціонарки». З погляду практики: у пілотах/першій хвилі проєктів спираються на ККД ≈ 80%, ресурс ≈ 1 000+ циклів (залежно від умов) і тривалості ~10 год[9].

#### **1.2.4 Натрій-сірчані установки зберігання енергії**

NaS – це високотемпературні батареї довгої тривалості розряду, орієнтовані на стаціонарні системи. Офіційна брошура BASF/NGK описує NAS як високоенергетичні батареї для довготривалого зберігання із типовою ємністю одного блоку ≈1,45 МВт·год та тривалістю розряду 6–24 год, що робить їх доречними для добового зсуву енергії та вирівнювання профілю генерації ВДЕ.

На рисунку 1.9 зображено конструктивну схему модуля натрій-сірчаної (NaS) батареї, що ілюструє основні компоненти елемента, зокрема теплоізований контейнер, електричний нагрівач, запобіжник та активну комірку, необхідні для роботи акумулятора при високих робочих температурах.

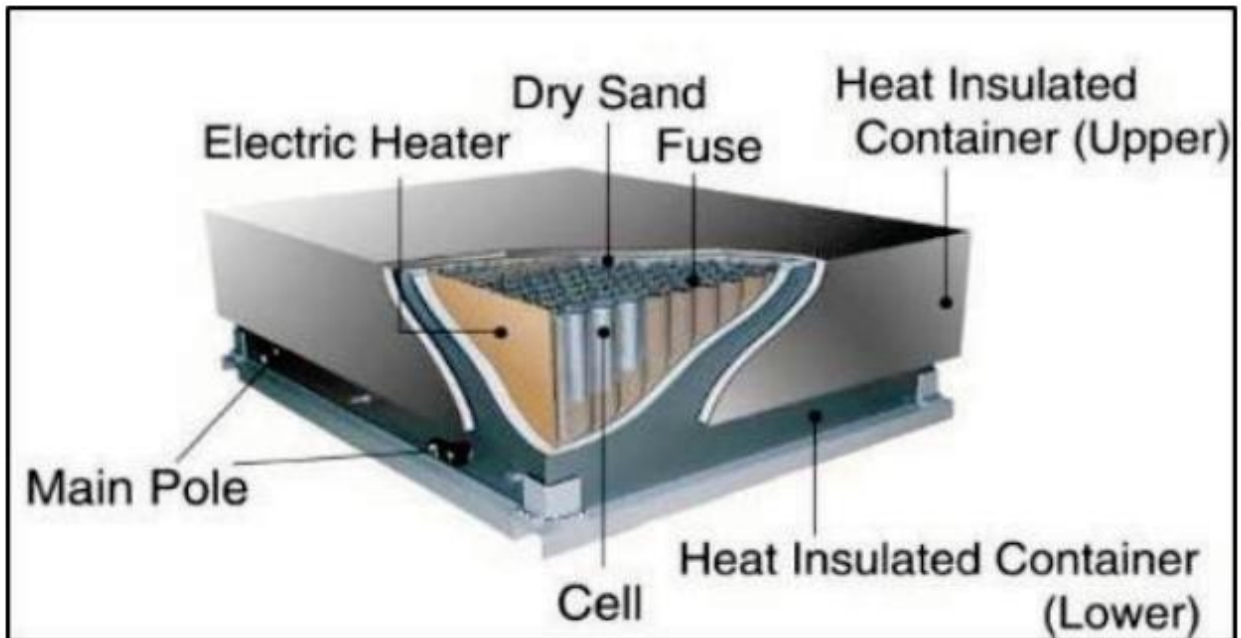


Рисунок 1.9 – Компоненти модуля NaS батареї[9]

На рисунку 1.10 наведено приклад промислової установки зберігання електроенергії на базі NaS-акумуляторів компанії Xcel, інтегрованої з вітровими турбінами в місті Люцерн, що демонструє практичне застосування даної технології для балансування відновлюваної генерації.



Рисунок 1.10 – Акумулятори компанії Xcel для вітрових турбін, Люцерн[9]

Технічні характеристики:

- Робоча температура:  $\sim 300\text{--}360$  °C (плавкий натрій і сірка; керамічний електроліт  $\beta$ -алюмінат).
- Ефективність циклу (ККД, DC $\leftrightarrow$ DC): зазвичай  $\sim 75\text{--}80$  %; у технічних описах також наводять  $70\text{--}80$  %, зауважуючи, що витрати на підігрів/допоміжні системи не входять у DC $\leftrightarrow$ DC і знижують AC $\leftrightarrow$ AC ефективність.
- Ресурс і строк служби:  $\approx 4\ 500$  повних циклів і  $\sim 15$  років (типові значення у Sandia/EASE); в актуальних техданих BASF для моделі L-24 – до  $\sim 7\ 300$  еквівалентних циклів і проєктний строк 20 років (залежить від режимів).
- Швидкодія: мілісекунди (за умови «гарячого» стану).
- Типові масштаби/тривалості систем: потужність 200 кВт–50 МВт, енергія 1,2–400 МВт·год; номінально  $\sim 6$  год віддачі при номінальній потужності (часто конфігурують на 6–24 год).
- Приклади конфігурацій (каталоги NGK/BASF):

- Субблок NAS L-24: макс. 250 кВт DC, 1 450 кВт·год; 20 років дизайн-життя;
- Контейнерна система: 4 субблоки послідовно  $\rightarrow \approx 1\,000$  кВт / 5 800 кВт·год (BOL); габарити  $\sim 6,1 \times 5,6 \times 5,5$  м.
- Питома енергія (орієнтир):  $\sim 206$  Вт·год/кг (довідник EASE для NaS).
- Ринкові референси (великі об'єкти): Buzen Substation (Kyushu Electric, Японія) – 50 МВт/300 МВт·год NaS для балансування попиту/пропозиції.

NaS – зріле рішення для довготривалих УЗЕ (6–24 год і більше) з великими енергоємностями та швидким відгуком, придатне для добового зсуву енергії, згладжування ВДЕ та мережевих сервісів. Ключові компроміси: високотемпературний режим (вимоги до ОВК/ізоляції й безпеки), а також нижчий системний ККД з урахуванням підігріву порівняно з Li-ion. Якщо на майданчику прийнятні умови розміщення/теплотехніки й потрібна тривала віддача енергії без суттєвого зростання CAPEX за кВт·год, NaS – обґрунтований кандидат, підтверджений великими референсами та сертифікованими промисловими продуктами.

### 1.2.5 Редокс-ванадієві системи зберігання енергії

VRFB – проточні акумулятори, у яких потужність визначається площею/кількістю стеків осередків, а енергія – об'ємом баків електроліту; це дозволяє незалежно масштабувати тривалість віддачі та потужність. Така архітектура робить VRFB перспективними для довготривалого зберігання й зсуву енергії на години.

На рисунку 1.11 наведено принципову схему роботи ванадієвої окисно-відновної батареї, яка ілюструє процеси циркуляції електролітів у зовнішніх резервуарах, перенесення іонів через іон-селективну мембрану та перебіг електрохімічних реакцій під час режиму розрядження.

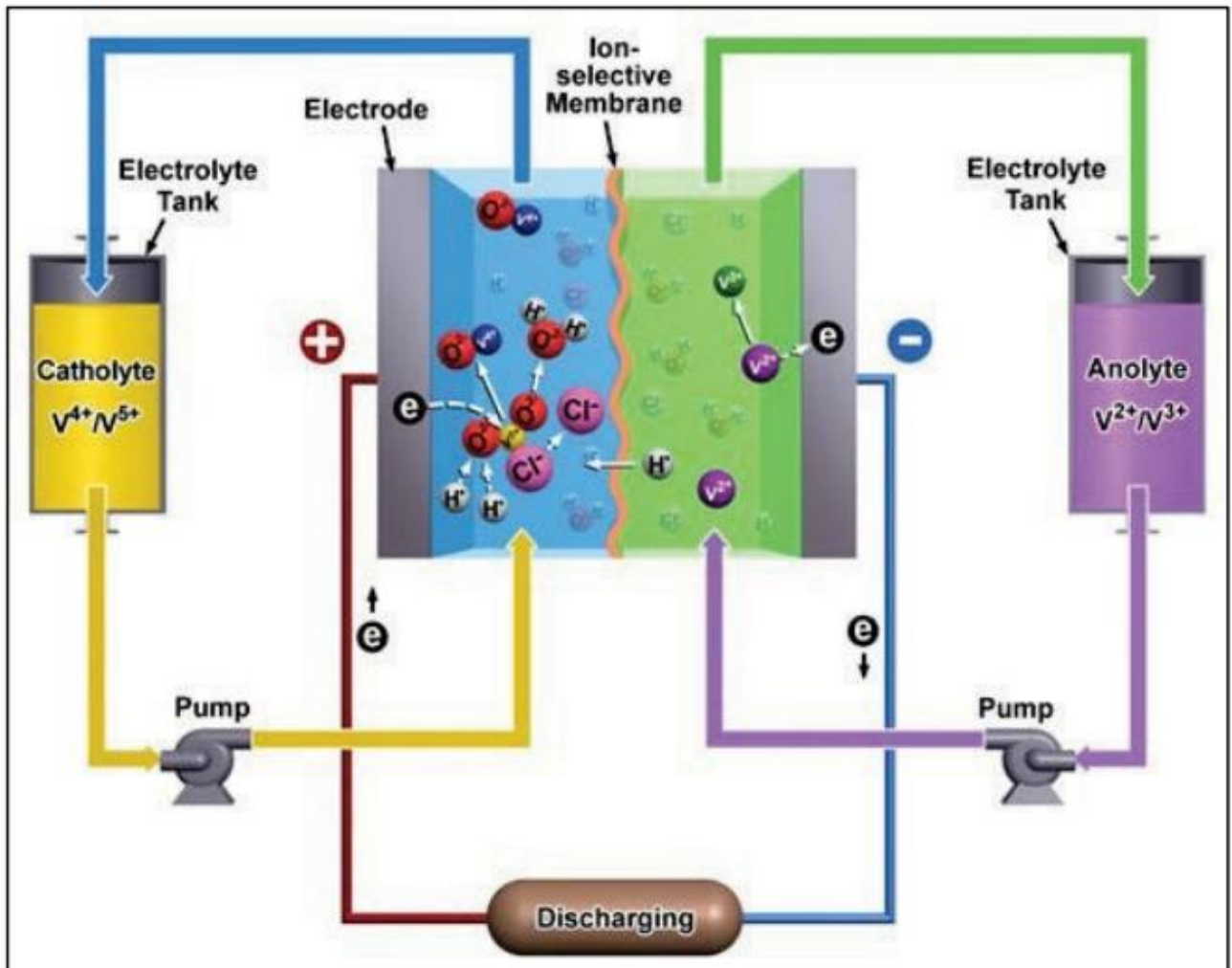


Рисунок 1.11 - Принципи роботи ванадієвої окисно-відновної батареї[9]

Технічні характеристики:

- ККД циклу (ККД, DC↔DC): за оглядом  $\approx 75\text{--}85\%$  (залежить від електрохімії, «шунтових» струмів і втрат на перекачування).
- Ресурс циклів і DoD: типово заявляють  $\approx 15\ 000\text{--}20\ 000$  повних циклів при 100% DoD (VRFB допускають повний розряд без помітної деградації).
- Календарний строк служби: 20+ років; постачальники (Sumitomo) декларують дизайн-життя понад 20 років та можливість багаторазового використання електроліту.
- Тривалості: типові 3–10 год і більше (легко нарощуються збільшенням баків).
- Безпека/експлуатація: не горючий водний електроліт, низька швидкість саморозряду, можливість простою «без втрат» при зупинених насосах (характеристика класу RFB).

Референс-проекти:

- Далянь, Китай – перша черга 100 МВт/400 МВт·год (план 200 МВт/800 МВт·год) введена у 2022 р.
- Хоккайдо, Японія (Sumitomo/NEPCO) – 15 МВт × 4 год = 60 МВт·год, демо з 2015, комерційна робота з 2019 р.

На рисунку 1.12 зображено промислову установку зберігання енергії на основі ванадієвої редокс-батареї (VRB-ESS) компанії Prudent Energy, встановлену в місті Gills Onions (Окснард, Каліфорнія), яка демонструє реалізацію модульної архітектури редокс-батареїної системи для застосувань середньої та великої потужності.



Рисунок 1.12 - Встановлений енергоблок Prudent Energy VRB-ESS потужністю 600 кВт/3600 кВт·год у Gills Onions, Окснард, Каліфорнія[9]

VRFB – гарне рішення для довготривалого зберігання (3–10+ год) з дуже великою цикловою витривалістю та 100% DoD, де потужність і енергія масштабуються незалежно. Компроміс - нижчий системний ККД проти Li-ion і більші габарити/допоміжні втрати (перекачування електроліту), зате календарне життя 20+ років і стабільна робота при глибоких циклах роблять VRFB сильним

кандидатом для добового зсуву енергії, інтеграції ВДЕ та мережевих сервісів довшої тривалості.

### **1.3 Класифікація установок зберігання енергії за режимом і тривалістю**

У наукових і прикладних дослідженнях установки зберігання енергії зазвичай класифікують за тривалістю періоду, протягом якого система здатна віддавати номінальну потужність у режимі розрядження. Такий підхід є зручним, оскільки дозволяє поєднати технічні характеристики накопичувача з його економічним і функціональним призначенням. Саме тривалість безперервної віддачі енергії значною мірою визначає перелік задач, які може виконувати установка, зокрема забезпечення якості електричної енергії, згладжування пікових навантажень або реалізацію добового енергетичного зсуву. У сучасних оглядових публікаціях найчастіше виділяють кілька характерних діапазонів тривалості роботи УЗЕ, при цьому їх точні межі можуть незначно відрізнятися залежно від використаних джерел, особливостей конкретного ринку електроенергії та регуляторних вимог:

- Миттєві/секундні режими (~10–30 с): системи з надшвидкою реакцією для підтримки якості електроенергії (PQ), гасіння провалів напруги та частотних мікросервісів. Зазвичай це потужні конфігурації з дуже високим Р/Е і малими енергозапасами; тривалість вимірюється секундами[10][11].
- Хвилинні–годинні режими (~5 хв...4 год): наймасовіший клас для ВТМ/промислових батарей – згладжування піків навантаження, арбітраж (перенесення споживання між «дорогими» та «дешевими» зонами тарифу), підтримка ВДЕ на рівні об'єкта, короткочасний резерв (ДБЖ). Огляди УЗЕ підкреслюють, що саме в цьому діапазоні Li-ion (особливо LFP) став «де-факто стандартом» завдяки високому ККД, швидкій динаміці та доброму поєднанню потужності з енергією[10][11].

- Довготривалі режими (LDES): тривалість від 8–10 год і більше (а в дослідженнях – до днів/тижнів). У літературі сьогодні найчастіше фігурують пороги  $\geq 10$  год (Denholm et al.), інші автори наводять «8+ год» або ділять LDES на «добовий» (10–20 год) і «тижневий/місячний» класи. Ці системи забезпечують добовий зсув енергії, глибоке згладжування ВДЕ та зниження потреб у мережевих підсиленнях[10][11].

До миттєвих і секундних режимів роботи установок зберігання енергії належать режими, орієнтовані на забезпечення якості електричної енергії та безперервності живлення критичних споживачів. У таких режимах УЗЕ використовується для компенсації короточасних провалів і сплесків напруги, підтримки частоти та миттєвого резервування чутливих навантажень, зокрема виробничих ліній, електроприводів та інформаційно-технологічної інфраструктури. Основними технічними характеристиками цих режимів є надзвичайно швидка реакція системи та жорсткі вимоги до алгоритмів керування. За відносно невеликої енергоємності, що вимірюється секундами або хвилинами, такі системи здатні забезпечувати високу миттєву потужність. У наукових оглядах зазначені режими розглядаються як базовий клас сервісів установок зберігання енергії, що відіграє важливу роль у стабілізації електричних систем і наданні послуг з підтримки якості електроенергії[10].

Хвилинні та годинні режими експлуатації установок зберігання енергії є найбільш поширеними в комерційному та промисловому секторі. У таких режимах УЗЕ застосовується для згладжування пікових навантажень і зменшення плати за максимальну потужність, перенесення споживання електричної енергії між тарифними зонами, а також для згладжування коливань генерації відновлюваних джерел енергії на горизонті від однієї до кількох годин. Крім того, такі системи можуть виконувати функцію короткострокового резерву для технологічних процесів. З технічної точки зору ці режими характеризуються необхідністю збалансування потужності та енергоємності системи, високими значеннями коефіцієнта корисної дії та підвищеними вимогами до ресурсу

аккумуляторів. Для літій-іонних систем типовим є досягнення високої системної ефективності та забезпечення тисяч циклів заряджання і розряджання за умови контролю глибини розряду та температурного режиму. Сучасні оглядові дослідження установок зберігання енергії визначають саме цей клас режимів як основну сферу застосування літій-іонних систем у промислових об'єктах[10].

Довготривалі режими роботи установок зберігання енергії орієнтовані на забезпечення добового або навіть тижневого перенесення електричної енергії. Основним їх призначенням є акумулювання надлишкової генерації відновлюваних джерел у періоди низького попиту та її подальше використання у години дефіциту, що дозволяє зменшити обмеження генерації, замінити пікові електростанції та відтермінувати капітальні інвестиції у розвиток мережевої інфраструктури. Такі системи зазвичай характеризуються низьким співвідношенням потужності до ємності та значними обсягами накопиченої енергії, що може сягати сотень мегават-годин. Для реалізації довготривалого зберігання часто застосовуються альтернативні технології, зокрема проточні аккумулятори, натрій-сірчані батареї, теплові та інші неелектрохімічні рішення. Аналітичні дослідження та оглядові публікації останніх років свідчать про відсутність єдиного підходу до визначення меж довготривалого зберігання, однак у практиці найчастіше до цього класу відносять системи з тривалістю роботи від восьми–десяти годин і більше, іноді з додатковим поділом на добові та багатодобові режими[10].

#### **1.4 Схемні рішення інтеграції установок зберігання енергії в системи електропостачання підприємств**

Однією з найбільш поширених схем інтеграції установки зберігання енергії в енергогосподарство підприємства є підключення на стороні змінного струму. У такій архітектурі УЗЕ оснащується власним двонапрявним інвертором і приєднується до існуючих шин змінного струму підприємства, зазвичай на рівні 0,4 кВ через головний розподільчий щит, а у випадку мереж середньої напруги – через силовий трансформатор на 6 або 10 кВ. У конфігураціях «сонячна

електростанція – накопичувач» кожне джерело має окремий інвертор і синхронізується з мережею незалежно. Основною перевагою такого рішення є можливість модернізації існуючих об'єктів без втручання в постійну частину вже змонтованої СЕС або технологічних процесів підприємства. Крім того, АС-з'єднання забезпечує високу гнучкість щодо заряджання УЗЕ як від сонячної генерації, так і від мережі, а також дозволяє реалізувати автономну роботу з формуванням параметрів напруги і частоти у складі мікромережі. Недоліком цієї архітектури є наявність додаткового етапу перетворення енергії, що призводить до дещо нижчого системного коефіцієнта корисної дії порівняно з DC-з'єднанням, однак така втрата компенсується незалежністю та масштабованістю системи[12].

Іншим підходом є інтеграція установки зберігання енергії на стороні постійного струму спільно з відновлюваними джерелами енергії. У цьому випадку фотоелектричні модулі та УЗЕ підключаються до спільної DC-шини, а заряджання накопичувача здійснюється безпосередньо, минаючи інвертор змінного струму. Подальша передача електроенергії в мережу або до навантаження відбувається через один загальний інвертор. Така схема дозволяє зменшити кількість етапів перетворення енергії та пов'язані з ними втрати, що є особливо ефективним у режимах прямого використання сонячної генерації для заряджання накопичувача та подальшого живлення навантаження. DC-з'єднання доцільне насамперед у проектах, де пріоритетом є максимізація самоспоживання сонячної енергії або існують обмеження на віддачу потужності в мережу. Водночас така архітектура висуває підвищені вимоги до систем керування, захистів і селективності на стороні постійного струму, а також є складнішою для реалізації в разі модернізації вже існуючих АС-орієнтованих сонячних електростанцій.

Окрему нішу займають гібридні рішення, що поєднують функції джерела безперебійного живлення та установки зберігання енергії. У таких системах ДБЖ забезпечує миттєву реакцію та високу якість електричної енергії для чутливих навантажень, тоді як УЗЕ з розширеною ємністю виконує функції тривалого

резервування, зрізання пікових навантажень і оптимізації енергоспоживання. Подібні рішення широко застосовуються в дата-центрах, медичних закладах і технологічних процесах, де поєднуються вимоги до мілісекундного відгуку та годинного запасу енергії. Дослідження показують, що ефективною є ієрархічна структура керування, за якої ДБЖ відповідає за миттєві процеси та якість електроенергії, а УЗЕ – за оптимізацію енергетичних режимів і зниження витрат, що фактично трансформує традиційні ДБЖ у повноцінні елементи мікромережі.

Найбільш комплексним варіантом інтеграції є побудова мікромережі з використанням установки зберігання енергії. Мікромережа являє собою локальну електроенергетичну систему з власною генерацією, накопичувачами, навантаженнями та центральним контролером, здатну працювати як у синхронному режимі з мережею оператора, так і в ізольованому режимі. УЗЕ в такій системі відіграє ключову роль, забезпечуючи формування опорної напруги, підтримку частоти та згладжування перехідних процесів під час зміни режимів роботи. Методичні рекомендації та стандарти, зокрема IEEE 2030.7, визначають вимоги до контролерів мікромереж, включно з процедурами переходу в острівний режим і зворотної синхронізації з мережею. Важливою перевагою УЗЕ в мікромережі є здатність здійснювати запуск системи без зовнішнього джерела напруги, що недоступно для сонячних електростанцій без додаткових технічних рішень.

Вибір рівня підключення установки зберігання енергії також істотно впливає на технічні та експлуатаційні характеристики системи. Підключення на рівні низької напруги 0,4 кВ є типовим для окремих будівель або виробничих секцій і забезпечує відносну простоту реалізації та можливість пофазного керування. Разом із тим такі рішення обмежуються допустимими струмами короткого замикання, вимогами до селективності захистів і впливом на якість електроенергії в суміжних фідерах. Підключення на рівні середньої напруги 6 або 10 кВ зазвичай використовується для централізованих установок зберігання енергії, що обслуговують увесь промисловий майданчик або групу споживачів. У цьому випадку зменшуються струмові навантаження на обладнання низької

напруги та з'являється можливість більш рівномірного розподілу ефекту від УЗЕ, а також потенційної участі в сервісах оператора системи розподілу. Незалежно від обраного рівня напруги, під час проєктування необхідно забезпечити коректну координацію захистів, реалізацію функцій антиострівного режиму, обмеження зворотних перетоків потужності та відповідність вимогам кодів приєднання щодо гармонік, реактивної потужності й підтримки напруги.

### **1.5 Основні компоненти перетворення та керування в установках зберігання енергії**

У складі установки зберігання енергії ключову роль відіграють перетворювальна та керувальні підсистеми, кожна з яких відповідає за окремий рівень функціонування системи. Силова частина представлена системою перетворення енергії, яка забезпечує двонапрямне перетворення між постійним і змінним струмом та реалізує взаємодію УЗЕ з електричною мережею або локальними навантаженнями. Саме ця підсистема відповідає за регулювання активної та реактивної потужності, синхронізацію з параметрами мережі або, у разі автономної роботи, за формування напруги й частоти в мікромережі. Окрім цього, система перетворення енергії забезпечує виконання вимог мережевих кодів, зокрема обмеження зворотних перетоків потужності, підтримку острівного режиму та реалізацію функцій резервного запуску. Сучасні оглядові дослідження наголошують на принциповій різниці між інверторами, що працюють у режимі відстеження параметрів мережі, та інверторами, здатними самостійно формувати опорні параметри, і наводять приклади їх успішного промислового застосування в системах накопичення енергії.[13]

Безпеку та довговічність акумуляторної частини забезпечує система керування батареєю, яка виконує постійний контроль електричних і теплових параметрів на рівні окремих комірок, модулів і батарейних ланцюгів. До її функцій належать вимірювання напруг, струмів і температур, балансування елементів, реалізація багаторівневих захисних алгоритмів і аварійних відсічень, а також керування силовими контактами. Окрему увагу приділяють оцінюванню стану заряду та технічного стану батареї, веденню журналів подій і деградації, а

також встановленню допустимих меж глибини розряду залежно від умов експлуатації. У сучасних оглядах підкреслюється важливість узгодження алгоритмів керування батареєю з вимогами промислових стандартів і результатами випробувань на теплову безпеку та поширення аварійних процесів на рівні всієї системи[13].

Загальну координацію роботи установки зберігання енергії здійснює система енергетичного менеджменту, яка формує стратегії заряджання і розряджання з урахуванням взаємодії з мережею, відновлюваними джерелами енергії та навантаженнями підприємства. Вона відповідає за добове й тижневе планування роботи УЗЕ, а також за оперативну диспетчеризацію в режимі реального часу. Для цього часто застосовуються оптимізаційні алгоритми та ієрархічні архітектури керування, які поєднують централізовані рішення з локальними контролерами на рівні окремих підсистем[13].

Оцінювання стану заряду батареї в сучасних установках зберігання енергії реалізується різними методами – від відносно простих підходів, заснованих на підрахунку переданого заряду в поєднанні з вимірюванням відкритої напруги, до більш складних спостерігачів, побудованих на еквівалентних електричних моделях, адаптивних фільтрах і методах машинного навчання. Оглядові роботи показують, що точність таких оцінок істотно залежить від температурних умов і ступеня старіння батарей, особливо для поширених літій-залізо-фосфатних і літій-нікель-марганець-кобальтових систем. Стан здоров'я батареї зазвичай оцінюється через показники втрати ємності та зміну параметрів моделі, що дозволяє прогнозувати деградацію, планувати технічне обслуговування та коригувати уставки системи енергетичного менеджменту. Сучасні огляди систематизують ці показники та канали телеметрії, підкреслюючи їх значення для надійної й економічно ефективної експлуатації установок зберігання енергії.

SoC: Оцінювання стану заряду акумуляторної батареї здійснюється з використанням методів різної складності. У найпростішому випадку застосовується підрахунок переданого електричного заряду з корекцією за вимірюваннями відкритої напруги батареї. Для підвищення точності

використовуються моделі на основі еквівалентних електричних схем, алгоритми адаптивної фільтрації та сучасні методи обробки даних. Оглядові дослідження показують, що точність таких оцінок істотно залежить від температурних умов експлуатації та ступеня старіння акумуляторів, зокрема для літій-залізо-фосфатних і літій-нікель-марганець-кобальтових систем[13].

SoH: Стан технічного здоров'я батареї характеризується передусім зменшенням її доступної ємності та змінами параметрів електричної моделі в процесі експлуатації. Аналіз цих показників у часовій динаміці дає змогу оцінювати темпи деградації, прогнозувати потребу в технічному обслуговуванні та коригувати режими роботи установки зберігання енергії. У сучасних оглядах, присвячених системам керування батареями в УЗЕ, наведено класифікацію основних показників стану здоров'я та відповідних каналів телеметрії на рівні всієї системи, що використовується для забезпечення надійної та безпечної експлуатації[13].

## **1.6 Показники та методи оцінювання техніко-економічної ефективності установок зберігання енергії**

Оцінювання техніко-економічної ефективності установок зберігання енергії є необхідним етапом обґрунтування доцільності їх впровадження та вибору оптимальних технічних і експлуатаційних параметрів. На відміну від традиційних джерел генерації, УЗЕ не створюють доданої енергії, а виконують функцію її перерозподілу в часі, тому їх ефективність визначається не лише технічними характеристиками, а й умовами експлуатації, профілем навантаження споживача та тарифною структурою ринку електричної енергії. У цьому контексті ключового значення набуває поєднання технічних показників роботи накопичувача з економічними критеріями оцінювання.

До основних економічних показників, що використовуються для аналізу ефективності установок зберігання енергії, належать сукупна вартість володіння, приведена вартість зберігання енергії, а також показники інвестиційної привабливості проєкту, зокрема чиста приведена вартість і внутрішня норма

дохідності. Ці показники дозволяють оцінити витрати на створення, експлуатацію та утилізацію УЗЕ протягом усього життєвого циклу, а також зіставити їх з очікуваними економічними вигодами від зменшення витрат на електропостачання, зрізання пікових навантажень або оптимізації використання власної генерації. Водночас результати такого аналізу є чутливими до прийнятих припущень щодо тарифів, режимів роботи та терміну служби акумуляторної системи.

Технічна складова оцінювання ефективності установок зберігання енергії охоплює такі показники, як коефіцієнт корисної дії циклу заряджання–розряджання, допустима глибина розряду, кількість циклів до вичерпання ресурсу та деградація ємності з часом. Саме ці параметри визначають фактичну корисну енергію, яку може надати УЗЕ протягом строку експлуатації, і безпосередньо впливають на економічні показники. Таким чином, комплексна техніко-економічна оцінка повинна враховувати взаємозв'язок між режимами експлуатації, профілем навантаження споживача та довговічністю акумуляторної системи, що дозволяє обґрунтовано порівнювати різні варіанти реалізації та обирати найбільш ефективні рішення[14].

### **1.6.1 Економічні показники**

Оцінювання техніко-економічної ефективності установок зберігання енергії потребує комплексного підходу, який поєднує фінансові показники з технічними характеристиками циклічної роботи, деградації акумуляторів та особливостей взаємодії системи з реальним профілем навантаження споживача і тарифною структурою ринку електричної енергії. На відміну від традиційних джерел генерації, установки зберігання енергії не створюють додаткову електроенергію, а змінюють часовий розподіл її споживання, тому їх економічна ефективність значною мірою визначається режимами експлуатації. У цьому розділі розглянуто основні показники та методичні принципи, що застосовуються для обґрунтування доцільності впровадження УЗЕ в промислових енергосистемах.[14]

Одним з базових економічних показників є сукупна вартість володіння установкою зберігання енергії – TCO (Total Cost of Ownership). Цей показник відображає всі витрати, пов’язані з проектом протягом усього життєвого циклу системи, незалежно від величини початкових інвестицій. У загальному вигляді TCO може бути подано у вигляді:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^N OPEX_t + C_{deg} + C_{end},$$

де  $CAPEX$  – капітальні витрати на закупівлю обладнання, монтаж, підключення та будівельні роботи;

$OPEX_t$  – операційні витрати в році  $t$ , що включають технічне обслуговування, витрати на електроенергію для заряджання, страхування та ремонту;

$C_{deg}$  – витрати, пов’язані з деградацією батарей, зокрема заміною модулів або зменшенням доступної ємності;

$C_{end}$  – витрати на демонтаж і утилізацію наприкінці строку служби;

$N$  – розрахунковий строк експлуатації системи, років.

Показник TCO дозволяє коректно порівнювати різні технології накопичення енергії та різні конфігурації системи, зокрема варіанти з AC- або DC-з’єднанням, із резервуванням або без нього.

Для узагальненої оцінки вартості збереженої енергії використовується показник LCOS (Levelized Cost of Storage), який визначає середню приведену вартість однієї кіловат-години енергії, що була збережена та відпущена системою протягом усього строку служби. У спрощеному вигляді LCOS визначається як:

$$LCOS = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

де  $C_t$  – витрати у році  $t$  (включаючи капітальні та операційні);

$E_t$  – кількість корисної електроенергії, відпущеної УЗЕ у році  $t$  з урахуванням ККД циклу та деградації;

$r$  – ставка дисконту;

$N$  – строк служби системи.

LCOS є особливо інформативним при порівнянні УЗЕ з альтернативними рішеннями, такими як резервні дизель-генератори, закупівля електроенергії в пікові години або розширення мережевої інфраструктури.[15]

Для інвестиційного аналізу застосовуються класичні фінансові показники – NPV та IRR. Чиста приведена вартість визначається як:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

де  $CF_t$  – грошовий потік у році  $t$ , який враховує економію витрат, доходи від продажу електроенергії або системних послуг та експлуатаційні витрати;

$r$  – ставка дисконту;

$N$  – період аналізу.

Внутрішня норма прибутковості IRR визначається як таке значення ставки дисконту  $r$ , за якого NPV проекту дорівнює нулю. Цей показник дозволяє оцінити граничну рентабельність інвестицій та порівняти її з альтернативними варіантами вкладення коштів.[15]

Економічна доцільність впровадження установки зберігання енергії суттєво залежить від реальних умов експлуатації. Нерівномірний профіль навантаження підприємства може формувати короткочасні або тривалі пікові значення потужності, що безпосередньо впливає на вибір встановленої потужності інверторів, енергетичної ємності батарей та допустимої глибини розряду. Аналіз профілю споживання дозволяє оптимізувати параметри системи таким чином, щоб досягти максимального економічного ефекту без надмірного збільшення вартості обладнання[16].

Не менш важливим фактором є тарифна структура електропостачання. Установки зберігання енергії демонструють найбільшу ефективність за наявності пікових тарифів, штрафів за перевищення договірної потужності, значної різниці між денними та нічними цінами або можливості участі в ринках системних послуг. Саме тому під час моделювання роботи УЗЕ доцільно

аналізувати, як зміна тарифів і режимів споживання впливає на показники NPV, IRR, LCOS та строк окупності проєкту[17].

### 1.6.2 Технічні показники

Основними технічними показниками для розрахунку показників ефективності є ККД циклу, глибина розряду, ресурс батареї та її деградація. Також усі ці дані закладаються при розрахунку економічної доцільності проєкту та отримання прогнозів щодо використання системи та ефективності різних режимів її роботи.

На рисунку 1.13 наведено порівняльну класифікацію основних технологій зберігання енергії за тривалістю зберігання та діапазоном потужностей, що дозволяє визначити області доцільного застосування механічних, електричних, електрохімічних, хімічних і теплових методів акумулювання енергії.

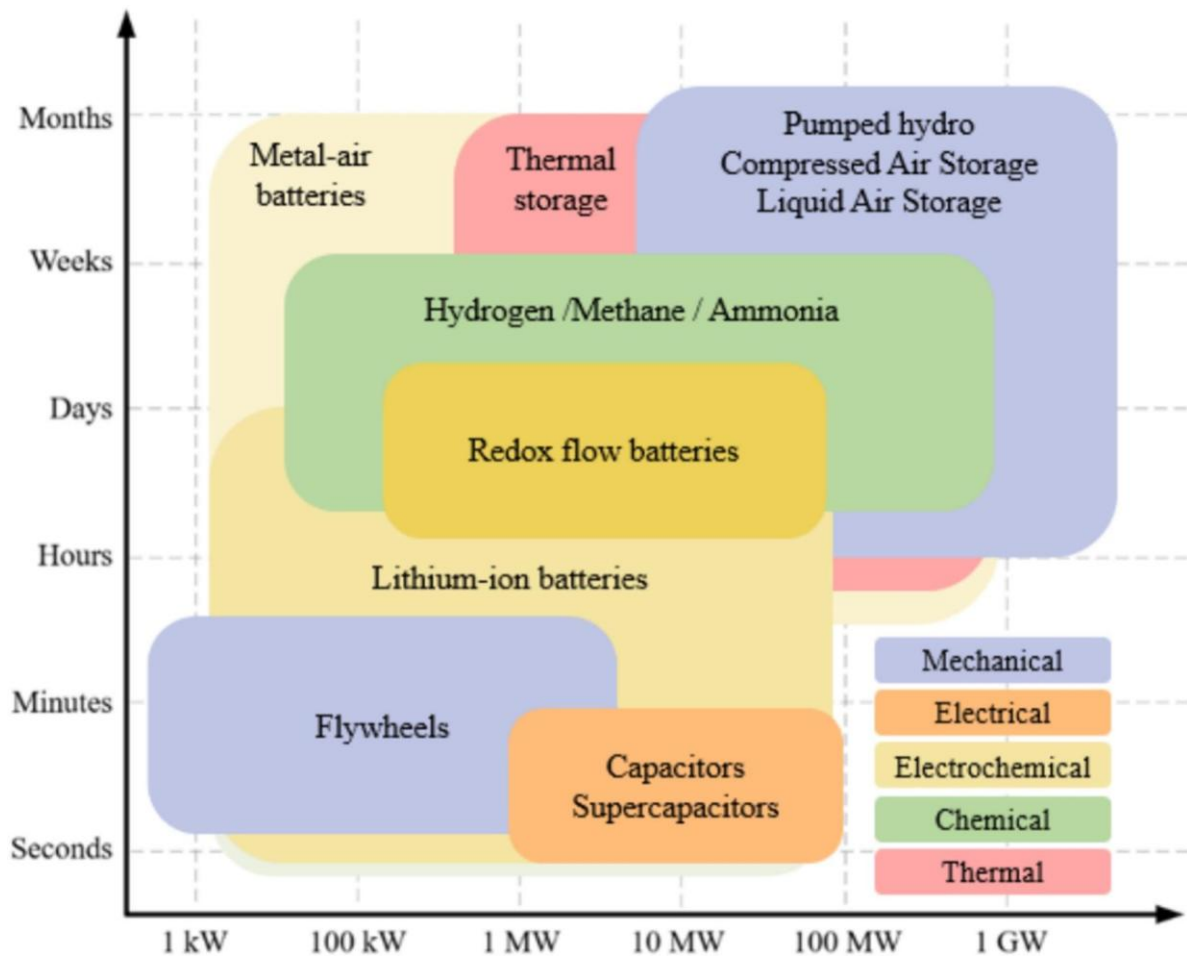


Рисунок 1.13 Методи зберігання енергії за часом зберігання та місткістю сховища[16]

Коефіцієнт корисної дії циклу заряджання–розряджання є одним з ключових технічних показників ефективності установки зберігання енергії, оскільки він визначає, яку частину електричної енергії, витраченої на заряджання, система здатна повернути споживачу під час розряджання. Фактичне значення ККД циклу залежить від низки факторів, серед яких температурний режим роботи батареї, величина струмів заряджання і розряджання, технічний стан акумуляторів, а також особливості алгоритмів керування інвертором і системою енергетичного менеджменту. У загальному вигляді ККД циклу визначається як відношення корисної енергії, відпущеної споживачу, до енергії, спожитої системою під час заряджання:

$$\eta_{cycle} = \frac{E_{dis}}{E_{ch}},$$

де  $\eta_{cycle}$  – коефіцієнт корисної дії циклу;

$E_{dis}$  – енергія, відпущена під час розряджання, кВт·год;

$E_{ch}$  – енергія, спожита під час заряджання, кВт·год.[16]

Для сучасних літій-іонних установок зберігання енергії системний ККД зазвичай перебуває в межах 85–95 %, однак відхилення від оптимального температурного діапазону або робота при підвищених струмах можуть призводити до його зниження.

Важливим експлуатаційним параметром є глибина розряду батареї, яка характеризує частку номінальної ємності, що використовується в одному циклі заряджання–розряджання. Глибина розряду визначається як:

$$DoD = \frac{E_{used}}{E_{nom}} \cdot 100\%,$$

де  $E_{used}$  – кількість енергії, відібраної з батареї в одному циклі, кВт·год;

$E_{nom}$  – номінальна енергетична ємність батареї, кВт·год[16].

Для більшості літій-іонних систем допустимі значення DoD зазвичай становлять 80–95 %, при цьому перевищення рекомендованої глибини розряду призводить до прискореної деградації акумуляторів. З практичної точки зору обмеження DoD є одним з основних інструментів подовження строку служби батареї, хоча воно зменшує доступну корисну ємність системи.

Ресурс акумуляторної батареї визначається поєднанням циклічного та календарного старіння і безпосередньо пов'язаний зі станом її технічного здоров'я. Циклічне старіння залежить від кількості повних еквівалентних циклів заряджання–розряджання, які можна подати у вигляді:

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^k DoD_i,$$

де  $N_{eq}$  – кількість повних еквівалентних циклів;

$DoD_i$  – глибина розряду  $i$ -го циклу (у відносних одиницях);

$k$  – кількість циклів.[16]

Календарне старіння, у свою чергу, зумовлене тривалістю експлуатації батареї та умовами її зберігання, зокрема температурою і середнім рівнем заряду. Чим інтенсивнішим є режим роботи установки зберігання енергії – за рахунок високої глибини розряду або великої кількості циклів – тим швидше знижується стан здоров'я батареї, що призводить до зменшення доступної ємності та необхідності частішої заміни батарейних модулів. Саме тому під час проектування та експлуатації УЗЕ важливо досягти компромісу між максимальною корисною віддачею енергії та забезпеченням прийняттого ресурсу акумуляторної системи.

## **1.7 Стандарти та вимоги до безпеки і сертифікації промислових установок зберігання енергії**

### **1.7.1 Електробезпека установок зберігання енергії**

Електробезпека є одним із ключових аспектів під час проектування, виготовлення та експлуатації промислових установок зберігання енергії. Такі системи працюють із високими рівнями напруги та струму, а також містять елементи силової електроніки й акумуляторні модулі з великою питомою енергією. Це створює потенційні ризики ураження електричним струмом, виникнення теплових пошкоджень, коротких замикань і, у крайніх випадках, пожеж. У зв'язку з цим вимоги до електробезпеки повинні враховувати всі етапи

життєвого циклу УЗЕ – від конструктивних рішень і виробництва до введення в експлуатацію та подальшого технічного обслуговування.

Конструкція промислових установок зберігання енергії має забезпечувати запобігання небезпечним ситуаціям як у нормальних режимах роботи, так і за умов прогнозованих відмов або аварій. Одним з базових принципів є забезпечення належної електричної ізоляції та фізичного розділення струмопровідних частин. Це досягається дотриманням мінімально допустимих ізоляційних відстаней між елементами під напругою та корпусом, застосуванням подвійної або посиленої ізоляції для високовольтних компонентів, а також використанням негорючих або важкогорючих матеріалів. Важливу роль відіграє сегментація акумуляторних модулів, стрінгів і шин, що дозволяє обмежити поширення аварійних процесів у разі локальної несправності.

Окрему увагу приділяють захисту від надструмів і коротких замикань, які є одними з найбільш небезпечних режимів для елементів УЗЕ. Для цього в системі передбачаються автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники та струмові датчики, що забезпечують швидке відключення пошкодженої ділянки. Конструктивні рішення мають дозволяти локалізувати коротке замикання на рівні окремого модуля або стрінга без виведення з ладу всієї системи. Важливою складовою такого захисту є інтеграція системи керування батареєю, яка здійснює безперервний контроль струмів, напруг і температур та ініціює захисні дії у разі перевищення допустимих меж.

Захист від перенапруг і небезпечних режимів роботи є ще одним необхідним елементом електробезпеки. Він включає обмеження перевантажень силових перетворювачів, контроль параметрів електричної мережі та кероване відключення установки у разі відхилення напруги або частоти від допустимих значень. Для акумуляторних систем також важливим є моніторинг температурного режиму та, за потреби, внутрішнього тиску, що дозволяє своєчасно виявляти ознаки аварійного розвитку процесів і запобігати їх ескалації[18].

Основними стандартами, що використовуються у практиці є:

- ДСТУ EN 60204-1:2019 – безпека електрообладнання машин.
- ДСТУ EN IEC 62477-1:2024 – вимоги безпеки для силової електроніки.
- ДСТУ EN 62619:2022 – безпека літій-іонних акумуляторів для промислових застосувань.
- ДСТУ EN 62368-1:2022 – безпека аудіо-, відео-, інформаційного та комунікаційного обладнання (важливо для комунікаційних інтерфейсів УЗЕ).

### **1.7.2 Забезпечення кібербезпеки установок зберігання енергії**

Системи накопичення енергії належать до складних кіберфізичних комплексів, у яких поєднуються силова електроніка, багаторівневі системи керування, комунікаційні інтерфейси та інтеграція з енергетичною інфраструктурою підприємства або мережі. Такі системи можуть функціонувати в автономному режимі, у складі мікромереж або як елемент розподіленої енергосистеми з можливістю віддаленого моніторингу й керування. За цих умов установки зберігання енергії стають потенційно вразливими до кіберзагроз, оскільки втручання в їх роботу здатне призвести не лише до економічних втрат, а й до фізичного пошкодження обладнання, порушення режимів роботи електричної мережі та виникнення небезпеки для обслуговуючого персоналу [19].

До найбільш поширених загроз, характерних для кіберфізичних систем в енергетиці, належить несанкціонований доступ до систем керування, зокрема до рівнів BMS, EMS або SCADA. Такі втручання можуть спричинити формування некоректних режимів заряджання чи розряджання акумуляторів, прискорену деградацію батарей або аварійні стани. Окрему небезпеку становить можливість маніпуляції параметрами мережевого інтерфейсу, зокрема зміна уставок напруги, частоти чи допустимої потужності, що може викликати неочікувані відключення або роботу системи в небезпечних режимах. Крім того, загрозу становлять атаки, пов'язані з підміною або несанкціонованим оновленням

програмного забезпечення інверторів, контролерів і комунікаційних модулів, а також відмови в обслуговуванні через перевантаження диспетчерських інтерфейсів, що фактично позбавляє можливості керування системою.

Порушення роботи каналів телеметрії є ще одним критичним аспектом кібербезпеки УЗЕ. Фальсифікація або спотворення даних про стан заряду, технічний стан батареї, температурні режими чи струмові навантаження може вводити в оману алгоритми керування та призводити до прийняття помилкових рішень на рівні енергетичного менеджменту. З огляду на це доступ до систем керування установкою зберігання енергії повинен здійснюватися виключно за чітко визначеними ролями, такими як оператор, сервісний інженер, адміністратор або системний інтегратор, із відповідним розмежуванням прав і відповідальності [20].

З метою зниження кіберризиків у промислових установках зберігання енергії застосовується комплекс базових заходів кіберзахисту, орієнтованих на запобігання несанкціонованому доступу та своєчасне виявлення інцидентів. До таких заходів належить насамперед використання механізмів аутентифікації та авторизації з розмежуванням доступу за ролями, що дозволяє обмежити виконання критичних операцій лише уповноваженим користувачам. Важливим елементом є сегментація мережі, за якої керувальні контури BMS, EMS та силових перетворювачів ізолюються від корпоративних ІТ-мереж і зовнішніх каналів доступу, що зменшує поверхню атаки. Крім того, доцільним є ведення журналів подій і змін конфігурації, що дозволяє здійснювати аудит дій користувачів, аналізувати інциденти та відновлювати послідовність подій у разі порушення роботи системи. Сукупність цих заходів розглядається як мінімально необхідний рівень кіберзахисту для промислових УЗЕ та є основою для подальшого впровадження більш розвинених засобів інформаційної безпеки відповідно до галузевих стандартів [20].

## 1.8 Тенденції та перспективи розвитку технологій для промислових застосувань

Літій-іонні системи накопичення енергії широко впроваджуються в сучасних електроенергетичних мережах; однак їхня довгострокова економічна життєздатність за умов змінюваних ринкових умов залишається невизначеною. Зосередившись виключно на доходах від енергетичного арбітражу, аналіз надає консервативні базові оцінки економічної ефективності. Результати показують, що літій-іонні системи накопичення енергії є економічно неконкурентоспроможними за всіма розглянутими сценаріями: чиста приведена вартість для оптимально керованих систем потужністю 100 МВт та ємністю 400 МВт·год становить від – 144 млн доларів до – 80 млн доларів. Відповідна приведена вартість зберігання (LCOS) коливається в межах від 120 до 195 доларів США за МВт·год залежно від ринку електроенергії та сценарію[21].

На рисунку 1.14 подано етапи історичного розвитку літій-іонних акумуляторів — від перших наукових концепцій і матеріалів електродів до сучасних технологічних рішень та перспективних напрямів удосконалення, що визначають сучасний стан і подальший розвиток установок зберігання енергії.

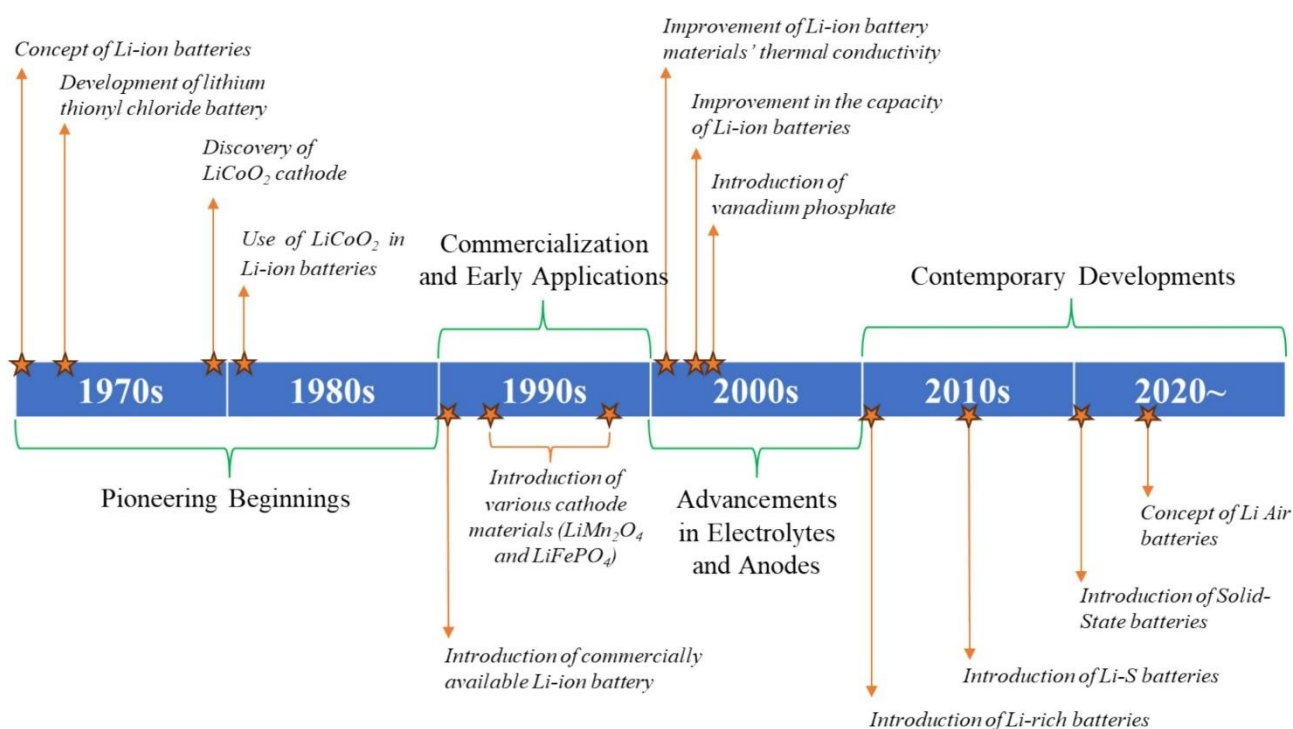


Рисунок 1.14 - Історичний розвиток літій-іонних акумуляторів[21]

Літій-іонні акумулятори відомі своєю високою енергетичною щільністю та масштабованістю, що робить їх одним із пріоритетних варіантів для різних застосувань у сфері накопичення енергії у мережах великого масштабу. Попри ці переваги, залишаються й певні виклики, зокрема високі витрати, обмежений термін служби батарей, екологічні наслідки видобутку матеріалів, а також ризики безпеки, що підтверджує нещодавня катастрофічна пожежа на об'єкті Moss Landing УЗЕ у Каліфорнії. Хоча інші технології зберігання енергії, такі як гідроакумуляуючі електростанції (ГАЕС) та зберігання у вигляді стисненого повітря, забезпечують значний потенціал для масштабного накопичення, їхній розвиток обмежений географічними умовами. Це сприяє зростанню інтересу до альтернативних технологій зберігання енергії, які не мають географічних обмежень, таких як літій-іонні системи накопичення енергії та системи зберігання енергії на рідкому повітрі. Проте системи на основі зберігання рідкого повітря є ще не достатньо популярними, а для більшості країн – новими, тому перевага віддається УЗЕ[21].

Системи накопичення енергії мають усі передумови для активного розвитку у найближчі десятиліття. Одним із ключових чинників є можливість повторного використання акумуляторів після завершення їхнього першого терміну служби в електротранспорті. Такі акумулятори з достатньою залишковою ємністю можуть ефективно працювати у стаціонарних установках, зокрема в гібридних енергетичних системах у віддалених або ізольованих регіонах. Це знижує потребу у виробництві нових батарей, зменшує обсяг відходів та стимулює розвиток економіки замкненого циклу. Крім того, повторне використання значно здешевлює впровадження систем накопичення енергії, що робить їх доступнішими для малих громад та підприємств. Другим суттєвим чинником розвитку є швидке зростання частки відновлюваних джерел енергії у світових енергосистемах. Нерівномірність виробітку сонячної та вітрової енергії потребує наявності потужних і гнучких засобів балансування. Системи накопичення здатні акумулювати надлишкову енергію в години високої генерації та віддавати її у періоди дефіциту. Це не лише підвищує надійність

енергопостачання, а й забезпечує можливість інтеграції більшої частки відновлюваної генерації без необхідності масштабних інвестицій у традиційні резервні джерела. Таким чином, накопичення енергії стає необхідним елементом сучасних енергетичних систем[23].

Економічні та технологічні тенденції також сприяють поширенню систем накопичення. Вартість акумуляторних технологій знижується завдяки зростанню масштабів виробництва, удосконаленню елементної бази та ефективнішій логістиці. Паралельно уряди багатьох країн запроваджують стимули для розвитку відновлюваної енергетики та встановлення систем накопичення: податкові пільги, компенсаційні програми, вимоги до гнучкості енергосистеми. Це робить накопичення енергії економічно вигіднішим і привабливим для інвесторів.

Окремої уваги заслуговує екологічний аспект. Системи накопичення енергії допомагають зменшити залежність від викопних ресурсів, знизити викиди парникових газів, а також оптимізувати використання сировини завдяки повторному використанню акумуляторів. В умовах глобального переходу до сталого розвитку та декарбонізації цей фактор набуває стратегічного значення.

Таким чином, розвиток систем накопичення енергії зумовлений технічними, економічними, екологічними та соціальними чинниками. Вони забезпечують гнучкість енергосистеми, підвищують надійність електропостачання, сприяють ефективній інтеграції відновлюваних джерел енергії та відкривають можливість сталого використання акумуляторних ресурсів після завершення їхнього первинного призначення[22][24].

## **Висновки до розділу 1**

У першому розділі виконано комплексний аналіз структури установок зберігання енергії та особливостей їх роботи у взаємодії з електричною мережею підприємства. Розглянуто функціональні ролі УЗЕ у сучасних системах електропостачання, зокрема забезпечення надійності живлення, згладжування пікових навантажень, підвищення рівня самоспоживання електроенергії від

відновлюваних джерел та оптимізацію енергетичних витрат. Проведене порівняння способів встановлення УЗЕ за схемами Behind the meter та Front the meter показало, що вибір архітектури інтеграції визначається цілями проєкту, особливостями тарифної політики та режимами роботи споживача.

У межах розділу проаналізовано основні типи установок зберігання енергії, що застосовуються у промисловості, включно з літій-іонними, свинцево-кислотними, натрій-іонними, натрій-сірчаними та редокс-ванадієвими системами. Показано, що кожна технологія має власні переваги та обмеження за показниками енергоємності, ресурсу, ефективності та вартості, що зумовлює доцільність їх застосування для різних режимів роботи. Запропонована класифікація УЗЕ за тривалістю та режимами роботи дозволяє пов'язати технічні характеристики накопичувачів з їх практичними функціями – від миттєвого резервування і підтримки якості електроенергії до добового енергетичного зсуву та балансування генерації.

Окрему увагу приділено схемним рішенням інтеграції УЗЕ в системи електропостачання підприємств, зокрема АС- та ДС-з'єднанням, гібридним рішенням на базі джерел безперебійного живлення та побудові мікромереж. Розглянуто склад і функції основних перетворювальних та керувальних підсистем, а також підходи до оцінювання техніко-економічної ефективності УЗЕ з використанням показників TCO, LCOS, NPV, IRR і технічних параметрів циклічної роботи батарей. Крім того, проаналізовано нормативні вимоги до безпеки промислових установок зберігання енергії, зокрема аспекти електробезпеки та кібербезпеки, що є критично важливими для їх надійної та безпечної експлуатації. Отримані в розділі результати створюють теоретичну та методичну основу для подальшого дослідження режимів роботи установки зберігання енергії та обґрунтування її параметрів у складі системи електропостачання конкретного підприємства.

## **2 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

### **2.1 Математичні моделі потоків потужності та енергетичного балансу в гібридній системі енергозабезпечення**

Для комерційних об'єктів у Німеччині застосовується 15-хвилинний інтервал обліку електричної енергії. Це дає змогу детально фіксувати зміну споживання протягом доби та відображати характерні піки, провали та циклічність роботи підприємства. Відповідно, усі профілі навантаження формуються у вигляді послідовності даних з кроком у 15 хвилин, що забезпечує високу точність моделювання споживання та дозволяє ефективно аналізувати можливість впровадження систем накопичення енергії або оптимізації тарифів.[22]

Профілі навантаження поділяються на кілька категорій, що дає змогу врахувати сезонні та календарні особливості роботи підприємства:

1. Сезон;
2. Місяць;
3. Тип дня:
  - a) Робочий день;
  - b) Вихідний день;
  - c) Святковий день.

Для визначення приблизного споживання підприємства в кожний 15-хвилинний інтервал використовуються відповідні стандартні профілі навантаження. Вони дозволяють оцінити поведінку споживача навіть за відсутності детальних історичних даних та є основою для розрахунків енергетичного балансу, аналізу пікових навантажень і подальшої оптимізації за допомогою систем накопичення енергії або гнучких тарифів.[25]

Підвищення ефективності гібридної системи енергозабезпечення із сонячною електричною станцією, установкою зберігання електроенергії,

приєднанням до електричної мережі та електричним споживачем безпосередньо пов'язане з точністю моделювання потоків активної потужності та енергетичного балансу. Саме через такі моделі формуються обмеження та зв'язки у задачах оптимального добового планування, короткострокового диспетчерування та поточного керування режимами роботи мікромережі [24].

У цьому підрозділі розглядається спрощена, але достатньо загальна модель, у якій виділяють один спільний вузол приєднання. До цього вузла підключені сонячна електрична станція через мережевий перетворювач, установка зберігання електроенергії через двонапрямний перетворювач, електрична мережа в точці загального приєднання та узагальнене навантаження споживача. Усі потоки описуються тільки для активної потужності, без урахування реактивної складової. Такий підхід широко застосовують у працях, присвячених оптимальному енергетичному менеджменту мікромереж із сонячною генерацією та акумуляторними установками [26].

## 2.2 Загальні припущення та структура моделі

Для подальшої формалізації вводяться такі основні припущення.

- Розглядається трифазна симетрична система, яка працює в усталеному синусоїдному режимі, напруга у вузлі приєднання підтримується в допустимому діапазоні системою керування, тому у моделях потоків активної потужності напруга вважається сталою.
- Всі елементи гібридної системи відображаються в моделі як джерела або споживачі активної потужності, що приєднані до спільного вузла. Детальну мережеву структуру низьковольтної частини не розглядають, втрати у кабельних лініях та перетворювачах враховуються у зведеному виді.
- Сонячна електрична станція описується як кероване джерело активної потужності, доступна потужність якого залежить від сонячної радіації та температури, а фактична потужність може обмежуватися системою керування.

- Установка зберігання електроенергії описується через активну потужність, що віддається чи споживається, та через змінну енергії, яка відображає стан зарядженості.
- Потік активної потужності між гібридною системою та електричною мережею може мати два напрями. Позитивний напрям відповідає імпорту потужності з мережі до гібридної системи, від'ємний напрям відповідає експорту надлишкової потужності в мережу.
- Навантаження споживача подається як добовий графік активної потужності. За потреби воно може бути розділене на частину, якою не можна керувати, та частину, що допускає керування попитом.

Таке узагальнене представлення відповідає сучасним підходам до моделювання повномасштабних мікромереж з сонячною генерацією та акумуляторною установкою зберігання, що підтверджується публікаціями, присвяченими оптимальному добовому плануванню та експериментальній верифікації моделей[27].

### 2.2.1 Баланс активної потужності у вузлі приєднання

У вибраному вузлі приєднання вводяться такі позначення для активних потужностей як функцій часу:

$P_c(t)$  - активна потужність сонячної електричної станції у вузлі,

$P_z(t)$  - активна потужність установки зберігання електроенергії у вузлі,

$P_m(t)$  - активна потужність, що обмінюється з електричною мережею,

$P_n(t)$  - активна потужність навантаження споживача,

$P_{вт}(t)$  - сумарні втрати активної потужності в силових перетворювача та лініях.

Позитивний напрямок потоків сонячної електричної станції та установки зберігання визначається від відповідного джерела до вузла приєднання. Позитивний напрямок потоку потужності з мережі означає імпорт потужності в гібридну систему. Позитивний напрямок потужності навантаження означає

споживання у вузлі. Втрати потужності завжди розглядаються як додатна величина.

З урахуванням таких домовленостей баланс активної потужності у вузлі приєднання записується у вигляді

$$P_c(t) + P_s(t) + P_m(t) - P_n(t) - P_{вт}(t) = 0.$$

Це рівняння означає, що в кожен момент часу сума активних потужностей усіх джерел, включно з електричною мережею, дорівнює сумі потужності навантаження та втрат. Така форма балансу є стандартною для математичних моделей енергетичного менеджменту мікромереж.

У багатьох задачах оптимізації замість безперервного часу використовують дискретний час. Нехай розглядається множина дискретних моментів

$$t_k = t_0 + k\Delta t, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1,$$

де  $\Delta t$  є тривалість розрахункового інтервалу, наприклад п'ятнадцять хвилин або одна година. Тоді рівняння балансу активної потужності набуває дискретного вигляду

$$P_c(k) + P_s(k) + P_m(k) - P_n(k) - P_{вт}(k) = 0,$$

що буде основним зв'язком між змінними у подальших оптимізаційних постановках.

### 2.2.2 Модель активної потужності сонячної електричної станції

Сонячна електрична станція характеризується доступною активною потужністю, яка визначається сонячною радіацією, температурою фотоперетворювачів та станом обладнання. Позначимо через  $\hat{P}_c(k)$  доступну активну потужність у момент часу  $t_k$ . У більшості практичних задач ця величина відома, оскільки формується на основі прогнозів сонячної генерації, отриманих методами статистичного аналізу або з використанням моделей машинного навчання.

Фактична активна потужність сонячної електричної станції у вузлі позначається  $P_c(k)$  і задовольняє обмеження:

$$0 \leq P_c(k) \leq \hat{P}_c(k),$$

$$0 \leq P_c(k) \leq P_c^{\max},$$

де  $P_c^{\max}$  є встановлена потужність мережевого перетворювача сонячної електричної станції.

Перше обмеження відображає фізичну неможливість виробити більше активної потужності, ніж визначено миттєвою сонячною радіацією. Друге обмеження враховує обмеження по потужності силової електроніки. У разі потреби можна вводити додаткове обмеження для мінімального рівня генерації, якщо перетворювач має обмеження по мінімальному навантаженню.

У деяких режимах робота сонячної електричної станції може бути навмисно обмежена, наприклад з метою зменшення навантаження на лінію приєднання або для вирівнювання профілю сумарної потужності. Тоді рівність у першому обмеженні може не виконуватися, і величина  $P_c(k)$  розглядається як змінна керування в задачі оптимізації.

Для зручності подальшого аналізу вводять також добову генерацію енергії сонячної електричної станції

$$E_{c,\text{доб}} = \sum_{k=0}^{N-1} P_c(k) \Delta t,$$

яка використовується як додатковий показник ефективності використання відновлюваної енергії.

### 2.2.3 Модель установки зберігання електроенергії та її енергетичних перетоків

Установка зберігання електроенергії описується двома групами змінних. Перша група описує миттєву активну потужність у вузлі приєднання. Друга група описує кількість накопиченої енергії та її зміну в часі.

Активна потужність установки зберігання у момент  $t_k$  позначається  $P_3(k)$ .

Позитивне значення відповідає розрядженню та віддачі потужності в гібридну систему. Від'ємне значення відповідає зарядженню та відбору потужності з вузла для накопичення енергії.

З урахуванням технічних обмежень перетворювача та акумуляторної батареї вводяться межі

$$P_3^{\min} \leq P_3(k) \leq P_3^{\max},$$

де  $P_3^{\max} > 0$  є максимальна допустима потужність розрядження, а  $P_3^{\min} < 0$  є максимальна за модулем потужність зарядження.

Для опису енергетичного стану установки зберігання вводиться змінна

$$E(k),$$

яка визначає кількість електричної енергії, накопиченої в установці на початку інтервалу  $k$ . Динаміка зміни енергії задається співвідношенням

$$E(k+1) = E(k) + \eta_{\text{зар}} P_3^-(k) \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{роз}}} P_3^+(k) \Delta t,$$

де

$$P_3^+(k) = \max(P_3(k), 0), \quad P_3^-(k) = \max(-P_3(k), 0),$$

$\eta_{\text{зар}}$  є коефіцієнт корисної дії під час зарядження,  $\eta_{\text{роз}}$  є коефіцієнт корисної дії під час розрядження. Така форма рівняння дозволяє окремо враховувати втрати енергії під час зарядження та розрядження і широко використовується в сучасних моделях добового планування роботи акумуляторних установок у складі мікромереж.

Енергія в установці зберігання має бути обмежена зверху та знизу. Це обумовлено як фізичними межами ємності, так і вимогами до ресурсу акумуляторних елементів. Обмеження записується у вигляді

$$E^{\min} \leq E(k) \leq E^{\max}.$$

Мінімальне значення визначається допустимою глибиною розряду, а максимальне значення відповідає повному зарядженню установки при заданій номінальній ємності. У деяких постановках задається також початковий та кінцевий стан енергії за добу, наприклад

$$E(0) = E_{\text{поч}}, \quad E(N) = E_{\text{кін}},$$

що дозволяє моделювати циклічну роботу установки зберігання.

Модель активної потужності приєднання до електричної мережі

Потік активної потужності між гібридною системою та електричною мережею позначається

$$P_M(k).$$

Позитивне значення означає, що гібридна система отримує електроенергію з мережі. Від'ємне значення означає, що надлишкова потужність від сонячної електричної станції та установки зберігання передається у мережу.

Головним обмеженням для цієї величини є пропускна здатність лінії приєднання та договірні обмеження за максимальною потужністю. Це відображається у вигляді

$$P_M^{\min} \leq P_M(k) \leq P_M^{\max},$$

де  $P_M^{\max} > 0$  є максимальна допустима потужність імпорту, а  $P_M^{\min} < 0$  є максимальна за модулем потужність експорту.

У задачах економічної оптимізації до потоку  $P_M(k)$  прив'язуються тарифні ставки на купівлю та продаж електроенергії, що дозволяє враховувати різні режими роботи залежно від часу доби та ринкових умов.

#### 2.2.4 Модель навантаження споживача та втрат активної потужності

Навантаження споживача в гібридній системі задається як добовий графік активної потужності  $P_H(k)$ .

У найпростішому випадку це фіксована послідовність значень, отримана шляхом вимірювання або прогнозування, яка не підлягає зміні. У більш складних постановках навантаження розділяють на декілька складових:

$$P_H(k) = P_{H,\text{жорст}}(k) + P_{H,\text{гнуч}}(k),$$

де  $P_{H,\text{жорст}}(k)$  описує частину навантаження, якою не можна керувати, а  $P_{H,\text{гнуч}}(k)$  описує гнучке навантаження, яке можна частково переносити в часі або змінювати в межах допустимого діапазону. У задачах оптимального керування

попитом величина  $P_{\text{н,гнуч}}(k)$  розглядається як змінна, на яку накладаються власні обмеження залежно від технологічних процесів споживача.

Втрати активної потужності  $P_{\text{вт}}(k)$  у лініях та перетворювачах можна подати в різний спосіб. Для задач, де домінують техніко-економічні аспекти, часто використовують спрощену модель відносних втрат

$$P_{\text{вт}}(k) = \alpha(P_c(k) + P_3(k)),$$

де  $\alpha$  є коефіцієнт, що характеризує питомі втрати в перетворювачах та внутрішніх лініях. У більш детальних моделях втрати описуються квадратичною залежністю від потоків потужності чи струмів, однак у даній роботі для спрощення оптимізаційних постановок застосовується зведений параметричний опис, який дає змогу зберегти лінійність або слабку нелінійність моделей.

## 2.2.5 Інтегральні рівняння енергетичного балансу

Рівняння балансу активної потужності можна інтегрувати за часом, отримуючи баланс енергії на довільному інтервалі  $[t_0, t_1]$

$$\int_{t_0}^{t_1} P_c(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} P_3(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} P_M(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} P_H(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{вт}}(t) dt.$$

Ліва частина цього рівняння відображає сумарну енергію, вироблену сонячною електричною станцією, віддану або спожиту установкою зберігання та отриману або віддану електричною мережею. Права частина відображає сумарну енергію, спожиту навантаженням та втраченою в елементах системи.

У дискретному часовому представленні для інтервалів тривалості  $\Delta t$  баланс енергії за один інтервал записують як

$$E_c(k) + E_3(k) + E_M(k) = E_H(k) + E_{\text{вт}}(k),$$

де

$$E_c(k) = P_c(k) \Delta t, \quad E_3(k) = P_3(k) \Delta t, \quad E_M(k) = P_M(k) \Delta t,$$

$$E_H(k) = P_H(k) \Delta t, \quad E_{\text{вт}}(k) = P_{\text{вт}}(k) \Delta t.$$

Сумування рівнянь за всі інтервали протягом доби дає добовий баланс енергії

$$\sum_{k=0}^{N-1} E_c(k) + \sum_{k=0}^{N-1} E_3(k) + \sum_{k=0}^{N-1} E_M(k) = \sum_{k=0}^{N-1} E_H(k) + \sum_{k=0}^{N-1} E_{BT}(k).$$

Ці співвідношення забезпечують зв'язок між миттєвими потоками потужності та інтегральними енергетичними показниками, що є основою для задач оптимізації, у яких розглядають добові, тижневі або сезонні горизонти планування.

### 2.2.6 Узагальнення для подальших оптимізаційних задач

Отримані вище моделі потоків активної потужності та енергетичного балансу утворюють повну систему зв'язків між основними компонентами гібридної системи енергозабезпечення. За допомогою рівнянь та описів навантаження й втрат можна сформулювати широкий клас оптимізаційних задач.

На основі цих моделей у наступних підрозділах будуть побудовані задачі:

- мінімізації добових витрат на електроенергію за рахунок оптимального профілю  $P_3(k)$  та  $P_M(k)$  з урахуванням тарифів та обмежень по потужності лінії приєднання;
- максимізації використання сонячної генерації за умов, коли допустимий імпорт з мережі та можливості установки зберігання обмежені;
- зменшення кількості глибоких циклів розрядження установки зберігання, що має важливе значення для продовження її ресурсу;
- поєднаної оптимізації режимів роботи установки зберігання, сонячної електричної станції та гнучкої частини навантаження .

Таким чином, запропонований опис потоків активної потужності та енергетичного балансу в гібридній системі, що складається із сонячної електричної станції, установки зберігання, приєднання до електричної мережі та споживача, забезпечує цілісну основу для подальшого математичного формулювання задач оптимального керування режимами роботи такої системи.

## **2.3 Опис режимів роботи установки зберігання енергії**

Основне призначення УЗЕ – перетворення електричної енергії мережі або генератора у хімічну, механічну чи іншу форму енергії під час заряджання та здійснення зворотного перетворення при розряджанні. Силовий перетворювач забезпечує кероване перетворення постійного струму акумуляторних батарей у змінний струм, що відповідає параметрам мережі. Система керування контролює стан батарей, координує процеси заряджання й розряджання, виконує захисні функції та забезпечує оптимальну роботу всього комплексу.

Система накопичення енергії може працювати в декількох основних режимах:

1. Режим заряджання
2. Режим розряджання
3. Стаціонарний режим
4. Режим очікування
5. Аварійний режим
6. Зупинка

### **2.3.1 Режим заряджання**

У цьому режимі система накопичення енергії приймає електричну енергію з мережі або джерела генерації та накопичує її у вигляді хімічної, електричної або іншої форми енергії залежно від типу технології. Силова електроніка працює у напрямку перетворення зовнішньої електроенергії у внутрішню форму зберігання[4].

Ключовими ознаками даного режиму є:

1. Відбувається надходження енергії всередину системи;
2. Система контролює струм, напругу та температуру під час заряджання;

3. Система захисту може обмежувати струм або припиняти заряд при виході параметрів за межі.

У типовому випадку процес заряджання реалізується за керованим алгоритмом, який враховує стан заряду (SOC), стан здоров'я батареї (SOH), температуру елементів та обмеження за струмом і напругою. Для літій-іонних батарей найчастіше застосовується поєднання режимів постійного струму та постійної напруги: на початковому етапі заряджання струм підтримується близьким до номінального, а коли напруга на комірках досягає заданого рівня, система переходить у режим обмеження напруги з поступовим зменшенням струму. Це дозволяє мінімізувати деградацію батарей і забезпечити безпечно досягнення цільового SOC.

Керування процесом заряджання здійснює система управління батареєю (BMS) спільно з вищим рівнем керування (EMS/SCADA). BMS вимірює напругу кожної комірки або модуля, температуру, струм, оцінює баланс елементів та за потреби виконує балансування (вирівнювання заряду між комірками). Якщо хоча б один із параметрів виходить за допустимі межі (надмірна температура, перевищення напруги, занадто великий струм), BMS подає команду на зменшення потужності заряджання або повне його припинення. Таким чином забезпечується як електробезпека, так і збереження ресурсу батареї.

З боку мережі або джерела живлення заряджання УЗЕ може бути організовано за різними стратегіями. У найпростішому випадку система заряджається в години низьких тарифів або надлишку генерації від відновлюваних джерел. У складніших сценаріях заряджання відбувається за графіком, сформованим на основі прогнозу навантаження, прогнозу генерації ВДЕ та ринкових цін. При цьому перетворювач може не лише споживати активну потужність для заряджання, а й виконувати додаткові функції – наприклад, підтримувати напругу в мережі шляхом керування реактивною потужністю.

Захист у режимі заряджання є багаторівневим. Окрім логіки BMS, що контролює стан батарей, на рівні силової електроніки реалізуються апаратні

обмеження за струмом і напругою, діють автоматичні вимикачі, запобіжники, релейний захист. У разі критичних відхилень (коротке замикання, різкий стрибок напруги, перегрів) система переходить спочатку в режим обмеження потужності, а потім – у аварійний режим з відключенням заряджання[5].

### 2.3.2 Режим розряджання

У режимі розряджання система накопичення енергії передає раніше накопичену електричну енергію в мережу або на внутрішніх споживачів, виконуючи функції покриття навантаження, зменшення пікової потужності, підтримки напруги чи резервного живлення. Процес розряджання регулюється системою керування батареями (BMS) і системою керування енергетичним комплексом (EMS). BMS безперервно вимірює напруги комірок, температуру, струм, а також визначає поточний рівень заряду (SOC). Виходячи з цих даних, вона встановлює максимальну дозволена потужність розряджання, запобігаючи небезпечним станам, зокрема:

1. Надмірному падінню напруги на комірках;
2. Перегріву окремих модулів;
3. Виходу SOC нижче допустимого порогу;
4. Надмірним струмам або несиметричному розподілу навантаження між модулями.

Алгоритм розряджання залежить від завдань системи. У найпростішому режимі система працює з постійною заданою потужністю – наприклад, для покриття пікового навантаження підприємства або стабілізації споживання. У складніших режимах система може динамічно змінювати потужність розряджання залежно від цін на електроенергію, графіка навантаження, вимог до підтримки частоти або сигналів диспетчеризації. Для цього інвертор використовує внутрішні моделі та команди від EMS, забезпечуючи точне дотримання встановленого графіка видачі потужності[28].

Також важливою складовою режиму розрядження є забезпечення якості електроенергії. Силовий перетворювач виконує функції згладжування гармонік, регулювання коефіцієнта потужності та підтримання синхронізації з мережею. Завдяки цьому УЗЕ може виступати активним елементом електроенергетичної системи, а не лише пасивним джерелом енергії.

Система розрядження працює із багаторівневими механізмами захисту. На рівні інвертора діють апаратні обмеження струму, напруги й температури. На рівні EMS – обмеження за плановими параметрами та вимогами мережі. Якщо будь-який параметр виходить за межі допустимого, система автоматично зменшує потужність розрядження або переходить у режим очікування. У разі таких критичних подій як коротке замикання, перегрів батарей чи втрата зв'язку з ключовими датчиками система негайно переходить у аварійний режим і припиняє передачу енергії.

### **2.3.3 Стаціонарний режим**

Стаціонарний режим – це основний робочий стан системи накопичення енергії, у якому всі процеси заряджання, розряджання або надання мережевих послуг відбуваються у стабільних, контрольованих умовах. У цьому режимі УЗЕ виконує свою функцію згідно із встановленим графіком потужності або параметрами регулювання, підтримуючи сталий режим роботи без суттєвих коливань енергетичних параметрів.

У цьому стані інвертор підтримує заданий рівень активної або реактивної потужності, узгоджуючи свою роботу з вимогами мережі. Наприклад, під час виконання функцій стабілізації напруги або компенсації реактивної потужності система може працювати з незмінними параметрами тривалий час. Якщо ж стаціонарний режим пов'язаний із заряджанням або розряджанням, потужність процесу підтримується на фіксованому рівні, що дозволяє досягати оптимальної продуктивності та мінімізувати теплове навантаження на електрохімічні елементи.

### 2.3.4 Режим очікування

Режим очікування – це стан системи накопичення енергії, у якому вона залишається повністю працездатною та готовою до негайного переходу як у заряджання, так і в розряджання, але при цьому не здійснює активного обміну енергією з мережею або внутрішніми споживачами. Це проміжний або «підготовчий» режим роботи, що забезпечує високу оперативність реагування системи та мінімальне енергоспоживання. У цьому стані інвертор і батарейні модулі знаходяться під напругою, а ключові підсистеми – система керування (EMS), система управління батареєю (BMS), система охолодження та діагностики – працюють у режимі постійного контролю. Потужність на вході та виході системи є нульовою або близькою до нуля, що означає відсутність руху активної енергії, але при цьому УЗЕ зберігає повну готовність до роботи.

УЗЕ у цьому режимі контролює:

1. Рівень заряду батарей (SOC), зокрема відстежує, чи не досягнуто мінімальних або максимальних порогів;
2. Стан здоров'я батарей (SOH), оцінюючи деградацію та рівномірність характеристик між модулями;
3. Температуру елементів, забезпечуючи роботу в оптимальних межах;
4. Напругу та баланс комірок, запобігаючи розбіжностям, що можуть вплинути на безпечну роботу;
5. Стан інверторного обладнання, включно з системами охолодження, вентиляції та допоміжними джерелами живлення.

Якщо будь-які параметри виходять за межі норми, система не переходить у режим роботи, а навпаки – або залишається в очікуванні з обмеженнями, або переходить в аварійний режим для захисту обладнання[28].

### 2.3.5 Аварійний режим

Аварійний режим – це стан системи накопичення енергії, у якому зафіксовано небезпечні або неконтрольовані відхилення параметрів роботи, здатні спричинити пошкодження обладнання, вихід батарей із ладу або створити загрозу безпеці персоналу та об'єкта. Перехід до аварійного режиму є автоматичним, оскільки система працює за принципом багаторівневого захисту.

Аварійний режим активується в тих випадках, коли один або декілька критичних параметрів виходять за межі допустимих значень. Це можуть бути:

- Електричні порушення: перенапруга, занижена напруга, надмірний струм, внутрішнє коротке замикання, обрив ланцюга, перенавантаження інвертора;
- Теплові відхилення: перегрівання комірок, модулів, інвертора або силових компонентів;
- Порушення балансу батарей: значна різниця напруг між комірками, критичний перекіс SOC, втрата контролю за BMS;
- Збої у роботі датчиків та систем контролю: відсутність зворотного зв'язку, невірні сигнали вимірювань, відмови температурних або струмових сенсорів;
- Порушення зовнішніх умов: відхилення параметрів мережі, неправильна синхронізація, аварія на стороні навантаження, втрата заземлення, перегрів контейнера;
- Логічні або комунікаційні збої: втрата зв'язку між BMS, PCS або EMS, некоректні команди внаслідок збою мережевого протоколу.[29]

У разі виявлення таких відхилень система негайно припиняє активний обмін енергією та переходить у безпечний стан. Це може супроводжуватися:

- Повним відключенням батарей через силові контактори;
- Миттєвим від'єднанням інвертора від мережі;
- Ізоляцією несправного модуля або секції;
- Обмеженням або припиненням заряджання/розряджання;

- Переведенням системи охолодження в аварійний режим (максимальна потужність вентиляторів або включення рідинного охолодження);
- Активацією внутрішньої або зовнішньої пожежної системи, якщо загроза досягає критичного рівня.

Обов'язковою складовою аварійного режиму є запис журналу подій, включаючи часові мітки, показання сенсорів, статуси модулів та командні дії. Це дозволяє провести діагностику, відстежити першопричину аварії та запобігти її повторенню[30].

### **2.3.6 Режим зупинки**

Режим зупинки – це стан системи накопичення енергії, у якому всі активні функції заряджання, розряджання та взаємодії з електричною мережею повністю припинені. Система переходить у цей режим у разі планових робіт, технічного обслуговування, тривалого простою або після аварійної події, коли подальша робота без усунення проблеми неможлива або небезпечна. Це найнижчий рівень активності УЗЕ, у якому обладнання перебуває у механічно й електрично безпечному стані.

Під час переходу до режиму зупинки система здійснює послідовність процедур, спрямованих на забезпечення електробезпеки та стабільності внутрішніх елементів. Перед вимкненням батарей BMS вирівнює напругу комірок, встановлює безпечний рівень заряду (зазвичай 20–50 % SOC, залежно від рекомендацій виробника) та зупиняє балансування. Інверторний модуль припиняє видачу активної та реактивної потужності, розмикає контактори на стороні постійного та змінного струму та знімає синхронізацію з мережею. Усі внутрішні силові кола від'єднуються за допомогою механічних або електромеханічних контактів, які гарантують гальванічну розв'язку УЗЕ від зовнішньої системи. Це запобігає випадковому включенню, паразитним струмам або пошкодженню обладнання під час робіт.

Допоміжні підсистеми також переходять у стан спокою. Система охолодження зупиняється або працює в мінімальному режимі, який потрібний лише для відведення залишкового тепла після активної роботи. Система вентиляції контейнера припиняє активну циркуляцію повітря. Система пожежогасіння переводиться у пасивний режим очікування, але зберігає готовність до спрацювання. EMS зберігає лог-файли, архівує параметри та блокує команди на запуск до завершення технічної перевірки[31].

## **2.4 Моделі установки зберігання електроенергії та обмеження її функціонування в складі гібридної системи**

Ефективність гібридної системи енергозабезпечення із сонячною електричною станцією, установкою зберігання електроенергії, приєднанням до електричної мережі та електричним споживачем значною мірою визначається властивостями та режимами роботи установки зберігання електроенергії. Саме накопичувач забезпечує згладжування коливань сонячної генерації, зменшення пікових навантажень, можливість реалізації енергетичного арбітражу та підвищення частки використання відновлюваної енергії. У зв'язку з цим побудова адекватних математичних моделей установки зберігання електроенергії та коректне формулювання обмежень її функціонування є ключовою складовою дисертаційної задачі.

У цьому підрозділі розглядаються основні підходи до моделювання установки зберігання електроенергії для задач аналізу та оптимального керування гібридною системою енергозабезпечення. Особлива увага приділяється модельним описам, які застосовуються в сучасних дослідженнях для техніко-економічної оптимізації систем типу сонячна електрична станція плюс акумуляторна установка зберігання та електрична мережа. Окремо розглядаються енергетичні, електричні та деградаційні моделі, а також формулюються обмеження, які відображають технічні, ресурсні та експлуатаційні вимоги до установки зберігання.

### **2.4.1 Роль установок зберігання електроенергії та вимоги до математичного опису**

Стаціонарні установки зберігання електроенергії на базі літій-іонних акумуляторів є домінуючою технологією для гібридних систем енергозабезпечення малої та середньої потужності. Вони характеризуються високою енергетичною ефективністю, достатньо великою питомою енергоємністю та можливістю гнучкого керування режимами заряджання і розряджання. Для коректної оцінки їхнього внеску в роботу гібридної системи математична модель повинна:

- відображати енергетичний баланс накопичувача, тобто залежність між потужністю заряджання, потужністю розряджання та накопиченою енергією;
- враховувати обмеження за станом заряду, потужністю, струмом, а також допустимою швидкістю зміни потужності;
- забезпечувати можливість урахування деградації ємності та внутрішнього опору в довгострокових розрахунках;
- бути достатньо простою для включення в оптимізаційні задачі добового, тижневого та річного планування.

У сучасній літературі виділяють декілька основних класів моделей установки зберігання електроенергії для застосувань у енергетичних системах. До них належать спрощені енергетичні моделі, моделі на основі електричних еквівалентних схем, електрохімічні моделі та емпіричні моделі деградації. У цій роботі основна увага зосереджена на енергетичних та еквівалентно-схемних моделях, які поєднують достатню точність з прийнятною обчислювальною складністю для задач оптимального керування гібридною системою.

## 2.4.2 Класифікація моделей установки зберігання електроенергії

Узагальнюючи результати оглядових робіт, можна виділити такі чотири основні групи моделей установки зберігання електроенергії для задач енергетики:

1. Енергетичні моделі з описом стану заряду. У цих моделях установка зберігання описується змінною, яка характеризує кількість накопиченої енергії або відносний стан заряду. Напруга та струм не моделюються явно. Такі моделі широко застосовують у техніко-економічних оптимізаційних задачах для мікромереж та систем типу сонячна електрична станція плюс накопичувач.
2. Моделі на основі електричних еквівалентних схем. Установка зберігання подається набором активних і реактивних елементів електричного кола. Напруга на виводах та струм через установку зберігання описуються диференціальними рівняннями. Такі моделі дозволяють відтворити динамічні властивості акумуляторів, а також залежність напруги від стану заряду, струму та температури.
3. Електрохімічні моделі детального рівня. Для опису внутрішніх процесів у літій-іонному елементі використовуються моделі дифузії та переносу заряду. Подібні моделі застосовуються переважно для аналізу окремих елементів та не призначені для безпосереднього використання в системному енергетичному моделюванні.
4. Емпіричні та напівемпіричні моделі деградації. У цих моделях зміна ємності та внутрішнього опору з часом описується залежностями від енерговіддачі, кількості циклів, температури та інших факторів. Такі моделі дозволяють ураховувати вартість старіння установки зберігання в оптимізаційних задачах.

Для задач дисертаційної роботи доцільно застосовувати узгоджений комбінований підхід. На рівні енергетичного балансу використовується спрощена модель стану заряду, яка зручно інтегрується в задачі оптимального

керування. Для врахування деградації застосовується додатковий емпіричний опис, який пов'язує напрацьований енергетичний ресурс з втратою ємності. Такий підхід широко представлений у сучасних дослідженнях, присвячених оптимальному розміру та режимам роботи акумуляторних установок у мережевих сонячних системах.

### 2.4.3 Енергетична модель стану заряду установки зберігання

Енергетична модель є базовою для формування обмежень гібридної системи в задачах добового та тижневого планування. У цій моделі стан установки зберігання описується змінною енергії, накопиченої в акумуляторі. При дискретному описі часу з кроком  $\Delta t$  використовується послідовність моментів  $t_k$ . На початку інтервалу  $k$  величина накопиченої енергії позначається  $E(k)$ . Активна потужність установки зберігання у тому самому інтервалі позначається  $P_3(k)$ . Позитивне значення відповідає розрядженню, від'ємне значення відповідає заряджанню.

Для урахування різних коефіцієнтів корисної дії при заряджанні та розряджанні вводяться додатні частини потужності

$$P_3^+(k) = \max(P_3(k), 0), \quad P_3^-(k) = \max(-P_3(k), 0).$$

Тоді динаміка накопиченої енергії описується рівнянням

$$E(k+1) = E(k) + \eta_{\text{зар}} P_3^-(k) \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{роз}}} P_3^+(k) \Delta t,$$

де  $\eta_{\text{зар}}$  є коефіцієнт корисної дії під час заряджання, а  $\eta_{\text{роз}}$  є коефіцієнт корисної дії під час розряджання.

Рівняння є типовим для сучасних моделей добового оптимального керування установкою зберігання в мікромережах та мережевих сонячних системах. Воно застосовується у численних роботах, де розглядається оптимальне планування потужності установки зберігання з урахуванням тарифів, обмежень на обмін з мережею та вимог до ресурсу акумуляторів.

Для зручності аналізу вводиться відносний стан заряду. Нехай номінальна енергетична ємність установки зберігання дорівнює  $E_{\text{ном}}$ . Тоді відносний стан заряду визначається як

$$z(k) = \frac{E(k)}{E_{\text{ном}}}.$$

Межі допустимих значень стану заряду задаються як

$$z^{\min} \leq z(k) \leq z^{\max},$$

де нижня межа визначається допустимою глибиною розряду, а верхня межа відповідає безпечному рівню зарядженості з точки зору ресурсу та безпеки акумулятора.

Активна потужність установки зберігання обмежується допустимими режимами заряджання та розряджання

$$P_3^{\min} \leq P_3(k) \leq P_3^{\max}.$$

Ці межі визначаються максимально допустимим струмом акумуляторної батареї та характеристиками перетворювального комплексу. У багатьох роботах вони виражаються через максимально допустимий коефіцієнт розряджання, який задають у вигляді допустимого відношення струму до ємності.

Енергетична модель разом з обмеженнями формує основу для включення установки зберігання в баланс активної потужності гібридної системи, побудований у попередньому підрозділі.

#### **2.4.4 Моделі на основі еквівалентних електричних схем**

Для задач, де необхідно точніше описати вплив струму на напругу установки зберігання та оцінити втрати енергії внаслідок внутрішнього опору, застосовуються моделі на основі еквівалентних електричних схем. У таких моделях акумуляторний модуль або батарея описується комбінацією активного опору та гілок з активними опорами і ємностями, які відображають поляризаційні процеси.

Найпростішим варіантом є модель з одним внутрішнім опором. У цьому випадку миттєва напруга на виводах установки зберігання визначається як

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{xx}}(z(t), T(t)) - R_0 I(t),$$

де  $U_{\text{xx}}$  є напруга холостого ходу, яка залежить від стану заряду та температури,  $R_0$  є внутрішній активний опір, а  $I(t)$  є струм заряджання або розряджання.

Більш точні моделі включають одну або декілька гілок типу опір плюс ємність. Для моделі з двома такими гілками напруга на виводах записується як

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{xx}}(z(t), T(t)) - R_0 I(t) - v_1(t) - v_2(t),$$

де  $v_1(t)$  та  $v_2(t)$  описують напруги на ємностях поляризаційних гілок. Їхній розвиток у часі задається рівняннями

$$C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = I(t) - \frac{v_1(t)}{R_1}, \quad C_2 \frac{dv_2(t)}{dt} = I(t) - \frac{v_2(t)}{R_2}.$$

Параметри таких моделей можуть залежати від стану заряду, температури та стану здоров'я акумулятора. Це дозволяє урахувати вплив старіння на напругу та внутрішні втрати.

Хоча еквівалентно-схемні моделі є більш складними з точки зору чисельної реалізації, вони широко застосовуються у дослідженнях, де необхідно поєднати задачі оптимального керування мікромережею з аналізом режимів роботи конкретних акумуляторних модулів. У таких випадках енергетична модель стану заряду поєднується з еквівалентно-схемною моделлю напруги та струму.

#### **2.4.5 Моделі деградації ємності та ресурсу установки зберігання**

Однією з ключових особливостей установки зберігання електроенергії є поступова деградація її характеристик внаслідок календарного старіння та циклічного навантаження. Зменшення ємності та збільшення внутрішнього опору безпосередньо впливають на техніко-економічні показники гібридної системи, а також визначають оптимальні режими роботи установки зберігання у довгостроковій перспективі.

У літературі для енергетичних систем найбільш поширені емпіричні моделі деградації, які пов'язують втрату ємності з напрацьованою енергією або числом еквівалентних циклів. Узагальнено втрату ємності можна подати як

$$\Delta E_{\text{дег}} = f_{\text{кал}}(t) + f_{\text{цик}}(W_{\text{кр}}),$$

де перший доданок описує календарне старіння як функцію часу, а другий доданок описує циклічне старіння як функцію сумарної коригованої енергії, що пройшла через установку зберігання.

Поширеним підходом є використання моделі, у якій календарна складова зростає пропорційно кореню з часу, а циклічна складова є пропорційною сумарній енергії, віднесеній до номінальної ємності. У дискретному вигляді можна записати

$$E_{\text{ном}}(k+1) = E_{\text{ном}}(k) - \Delta E_{\text{кал}}(k) - \Delta E_{\text{цик}}(k),$$

де

$$\Delta E_{\text{цик}}(k) = \alpha_{\text{цик}}(P_3^+(k) + P_3^-(k))\Delta t,$$

а  $\alpha_{\text{цик}}$  є коефіцієнт, що характеризує втрату ємності при одиничному енергетичному навантаженні. Календарна складова може бути описана емпіричною функцією від тривалості роботи та температури.

У задачах оптимального керування часто застосовують ще простіший підхід. Вартість деградації представляють як додаткову складову у функції мети, пропорційну сумарній енергії, що пройшла через установку зберігання. У цьому випадку до критерія додають доданок

$$J_{\text{дег}} = c_{\text{дег}} \sum_{k=0}^{N-1} (P_3^+(k) + P_3^-(k)) \Delta t,$$

де  $c_{\text{дег}}$  є питомою вартістю деградації на одиницю енергії. Такий підхід застосовують у роботах з оптимізації розмірності та режимів роботи установки зберігання, де деградація розглядається як додаткова експлуатаційна витрата.

Включення моделей деградації у техніко-економічні розрахунки суттєво впливає на оптимальні стратегії використання установки зберігання. Для однакового тарифного профілю оптимальний профіль заряджання та

розрядження може змінюватися у бік більш щадних режимів, що підтверджується чисельними експериментами в сучасних дослідженнях.

#### **2.4.6 Обмеження функціонування установки зберігання в складі гібридної системи**

Установка зберігання електроенергії у складі гібридної системи енергозабезпечення підпорядковується низці обмежень. Їх умовно поділяють на внутрішні обмеження, пов'язані з електрохімічними та тепловими процесами, та системні обмеження, що впливають з вимог до гібридної системи в цілому.

До внутрішніх обмежень належать:

- обмеження на стан заряду, яке описується нерівністю. Перевищення верхньої межі може призвести до прискореного старіння та ризиків безпеки, а надмірно глибокий розряд скорочує ресурс акумулятора;
- обмеження на потужність заряджання та розряджання, які описуються нерівністю. Ці межі пов'язані з допустимими значеннями струму, параметрами силових перетворювачів та тепловим режимом;
- обмеження на швидкість зміни потужності, яке можна подати у вигляді

$$|P_3(k + 1) - P_3(k)| \leq R_{\text{макс}},$$

де  $R_{\text{макс}}$  є максимальна допустима швидкість зміни потужності. Це обмеження захищає перетворювальний комплекс та зменшує динамічні навантаження на акумулятор;

- температурні обмеження, які задають допустимий діапазон температури елементів акумулятора. У спрощених системних моделях ці обмеження зазвичай враховують непрямо, через вибір допустимих діапазонів потужності та стану заряду.

Системні обмеження включають:

- забезпечення балансу активної потужності гібридної системи на кожному інтервалі часу. Установка зберігання не може працювати незалежно від профілю сонячної генерації, навантаження та потужності обміну з електричною мережею;

- обмеження, пов'язані з лінією приєднання до електричної мережі. Установка зберігання не може компенсувати перевищення максимальної допустимої потужності обміну з мережею, якщо для цього бракує її енергетичних і потужнісних можливостей. У багатьох оптимізаційних задачах поєднання обмежень на  $P_3(k)$  та  $P_M(k)$  формує складну множину допустимих режимів гібридної системи;
- вимоги до надійності електропостачання критичних навантажень. Установка зберігання повинна мати резерв енергії для покриття відхилень сонячної генерації та можливих обмежень з боку електричної мережі. Це реалізується через додаткове обмеження

$$E(k) \geq E^{\text{рез}}(k),$$

де  $E^{\text{рез}}(k)$  є мінімальний резерв енергії, який залежить від умов експлуатації;

- ресурсообмежувальні вимоги, пов'язані з заданим терміном служби установки зберігання. Сумарна кількість еквівалентних циклів або сумарна енергія, що пройшла через установку зберігання за розрахунковий період, не повинна перевищувати допустимого значення. У найпростішому вигляді це можна подати у вигляді

$$\sum_{k=0}^{N-1} (P_3^+(k) + P_3^-(k)) \Delta t \leq W_{\text{доп}},$$

де  $W_{\text{доп}}$  є допустимий енергетичний ресурс за заданий горизонт планування.

Перераховані обмеження утворюють цілісну систему вимог до установки зберігання електроенергії, яка забезпечує безпечну, надійну та економічно доцільну експлуатацію в складі гібридної системи.

#### **2.4.7 Інтеграція моделей установки зберігання в оптимізаційні задачі гібридної системи**

Енергетична модель установки зберігання, еквівалентно-схемний опис напруги та струму, а також моделі деградації та обмеження функціонування

інтегруються в єдину математичну постановку задачі оптимального керування гібридною системою енергозабезпечення. У відповідних оптимізаційних задачах змінними керування виступають профілі потужності сонячної електричної станції, установки зберігання та обміну з електричною мережею. Змінними стану є стан заряду установки зберігання, а за потреби також її номінальна ємність та інші параметри, що змінюються внаслідок деградації.

Функція мети може включати:

- витрати на закупівлю електроенергії з мережі з урахуванням часової структури тарифів;
- доходи від продажу надлишкової електроенергії в мережу, якщо така можливість передбачена;
- витрати, пов'язані з деградацією установки зберігання, які подаються у вигляді додаткової складової, пропорційної сумарній енергії заряджання та розряджання;
- штрафи за недовідпуск електроенергії навантаженню або за порушення технічних обмежень.

Рівняння енергетичного балансу для гібридної системи, побудовані у попередньому підрозділі, разом з рівнянням динаміки стану заряду і системою обмежень утворюють основний набір зв'язків у таких оптимізаційних задачах. У сучасних дослідженнях для їх розв'язання застосовують методи лінійного та нелінійного програмування, змішаного цілочислового програмування, а також різні метаевристичні алгоритми та методи прогнозного керування.

Таким чином, розглянуті моделі установки зберігання електроенергії та сформульовані обмеження її функціонування забезпечують необхідний рівень деталізації для побудови адекватних оптимізаційних моделей гібридної системи енергозабезпечення. Вони дозволяють поєднати технічні, ресурсні та економічні аспекти роботи установки зберігання та сформулювати постановки задач, орієнтовані на підвищення загальної ефективності гібридної системи.

## **2.5 Постановка задачі оптимального керування режимами роботи гібридної системи з установкою зберігання електроенергії**

Математичні моделі потоків активної потужності та енергетичного балансу, розглянуті в попередніх підрозділах, створюють основу для формалізації задачі оптимального керування режимами роботи гібридної системи енергозабезпечення, що містить сонячну електричну станцію, установку зберігання електроенергії, приєднання до електричної мережі та електричного споживача. Наступним логічним кроком є формування чіткої постановки задачі оптимального керування, у межах якої будуть визначені змінні керування, змінні стану, цільові функції та система обмежень.

У світовій науковій літературі задачі такого типу зазвичай формулюються як задачі оптимального енергетичного менеджменту на кінцевому часовому горизонті. У працях, присвячених режимам роботи мікромереж із сонячною генерацією та акумуляторними установками зберігання, розглядаються добові, тижневі та інші горизонти планування. Застосовуються різні критерії оптимальності, серед яких мінімізація витрат на електроенергію, максимізація власного споживання сонячної енергії, мінімізація викидів діоксиду вуглецю, мінімізація зносу установки зберігання та інші.

### **2.5.1 Загальна ідея задачі та вибір горизонту планування**

Мета задачі оптимального керування режимами роботи гібридної системи полягає у тому, щоб для заданого горизонту планування та відомих прогнозних даних щодо сонячної генерації, електричного навантаження та тарифів на електроенергію визначити такі профілі потужності сонячної електричної станції, установки зберігання та обміну з електричною мережею, які забезпечують виконання енергетичного балансу та всіх технічних обмежень і одночасно оптимізують обраний показник ефективності.

У більшості сучасних робіт як базовий розглядається добовий горизонт планування. У цьому випадку система керування отримує прогноз на двадцять

чотири години вперед і визначає оптимальний добовий графік роботи установки зберігання та обміну з мережею, а також, за потреби, обмеження сонячної генерації та керування навантаженням. Добовий горизонт є компромісом між точністю прогнозу та необхідністю враховувати добові зміни тарифів і навантаження.

Нехай розглядається відрізок часу тривалістю  $T$ , який поділено на  $N$  однакових інтервалів тривалістю  $\Delta t = T/N$ . Моменти часу позначаються як

$$t_k = t_0 + k\Delta t, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1.$$

У кожному інтервалі часу приймаються рішення щодо значень активних потужностей елементів гібридної системи. У подальшому викладенні розглядається саме дискретний опис часу[40].

### 2.5.2 Змінні керування, змінні стану та вхідні дані задачі

Для формалізації задачі необхідно чітко визначити вектори змінних керування та стану, а також набір вхідних даних.

Змінні керування:

- $P_c(k)$  активна потужність сонячної електричної станції у вузлі приєднання на інтервалі  $k$ . Ця потужність може бути меншою за доступну внаслідок реалізації обмеження або спеціальної стратегії зменшення генерації.
- $P_3(k)$  активна потужність установки зберігання електроенергії у вузлі приєднання на інтервалі  $k$ . Позитивне значення відповідає розрядженню, від'ємне значення відповідає заряджанню.
- $P_m(k)$  активна потужність, що обмінюється з електричною мережею на інтервалі  $k$ . Позитивне значення означає імпорт електроенергії, від'ємне значення означає експорт.
- за потреби додаткові змінні, які описують керування гнучкою частиною навантаження, наприклад змінну частину навантаження  $P_{н,гнуч}(k)$  або величину відключеної потужності  $P_{відм}(k)$ .

Змінні стану:

- $E(k)$  накопичена енергія в установці зберігання на початку інтервалу  $k$ . Ця змінна описує стан заряду та визначає можливості подальшого заряджання і розряджання.

У найпростішому варіанті задачі інші параметри вважаються сталими або визначеними наперед. Якщо ж у моделі враховується деградація установки зберігання, то до змінних стану можна додати номінальну енергетичну ємність  $E_{\text{ном}}(k)$ , яка змінюється внаслідок старіння.

Вхідні дані задачі:

- прогноз доступної активної потужності сонячної електричної станції  $\hat{P}_c(k)$  для кожного інтервалу часу;
- прогноз активної потужності навантаження  $P_n(k)$  для кожного інтервалу;
- тарифи на закупівлю електроенергії з мережі  $c_{\text{імп}}(k)$  та тарифи або правила компенсації за відпуск електроенергії в мережу  $c_{\text{екс}}(k)$ ;
- технічні параметри установки зберігання: номінальна енергетична ємність  $E_{\text{ном}}$ , допустимий діапазон стану заряду, максимально допустимі потужності заряджання та розряджання, коефіцієнти корисної дії;
- обмеження на потужність обміну з електричною мережею;
- параметри, пов'язані з можливим недовідпуском електроенергії навантаженню, наприклад штрафні коефіцієнти;
- параметри, пов'язані з урахуванням деградації установки зберігання, зокрема питомі витрати на одиницю енергії, що проходить через акумулятор.

Такий набір змінних та вхідних даних відповідає постановкам задач оптимального енергетичного менеджменту, які застосовуються у сучасних роботах для мікромереж із сонячною генерацією та акумуляторними установками[32].

### 2.5.3 Формулювання цільової функції економічної оптимізації

У цій роботі базовою вважається постановка задачі, спрямованої на мінімізацію сукупних добових витрат гібридної системи. Під витратами

розуміють витрати на закупівлю електроенергії з мережі, зменшені на доходи від продажу електроенергії до мережі, а також додаткові витрати, пов'язані з деградацією установки зберігання і можливим недовідпуском електроенергії навантаженню.

Нехай величина  $P_M^+(k)$  означає додатну частину потужності обміну з мережею,

$$P_M^+(k) = \max(P_M(k), 0),$$

а величина  $P_M^-(k)$  означає додатну величину, що відповідає експорту,

$$P_M^-(k) = \max(-P_M(k), 0).$$

Аналогічно для установки зберігання,

$$P_3^+(k) = \max(P_3(k), 0), \quad P_3^-(k) = \max(-P_3(k), 0).$$

Позначимо через  $P_{\text{відм}}(k)$  потужність навантаження, яка не була забезпечена в момент часу  $t_k$ . Тоді фактична потужність навантаження, що була забезпечена, дорівнює

$$P_{\text{н,ф}}(k) = P_{\text{н}}(k) - P_{\text{відм}}(k).$$

Тариф на закупівлю електроенергії з мережі дорівнює  $c_{\text{імп}}(k)$ , тариф на продаж або компенсація за відпуск електроенергії в мережу дорівнює  $c_{\text{екс}}(k)$ . Питомі витрати на деградацію установки зберігання позначаються  $c_{\text{дег}}$ , а штрафна вартість недовідпуску електроенергії навантаженню позначається  $c_{\text{відм}}$ .

Тоді добова функція витрат має вигляд

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [c_{\text{імп}}(k)P_M^+(k)\Delta t - c_{\text{екс}}(k)P_M^-(k)\Delta t + c_{\text{дег}}(P_3^+(k) + P_3^-(k))\Delta t + c_{\text{відм}}P_{\text{відм}}(k)\Delta t].$$

Мета оптимального керування полягає у мінімізації функції  $J$ . Така постановка відповідає роботам, у яких задача енергетичного менеджменту мікромережі формулюється як задача економічного розподілу навантаження на добовому горизонті з урахуванням тарифів, можливості експорту електроенергії, деградації установки зберігання та штрафів за недовідпуск електроенергії.

У разі розгляду багатокритеріальної постановки можливе доповнення економічної функції витрат додатковими доданками, що описують викиди

діоксиду вуглецю або відхилення від бажаної форми графіка потужності. Тоді формується векторна цільова функція або скалярна функція зі зваженою сумою окремих критеріїв.

#### **2.5.4 Система обмежень задачі оптимального керування**

Цільова функція визначає критерій оптимальності. Разом із тим розв'язок задачі повинен задовольняти систему обмежень, які відображають фізичні закони та технічні вимоги до роботи елементів гібридної системи.

##### **Баланс активної потужності.**

Рівняння балансу активної потужності для кожного інтервалу часу задається виразом

$$P_c(k) + P_z(k) + P_m(k) - P_{н,ф}(k) - P_{вт}(k) = 0,$$

де

$$P_{н,ф}(k) = P_n(k) - P_{відм}(k).$$

Це рівняння забезпечує дотримання енергетичного балансу на кожному часовому кроці. У випадку, коли недовідпуск електроенергії не допускається, змінна  $P_{відм}(k)$  фіксується як нульова.

##### **Обмеження для сонячної електричної станції.**

Активна потужність сонячної електричної станції обмежена доступною потужністю і встановленою потужністю перетворювача:

$$0 \leq P_c(k) \leq \hat{P}_c(k),$$

$$0 \leq P_c(k) \leq P_c^{\max}.$$

У багатьох постановках передбачається, що система керування завжди намагається використовувати доступну сонячну генерацію, якщо цьому не заважають інші обмеження, наприклад обмеження на потужність обміну з мережею.

### Обмеження для установки зберігання електроенергії.

Активна потужність установки зберігання підпорядковується обмеженням

$$P_3^{\min} \leq P_3(k) \leq P_3^{\max}.$$

Динаміка накопиченої енергії описується рівнянням

$$E(k+1) = E(k) + \eta_{\text{зар}} P_3^-(k) \Delta t - \frac{1}{\eta_{\text{роз}}} P_3^+(k) \Delta t,$$

де коефіцієнти корисної дії заряджання та розряджання задаються наперед.

Стан заряду установки зберігання має бути в межах допустимого діапазону:

$$E^{\min} \leq E(k) \leq E^{\max}.$$

За потреби можуть вводитися додаткові обмеження на швидкість зміни потужності установки зберігання:

$$|P_3(k+1) - P_3(k)| \leq R_{\text{макс}},$$

де  $R_{\text{макс}}$  є максимально допустимою швидкістю зміни потужності. Такі обмеження враховуються в працях, де аналізується вплив режимів роботи на ресурс силових перетворювачів та акумуляторів.

### Обмеження для приєднання до електричної мережі.

Потужність обміну з електричною мережею обмежена пропускною здатністю лінії та договірною максимальною потужністю:

$$P_M^{\min} \leq P_M(k) \leq P_M^{\max}.$$

У окремих постановках додатково вводяться обмеження на сумарну енергію, яку дозволено експортувати або імпортувати за добу, а також на зміну потужності між сусідніми інтервалами, що пов'язано з вимогами оператора мережі до профілю навантаження.

### Обмеження на недовідпуск електроенергії навантаженню.

Змінна  $P_{\text{відм}}(k)$  повинна задовольняти нерівності

$$0 \leq P_{\text{відм}}(k) \leq P_H(k).$$

Якщо система має забезпечувати повне покриття навантаження, то для всіх інтервалів виконується умова

$$P_{\text{відм}}(k) = 0.$$

У задачах, де допускається частковий недовідпуск навантаженню, змінна  $P_{\text{відм}}(k)$  залишається змінною керування, а штрафний коефіцієнт  $C_{\text{відм}}$  вибирається достатньо великим, щоб стимулювати мінімізацію цієї величини.

### **Початкові та кінцеві умови.**

Для завершення постановки задачі необхідно задати початковий стан установки зберігання:

$$E(0) = E_{\text{поч.}}$$

У багатьох добових задачах оптимізації накладається також вимога на кінцевий стан:

$$E(N) = E_{\text{кін.}}$$

або м'яке обмеження у вигляді

$$E_{\text{мін,доб}} \leq E(N) \leq E_{\text{макс,доб}}$$

Вимога однакового або близького до початкового стану заряду наприкінці горизонту планування запобігає перенесенню витрат на наступні доби та забезпечує порівнюваність результатів між різними сценаріями.

### **Формулювання задачі оптимального керування у вигляді математичної програми.**

Узагальнюючи наведені співвідношення, базова задача оптимального керування режимами роботи гібридної системи може бути подана у вигляді задачі математичного програмування.

Необхідно мінімізувати функцію витрат

$$\min J \left( P_c(\cdot), P_3(\cdot), P_M(\cdot), P_{\text{відм}}(\cdot), E(\cdot) \right),$$

де функція  $J$  задається виразом.

Змінні задачі:

$$P_c(k), P_3(k), P_M(k), P_{\text{відм}}(k), E(k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1.$$

Система обмежень включає:

- рівняння балансу активної потужності для всіх  $k$ ;
- обмеження для сонячної електричної станції;
- обмеження для установки зберігання;
- обмеження на потужність обміну з електричною мережею;

- обмеження для недовідпуску навантаженню;
- початкові та кінцеві умови.

За своєю структурою така задача найчастіше є задачею лінійного або кусочно-лінійного програмування, якщо припустити сталі значення коефіцієнтів корисної дії та лінійну залежність витрат від потоків потужності. Це дозволяє застосовувати ефективні методи розв'язання, зокрема методи симплексного типу та внутрішньоточкові методи. У багатьох роботах для розв'язання задач такого класу застосовують змішане цілочислове лінійне програмування, оскільки додаються двійкові змінні, які відображають режими вмикання та вимикання обладнання або дискретні рівні навантаження.

Коли до моделі включаються нелінійні залежності, наприклад нелінійна модель витрат або залежність коефіцієнтів корисної дії від потужності, задача перетворюється на задачу нелінійного програмування. У такому випадку застосовують методи нелінійного програмування та метаевристичні алгоритми, такі як алгоритм рою частинок, генетичні алгоритми, методи рою бджіл та інші.

### **2.5.5 Розширені постановки задачі оптимального керування**

Базова постановка задачі оптимального керування може бути розширена з урахуванням додаткових аспектів функціонування гібридної системи.

#### **Багатокритеріальна оптимізація.**

У низці досліджень одночасно враховуються економічні, екологічні та технічні показники. У такому випадку формулюється векторна цільова функція

$$\min(J_1, J_2, \dots, J_r),$$

де окремі компоненти можуть описувати витрати, викиди діоксиду вуглецю, кількість циклів установки зберігання, ступінь задоволення попиту, експлуатаційні втрати та інші показники. Задача може розв'язуватися через формування зваженої суми критеріїв або через пошук множини Парето-оптимальних рішень.

#### **Стохастичні та робастні постановки.**

Прогноз сонячної генерації та навантаження завжди містить невизначеність. Тому все ширше застосовуються стохастичні постановки, у яких змінні розглядаються для множини можливих сценаріїв, а цільова функція включає математичне сподівання витрат та додаткові показники ризику. Робастні постановки спрямовані на знаходження рішень, які є прийнятними для найгірших реалізацій невизначених параметрів у заданих межах.

### **Ієрархічне керування та взаємодія з короткостроковими регуляторами.**

Добова задача оптимального керування, як правило, є верхнім рівнем ієрархічної структури керування. Обчислені профілі потужності виступають уставками для системи короткострокового керування, яка працює у масштабі хвилин та секунд. У сучасних роботах дедалі ширше застосовуються підходи прогнозного керування, де задача оптимізації розв'язується послідовно на ковзному горизонті.

## **2.6 Опис та порівняння розглянутих методів керування установкою зберігання енергії**

У роботі аналізуються три режими експлуатації системи накопичення енергії, які відрізняються методами її заряджання та стратегіями управління енергетичними потоками. Кожен режим спрямований на підвищення ефективності використання власної сонячної електростанції, зменшення пікових навантажень та оптимізацію витрат на електричну енергію.

### **2.6.1 Використання УЗЕ для заряджання від надлишкової генерації СЕС**

У цьому режимі установка зберігання енергії працює за принципом пріоритету власного споживання від СЕС. Спочатку вся потужність сонячної електростанції спрямовується на покриття поточного навантаження об'єкта. Лише тоді, коли миттєва генерація СЕС перевищує споживання, різниця між

ними вважається надлишковою енергією і використовується для заряджання УЗЕ.

Система керування (EMS) або енергетичний контролер порівнює значення генерації та споживання. Якщо генерація менша або дорівнює навантаженню, УЗЕ залишається в режимі очікування — вся енергія СЕС іде на споживача, а дефіцит (якщо є) покривається з мережі. Якщо ж генерація перевищує споживання, система вважає різницю надлишком і подає команду на заряджання УЗЕ на цю величину (або з урахуванням технічних обмежень по потужності й SOC).

Типовий алгоритм виглядає так:

$$P_{\text{надлишок}} = P_{\text{СЕС}} - P_{\text{навантаження}}$$

Якщо  $P_{\text{надлишок}} > 0$ , то УЗЕ переводиться в режим заряджання з потужністю не більше ніж:

$$P_{\text{заряд}} = \min(P_{\text{надлишок}}, P_{\text{макс.зар}}, P_{\text{SOC-обмеження}})$$

Якщо  $P_{\text{надлишок}} \leq 0$ , то УЗЕ не заряджається, може бути в режимі очікування або розряджання.

У роботі з комерційними та промисловими споживачами цей режим має чітку та економічно обґрунтовану логіку. За відсутності установки зберігання енергії надлишкова генерація сонячної електростанції часто обмежується інвертором або передається в електричну мережу за низькою ціною, що не забезпечує суттєвого фінансового ефекту для споживача. За наявності УЗЕ ця ж надлишкова енергія акумулюється та використовується пізніше – у вечірні години, у періоди підвищеного навантаження або за умов дії дорогих тарифів на електроенергію.

У результаті застосування такого режиму підвищується частка електроенергії, виробленої СЕС, яка споживається безпосередньо на об'єкті, що зменшує залежність від мережі в пікові години та скорочує обсяги споживання електроенергії. Це, своєю чергою, призводить до зниження загальних витрат на електропостачання, особливо в умовах значної різниці між денними або піковими та базовими тарифами. Для об'єктів, які не мають доступу до вигідного

«зеленого тарифу» або фіксованої високої ціни продажу електроенергії в мережу, такий режим є особливо доцільним, оскільки з економічної точки зору значно вигідніше зберігати надлишкову енергію та використовувати її для власних потреб, ніж передавати її в мережу за не вигідних умов[33].

### **2.6.2 Використання УЗЕ для заряджання від надлишкової генерації СЕС та у нічні години**

У другому режимі експлуатації установка зберігання енергії поєднує два джерела заряджання: надлишкову генерацію власної сонячної електростанції та електричну енергію з мережі у нічні години, коли діє знижений тариф. Такий підхід дозволяє забезпечити більш повне використання ємності УЗЕ та підвищити стабільність її роботи незалежно від погодних умов і сезонності сонячної генерації.

Пріоритет у цьому режимі надається власній генерації СЕС. Аналогічно до першого режиму, у денний час система керування безперервно порівнює поточну генерацію СЕС і споживання об'єкта. У випадку, коли генерація перевищує навантаження, надлишкова енергія спрямовується на заряджання УЗЕ. Якщо ж упродовж дня обсяг сонячної генерації є недостатнім для досягнення цільового рівня заряду, система переходить до другого етапу – нічного заряджання від мережі.

Нічне заряджання здійснюється у заздалегідь визначений часовий інтервал, який відповідає мінімальним тарифам на електроенергію. У цей період УЗЕ заряджається до заданого рівня SOC, необхідного для покриття ранкового або вечірнього піку навантаження наступного дня. Потужність нічного заряджання обмежується технічними можливостями батареї, умовами приєднання до мережі та внутрішніми налаштуваннями системи керування з метою уникнення різкого зростання споживання.

З точки зору алгоритму керування, другий режим можна описати таким чином:

1. У денний час УЗЕ працює за принципом максимального використання надлишкової генерації СЕС;
2. Наприкінці доби система оцінює фактичний рівень заряду батареї;
3. Якщо SOC нижчий за встановлений цільовий рівень, активується нічне заряджання від мережі;
4. У разі досягнення цільового SOC заряджання припиняється, і УЗЕ переходить у режим очікування.

Енергетична логіка цього режиму полягає у вирівнюванні добового енергетичного балансу. Енергія, отримана з СЕС або придбана за низьким тарифом уночі, використовується у години високого споживання або підвищеної ціни на електроенергію.

З економічної точки зору цей режим є значно ефективнішим порівняно з першим, оскільки дозволяє забезпечити повне або майже повне заряджання установки зберігання енергії навіть у періоди низької сонячної активності. Завдяки поєднанню денного заряджання від сонячної електростанції та нічного заряджання від мережі з використанням знижених тарифів зменшується обсяг імпорту електроенергії в години пікових цін. Крім того, використання накопиченої енергії для покриття пікових навантажень сприяє зниженню максимальної споживаної потужності підприємства, що є особливо важливим для комерційних об'єктів із оплатою за потужність. У результаті робота енергетичної системи об'єкта стає більш прогнозованою та стабільною, а витрати на електропостачання – оптимізованими.

Водночас поєднання денного та нічного заряджання впливає на ресурс батареї. У цьому режимі кількість циклів заряд–розряд за рік зростає порівняно з використанням лише надлишкової генерації СЕС. Це вимагає більш обережного налаштування граничних значень SOC, обмеження максимальної потужності заряджання та уникнення регулярної роботи батареї у крайніх зонах заряду. Зазвичай для таких режимів встановлюють верхній і нижній робочі пороги SOC, що дозволяє зменшити темпи деградації акумуляторів.

Суттєвою перевагою другого режиму є його відносна простота реалізації. На відміну від прогнозно-оптимізаційних стратегій, він не потребує складних моделей або довгострокових прогнозів. Достатньо знати часові зони тарифів і поточний стан заряду батареї. Це робить режим привабливим для практичної реалізації на підприємствах, де головним завданням є зменшення витрат і підвищення надійності енергопостачання без суттєвого ускладнення системи керування.

Разом з тим, цей режим не завжди забезпечує максимально можливий економічний ефект, оскільки не враховує можливих змін тарифів, погодних умов або майбутнього навантаження. Тому його часто розглядають як компромісний варіант між простим режимом використання лише надлишкової генерації СЕС і більш складним прогнозно-оптимізаційним режимом керування[34].

### **2.6.3 Використання УЗЕ на основі прогнозу майбутньої генерації СЕС, цін на електроенергію та споживання**

Третій режим експлуатації установки зберігання енергії є прогнозно-орієнтованим та оптимізаційним і відрізняється від попередніх тим, що рішення щодо заряджання та розряджання приймаються не лише на основі поточних значень генерації та споживання, а з урахуванням очікуваного стану енергосистеми у майбутньому. Метою такого підходу є максимізація економічного ефекту від роботи УЗЕ при одночасному дотриманні технічних обмежень і збереженні ресурсу батареї.

У цьому режимі система керування УЗЕ використовує прогнозну інформацію на наступну добу, зокрема:

1. Прогноз генерації власної СЕС на основі метеорологічних даних;
2. Оцінка графіку споживання електроенергії підприємством на наступну добу;
3. Прогноз графіку цін на електроенергію на основі історичних даних та умов сезонності;

4. Оцінка стану заряду батареї (SOC) та її технічні обмеження на кінець доби.

На основі цих даних система керування формує оптимальний графік роботи УЗЕ, який визначає, у які години доцільно заряджати накопичувач, у які – розряджати, а коли залишати його в режимі очікування.

Типовий алгоритм у цьому режимі включає такі етапи:

1. Система отримує прогнози генерації СЕС, споживання та цін, а також актуальні параметри батареї.

Визначається цільова функція:

2. мінімізація загальних витрат на електроенергію;
3. мінімізація пікової потужності;
4. поєднання економічних та технічних критеріїв.

У модель закладаються:

5. допустимі межі SOC;
6. максимальні потужності заряджання та розряджання;
7. обмеження мережевого приєднання;
8. вимоги до ресурсу батареї.

Розрахунок оптимального графіка:

9. На заданому часовому горизонті, 24 години з кроком 15 хвилин визначається оптимальний профіль роботи УЗЕ.

У процесі роботи графік може коригуватися в режимі реального часу у разі відхилення фактичних значень від прогнозних.

У межах цього режиму такі сценарії роботи:

- попереднє заряджання УЗЕ вночі, якщо прогнозується високий денний тариф і низька генерація СЕС;
- утримання вільної ємності батареї вдень, якщо очікується пік сонячної генерації;
- відкладений розряд – система не розряджається одразу після заходу сонця, а чекає періоду максимальних тарифів;

- комбіноване використання СЕС і мережі для досягнення оптимального SOC перед піковими навантаженнями.

Таким чином, УЗЕ працює не за принципом «реакції на надлишок», а як активний елемент планування енергоспоживання[32].

Прогнозно-оптимізаційний режим забезпечує найвищий потенційний економічний ефект серед усіх розглянутих сценаріїв, оскільки дає змогу максимально використовувати різницю тарифів у часі, зменшувати витрати на купівлю електроенергії в години пікових цін та оптимізувати використання власної генерації сонячної електростанції. Крім того, такий підхід дозволяє уникати небажаних піків споживаної потужності, що позитивно впливає як на вартість електропостачання, так і на стабільність роботи енергетичної системи об'єкта. Для комерційних споживачів у країнах із погодинним обліком електроенергії та динамічними тарифами цей режим є особливо актуальним, оскільки забезпечує гнучке та економічно обґрунтоване управління енергоспоживанням[35].

З одного боку, такий режим може призводити до більш інтенсивного використання установки зберігання енергії, оскільки система активно реагує на ринкові сигнали, зміну тарифів і прогнози дані. З іншого боку, саме прогнозний підхід дає змогу уникати шкідливих режимів експлуатації, зокрема регулярного перебування батареї в крайніх зонах стану заряду або надмірної кількості дрібних, неефективних циклів. Завдяки застосуванню оптимізаційних алгоритмів стає можливим свідомо обмежувати глибину розряду, уникати зайвих заряджань у несприятливі часові періоди та більш рівномірно розподіляти цикли заряджання і розряджання в часі, що позитивно впливає на довговічність акумуляторної системи.

Третій режим є найбільш інтелектуальним і перспективним варіантом використання установки зберігання енергії. Він перетворює УЗЕ з пасивного накопичувача надлишкової енергії на активний інструмент енергетичного менеджменту, здатний адаптуватися до змін генерації, споживання та ринкових умов і забезпечувати максимальний економічний результат[36][37].

## Висновки до розділу 2

У межах даного розділу було розглянуто особливості формування та використання 15-хвилинних профілів навантаження, що є стандартом для комерційних і промислових споживачів у Німеччині. Такий підхід до обліку електричної енергії дозволяє детально аналізувати добову динаміку споживання, виявляти пікові навантаження та періоди надлишкової генерації, а також створює необхідну основу для коректного моделювання роботи установки зберігання енергії. Розподіл профілів навантаження за сезонами, місяцями та типами днів забезпечує більш точне відображення реальних умов експлуатації енергетичної системи об'єкта.

Подальший аналіз показав, що впровадження установки зберігання енергії є доцільним інструментом підвищення ефективності використання власної сонячної електростанції та оптимізації енергоспоживання. Було розглянуто три режими використання УЗЕ, які відрізняються складністю керування та економічним ефектом. Базовий режим, що передбачає заряджання виключно від надлишкової генерації СЕС, дозволяє підвищити коефіцієнт самоспоживання та зменшити обмеження генерації, однак його ефективність істотно залежить від погодних умов і сезонності. Поєднання заряджання від СЕС із нічним заряджанням від мережі забезпечує більшу стабільність роботи УЗЕ та зменшує імпорт електроенергії в години пікових тарифів, водночас залишаючись відносно простим з точки зору реалізації.

Найвищий потенціал економічної ефективності продемонстрував прогнозно-оптимізаційний режим, у якому робота УЗЕ визначається з урахуванням прогнозу генерації СЕС, споживання та цін на електроенергію. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати витрати на електропостачання та знизити пікову потужність, але й більш раціонально використовувати ресурс акумуляторної системи. Попри вищу складність реалізації, цей режим перетворює установку зберігання енергії на активний елемент енергетичного

менеджменту підприємства, що особливо актуально для комерційних і промислових об'єктів у умовах погодинного обліку та динамічних тарифів[38].

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ З УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

#### **3.1 Вихідні дані для моделювання та характеристика досліджуваних промислових підприємств**

Вихідні дані для моделювання є ключовою складовою побудови адекватної моделі гібридної системи енергозабезпечення промислового підприємства. Саме якість, повнота та репрезентативність цих даних визначають достовірність подальших висновків щодо доцільності впровадження сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії, а також точність оцінювання техніко економічних показників. У цьому підрозділі наведено характеристику досліджуваних промислових підприємств, описано прийняті припущення щодо геометричних параметрів їх інфраструктури, структури електричного навантаження, а також основних параметрів установки зберігання електроенергії, які використовуються як вихідна інформаційна база для подальшого моделювання[39].

##### **3.1.1 Загальна характеристика досліджуваних об'єктів**

Для дослідження обрано два типові промислові підприємства, які на момент початку аналізу не мають встановлених відновлюваних джерел енергії та установок зберігання електроенергії. Такий вибір дозволяє оцінити потенціал впровадження гібридної системи енергозабезпечення на базі сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії у ситуації, що відповідає поточному стану значної частини промислових споживачів.

Перше підприємство має загальну площу забудови 160 000 м<sup>2</sup> і за своїми розмірами може бути віднесене до групи середніх виробничих комплексів із розвиненою інженерною інфраструктурою. Друге підприємство має площу 370 000 м<sup>2</sup>, що відповідає великому промислому майданчику з кількома виробничими корпусами, будівлями складського та допоміжного призначення,

власними об'єктами енергетичного та транспортного забезпечення. Така пара об'єктів дозволяє порівняти ефект від впровадження гібридної системи в умовах різного масштабу виробництва.

Сумарне річне електроспоживання для двох підприємств становить 71 573 805 кВт·год. За прийнятих площ забудови це відповідає характерному рівню енергоспоживання для підприємств машинобудівного або металургійного профілю з безперервним або наближеним до безперервного виробничим циклом. Подібні значення річного споживання електроенергії фіксуються у прикладних дослідженнях промислових енергосистем, де для окремих майданчиків наводяться діапазони від кількох до десятків гігават годин на рік залежно від технологічної структури та рівня завантаження виробництва. Це підтверджує репрезентативність обраних об'єктів для аналізу впровадження гібридних систем енергозабезпечення.

У подальшому моделюванні приймається, що кожне з підприємств працює протягом року без тривалих планових зупинок, а можливі короткочасні технологічні перерви враховуються у часових графіках електричного навантаження. Такий підхід дозволяє сформувати безперервні часові ряди навантаження на розрахунковий період тривалістю один календарний рік.

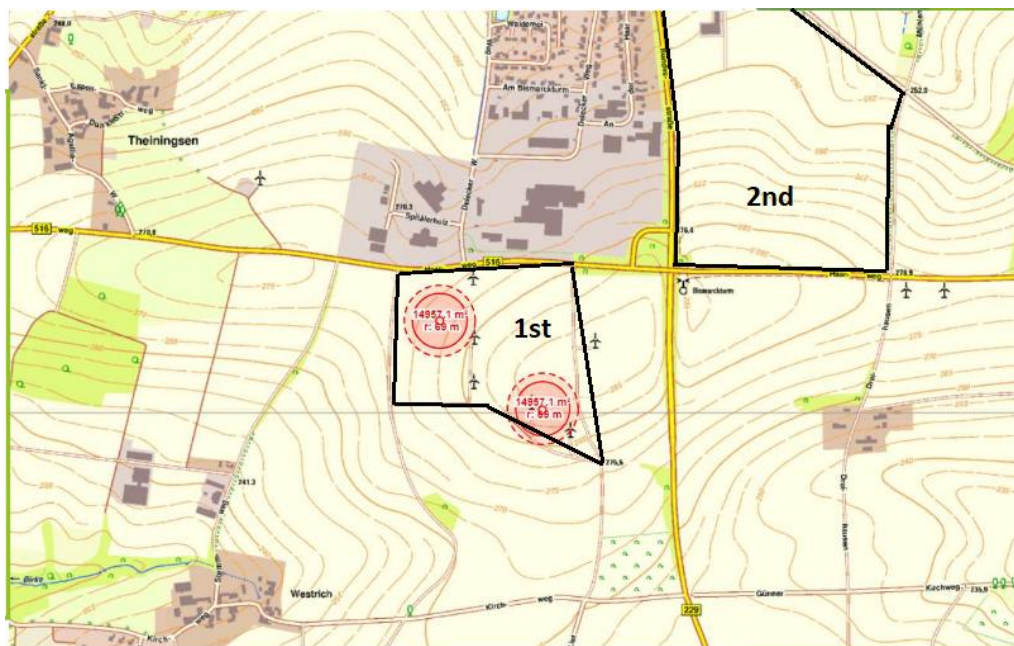


Рисунок 3.1 – Розташування комерційної зони в Гохзауерланд, Північний Рейн-Вестфалія, Німеччина

### **3.1.2 Використання площі промислових підприємств для розміщення сонячної електричної станції**

Одним з ключових вихідних параметрів моделювання є доступна площа для розміщення сонячних фотомодулів. У дисертаційній роботі прийнято припущення, що орієнтовно 40 % загальної площі території промислового підприємства може бути використано для встановлення сонячної електричної станції. Такий підхід відповідає практиці оцінювання потенціалу промислових майданчиків для інтеграції сонячних електричних станцій, коли з усього наявного фонду дахових та наземних площ певна частина виключається через затінення, необхідність збереження технологічних проїздів, вимоги до експлуатаційного доступу, протипожежні розриви та інші інженерні обмеження.

Для підприємства з площею забудови 160 000 м<sup>2</sup> доступна площа для розміщення фотомодулів становить близько 64 000 м<sup>2</sup>. Для підприємства з площею 370 000 м<sup>2</sup> відповідна площа становить близько 148 000 м<sup>2</sup>. У розрахунках виходять з того, що зазначена площа може бути використана як у вигляді дахових сонячних установок, так і у вигляді наземних масивів на вільних ділянках території за умови дотримання вимог щодо затінення, орієнтації площин фотомодулів та кутів їх нахилу.

Числові значення частки використаної площі знаходяться в межах, які наводяться у публікаціях щодо потенціалу дахових сонячних електричних станцій. У ряді досліджень показано, що після врахування затінення, експлуатаційних зазорів, зон для обслуговування, а також площ під інженерні надбудови придатною для розміщення фотомодулів стає від приблизно однієї третини до двох третин доступної площі дахів залежно від типу будівель, конфігурації дахів, щільності забудови та кліматичних умов. Прийняте у цій роботі значення 40 % відповідає поміркованому консервативному сценарію для промислової забудови і забезпечує достатній запас на випадок додаткових геометричних та технологічних обмежень.

На основі визначеної доступної площі у подальшому моделюванні формується встановлена потужність сонячної електричної станції.

Використовуються типові значення питомої встановленої потужності на одиницю площі для сучасних кремнієвих фотомодулів, що дозволяє визначити діапазон можливих потужностей сонячної електричної станції для кожного підприємства і сформуванати набір варіантів гібридної системи для аналізу.

### **3.1.3 Електричне навантаження та графіки споживання електроенергії**

Коректне відтворення режимів роботи гібридної системи енергозабезпечення потребує детального опису часової змінності електричного навантаження промислових підприємств. У роботі використано типовий підхід, який ґрунтується на представленні навантаження у вигляді детальних часових графіків споживання електроенергії з рівномірним кроком дискретизації. На кожному проміжку часу задається середнє значення активної потужності навантаження за відповідний інтервал.

Такі часові графіки дозволяють відтворити добову динаміку навантаження, включаючи ранкові та вечірні пікові значення, денні інтервали підвищеного споживання, нічні мінімальні значення, а також короткочасні коливання, пов'язані з увімкненням і вимкненням великогабаритного технологічного обладнання. На основі цих графіків виконується агрегування значень для розрахунку річного споживання електроенергії, що має збігатися із заданим сумарним значенням 71 573 805 кВт·год у межах прийнятої похибки.

Формування часових профілів навантаження здійснювалося з урахуванням характерних особливостей виробничого процесу: періодів зміни змін, технологічних пауз, сезонних змін споживання, відмінностей між робочими та вихідними днями. За відсутності повних вимірювань для окремих діб застосовувалися моделі прогнозування навантаження, що враховують календарні чинники, тип діб, температурні умови та результати кластерного аналізу історичних даних. Отримані часові ряди надалі використовуються як вхідні дані для розрахунків енергетичних балансів, режимів роботи сонячної

електричної станції та установки зберігання електроенергії, а також для оцінювання економічних показників гібридної системи[40].

Окрему увагу приділено узгодженню часової структури навантаження із потенційними ринковими умовами. Це дає змогу у подальшому аналізі розглядати сценарії, в яких гібридна система реагує на зміну цінових сигналів, а також оцінювати вплив установки зберігання електроенергії на згладжування короточасних коливань навантаження та обміну потужністю з електричною мережею.

### **3.1.4 Параметри установки зберігання електроенергії**

Установка зберігання електроенергії розглядається як ключовий елемент гібридної системи, що забезпечує можливість перерозподілу споживання електроенергії у часі, зрізання піків навантаження, збільшення частки використання сонячної генерації на власні потреби та підвищення надійності електроживлення промислових споживачів. Для моделювання прийнято установку зберігання електроенергії з енергетичною ємністю 80 МВт·год та встановленою активною потужністю 30 МВт.

Таке співвідношення між ємністю та потужністю забезпечує можливість роботи установки зберігання електроенергії у режимах, що поєднують здатність ефективно згладжувати пікові навантаження з можливістю реалізації стратегій перерозподілу споживання між різними періодами доби. За таких параметрів установка зберігання електроенергії може виконувати як функції короточасного згладжування коливань навантаження, так і функції більш тривалого резервування електроенергії, що відповідає сучасній практиці використання промислових літій йонних систем для промислових та мережевих застосувань.

Установка зберігання електроенергії моделюється як модульна система, реалізована у вигляді стандартних контейнерних блоків, кожен з яких має енергетичну ємність близько 1 МВт·год. Модулі розміщуються у сорокафутових контейнерах, де зосереджені акумуляторні шафи, силові перетворювачі, системи керування, а також системи теплового режиму та допоміжного забезпечення.

Така конфігурація відповідає сучасним промисловим рішенням, у яких контейнеризовані системи зберігання електроенергії мають типову ємність від одиниць до кількох мегават годин на один контейнер і можуть масштабуватися до десятків мегават годин для одного майданчика.

Модульна структура установки зберігання електроенергії забезпечує високу гнучкість під час проєктування та експлуатації. У разі необхідності сумарна ємність та потужність системи може бути збільшена шляхом встановлення додаткових контейнерних модулів без істотної модернізації силової інфраструктури підприємства. Це дозволяє адаптувати гібридну систему до зміни виробничих потреб, до зростання частки електрифікованих технологічних процесів, а також до зміни тарифної політики на роздрібному або оптовому ринку електроенергії.

У моделі установки зберігання електроенергії також задаються технічні параметри, характерні для сучасних промислових акумуляторних систем. До таких параметрів належать граничні значення стану заряду, максимальні потужності заряджання та розряджання, коефіцієнти корисної дії для режимів заряджання і розряджання, допустима кількість еквівалентних циклів протягом строку служби. Ці дані необхідні для оцінювання впливу різних стратегій керування на довговічність установки зберігання та для врахування умовної вартості деградації у техніко економічних показниках гібридної системи.

Сформований набір вихідних даних включає геометричні параметри промислових майданчиків, часові ряди електричного навантаження, початкові припущення щодо встановленої потужності сонячної електричної станції, а також параметри установки зберігання електроенергії. На основі цієї інформації готується вхідний масив даних для програмного середовища детального техніко економічного моделювання, у якому виконується розрахунок річної генерації сонячної електричної станції, режимів роботи установки зберігання електроенергії, обміну потужністю з електричною мережею та показників ефективності гібридної системи.

У зазначеному середовищі поєднується модель енергетичних потоків, що враховує метеорологічні дані, геометрію розміщення фотомодулів, характеристики обладнання, з моделлю фінансових потоків, яка описує структуру інвестиційних витрат, експлуатаційних витрат та грошових потоків протягом строку служби проєкту. Для цього виконується узгодження форматів часових рядів навантаження та сонячної генерації, тарифних графіків, а також початкових умов для установки зберігання електроенергії.

У результаті сформовано комплексну базу вихідних даних, яка повністю визначає розрахункові сценарії для подальшого моделювання. На її основі в наступних підрозділах буде проведено моделювання різних варіантів конфігурації гібридної системи енергозабезпечення, сценаріїв роботи промислових підприємств та аналіз впливу впровадження сонячної електричної станції й установки зберігання електроенергії на енергетичні та економічні показники досліджуваних об'єктів.

### **3.2 Моделювання сонячної електричної станції у середовищі System Advisor Model**

Моделювання сонячної електричної станції у складі гібридної системи енергозабезпечення промислових підприємств виконувалося із використанням програмного середовища System Advisor Model, розробленого Національною лабораторією відновлюваної енергетики Сполучених Штатів Америки. System Advisor Model поєднує детальну модель енергетичної продуктивності фотоелектричних систем з моделями фінансових потоків і дає змогу оцінювати показники вартості електроенергії та експлуатаційні характеристики проєктів з відновлюваної генерації.

У цьому підрозділі розглядаються послідовні етапи налаштування моделі сонячної електричної станції для двох досліджуваних промислових підприємств, починаючи з вибору типу моделі та конфігурації проєкту і закінчуючи узгодженням результатів розрахунків з часовими рядами електричного навантаження.

### 3.2.1 Вибір типу моделі та конфігурації проєкту

На першому етапі у програмному середовищі System Advisor Model створюється новий проєкт, для якого вибирається комбінація моделі продуктивності та моделі фінансового аналізу, що відповідає промисловій сонячній електричній станції, приєднаній до електричної мережі. Для моделювання фотоелектричної частини застосовано детальну модель сонячної електричної станції, яка враховує характеристики конкретних фотомодулів, інверторів, геометрію поля та систему втрат.

Тип фінансової моделі обрано таким чином, щоб він відповідав сценарію промислового споживача, який володіє сонячною електричною станцією і використовує згенеровану електроенергію для власного споживання з можливістю відпуску надлишку до електричної мережі за умовами тарифного або договірної механізму. Це дозволяє у подальшому аналізі перейти від розрахунку енергетичних потоків до оцінювання приведеної вартості електроенергії, чистої приведеної вартості, строку окупності та інших фінансових показників.

Створення базової конфігурації проєкту в System Advisor Model супроводжується заповненням основних полів, що стосуються назви проєкту, характеристики об'єкта, а також вибору типу системи. На цьому етапі доцільно створити два окремі проєкти для підприємства з площею 160 000 м<sup>2</sup> та для підприємства з площею 370 000 м<sup>2</sup>, що дозволяє незалежно аналізувати вплив розміру майданчика та структури навантаження.

На рисунку 3.1 наведено головне вікно програмного середовища System Advisor Model (SAM) з обраним типом проєкту, у якому здійснюється налаштування вихідних даних та параметрів моделювання гібридної енергетичної системи.

The screenshot displays the SAM software interface. The main window shows a table of weather files with columns for Name, Latitude, Longitude, Time zone, Elevation, Station ID, and Source. The selected file is '51.4104\_8.59625\_51.4104\_8.59625\_nsrdb-msg-v1-0-0-tmy\_60'. Below the table, the 'Weather Data Information' section provides details for the selected file, including its path and a 'View data...' button. The 'Header Data from Weather File' section lists: Latitude (51.41 degrees), Longitude (8.58 degrees), Time zone (GMT 1), Elevation (428 m), and Time step (60 minutes). The 'Annual Averages Calculated from Weather File Data' section shows: Global horizontal (2.71 kWh/m<sup>2</sup>/day), Direct normal (beam) (2.45 kWh/m<sup>2</sup>/day), Diffuse horizontal (1.42 kWh/m<sup>2</sup>/day), Average temperature (8.4 °C), and Average wind speed (2.9 m/s). The 'Optional Data' section is currently empty. The bottom of the interface shows the 'Simulate' button and the project type 'Albedo - Sky Diffuse Model - Irradiance Data (Advanced)'.

Name	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation	Station ID	Source
phoenix_az_33.450495_-111.983688_psmv3_60_tmy...	33.45	-111.98	-7	358	78208	NSRDB
tucson_az_32.116521_-110.933042_psmv3_60_tmy	32.13	-110.94	-7	773	67345	NSRDB
51.4104_8.59625_51.4104_8.59625_nsrdb-msg-v1-0...	51.41	8.58	1	428	596045	NSRDB
ukraine_50.4506_30.5243_msg-iocd_60_2017	50.45	30.54	2	132	1664918	NSRDB
ukraine_50.4506_30.5243_msg-iocd_60_2018	50.45	30.54	2	132	1664918	NSRDB
ukraine_50.4506_30.5243_msg-iocd_60_2019	50.45	30.54	2	132	1664918	NSRDB

Parameter	Value	Unit
Latitude	51.41	degrees
Longitude	8.58	degrees
Time zone	GMT 1	
Elevation	428	m
Time step	60	minutes

Annual Averages Calculated from Weather File Data	Value	Unit
Global horizontal	2.71	kWh/m <sup>2</sup> /day
Direct normal (beam)	2.45	kWh/m <sup>2</sup> /day
Diffuse horizontal	1.42	kWh/m <sup>2</sup> /day
Average temperature	8.4	°C
Average wind speed	2.9	m/s

Рисунок 3.1 – Головне вікно програмного середовища System Advisor Model з обраним типом проєкту

### 3.2.2 Формування вхідних метеорологічних даних та вибір місцезнаходження

Другим етапом є завдання метеорологічних даних і координат місцезнаходження сонячної електричної станції. System Advisor Model використовує погодні файли, що містять річні ряди значень складових сонячної радіації, температури довкілля, швидкості вітру та інших параметрів, які впливають на продуктивність фотоелектричних систем. Погодні файли можуть базуватися на типових багаторічних даних або на даних конкретного року для вибраної метеорологічної станції.

Для досліджуваних підприємств обирається погодні файл, що відповідає географічному розташуванню промислового майданчика. Якщо у стандартній бібліотеці System Advisor Model відсутні потрібні дані, можливе завантаження погодного файлу у форматі, який підтримується програмним середовищем, з зовнішніх джерел, таких як супутникові бази даних сонячного ресурсу або вимірювальні комплекси на місці розташування об'єкта.

У вікні налаштування місцезнаходження задаються координати об'єкта, висота над рівнем моря та параметри коригування погодних даних у разі потреби. Це забезпечує узгодження моделі сонячної електричної станції з реальними кліматичними умовами, що мають визначальний вплив на виробіток електроенергії.

На рисунку 3.2 показано процес вибору погодного файлу та задання географічного місцезнаходження сонячної електричної станції для подальшого моделювання в середовищі System Advisor Model.

**Download Weather Files**

The NSRDB is a database of thousands of weather files that you can download and add to your solar resource library; Download a default typical-year (TMY) file for most long-term cash flow analyses, or choose files to download for single-year or uncertainty (P50/P90) analyses. See Help for details.

One location   
  Multiple locations   
  Advanced download

51.410376, 8.596250   
 Default TMY file   
 Download and add to library...

[For locations not covered by the NSRDB, visit the SAM website Weather Page for links to other data sources.](#)

Рисунок 3.2 - Вибір погодного файлу та географічного місцезнаходження сонячної електричної станції

### 3.2.3 Налаштування конструкції фотоелектричного поля та електричних параметрів

Наступним ключовим блоком налаштувань є опис конструкції фотоелектричного поля, вибір типу фотомодуля і інвертора, а також формування схеми електричного з'єднання. System Advisor Model містить вбудовані бази даних фотомодулів та інверторів, які базуються на незалежно верифікованих технічних характеристиках і сертифікатах випробувань.

У вкладці, присвяченій конфігурації системи, задаються такі основні параметри:

- тип встановлення фотоелектричного поля дахова система або наземна система;
- кут нахилу площини фотомодулів відносно горизонталі, що визначається з урахуванням географічної широти, характеристик даху і вимог до конструкції;
- азимутальна орієнтація поля фотомодулів, яка задається відповідно до основного напрямку освітлення з метою максимізації річної генерації;
- схема встановлення фіксована конструкція або система з відстеженням положення сонця, якщо такий варіант розглядається;
- параметри щільності розміщення модулів, зокрема співвідношення між шириною рядів і відстанями між ними, яке визначає коефіцієнт покриття площі і впливає на взаємне.

Для опису електричної конфігурації визначається кількість модулів у послідовному ланцюзі, кількість паралельних ланцюгів, кількість інверторів, а також співвідношення між сумарною встановленою потужністю за постійним струмом та номінальною потужністю інверторів за змінним струмом. Це співвідношення часто визначається як коефіцієнт відношення постійної та змінної потужностей і рекомендується у діапазоні від приблизно 1,1 до 1,3 для мережевих систем, залежно від цільової стратегії обмеження потужності і допустимого рівня втрат через зрізання пікових значень генерації.

Встановлена потужність сонячної електричної станції для кожного підприємства формується на основі доступної площі для розміщення фотомодулів, описаної у попередньому підрозділі, та обраної питомої встановленої потужності на одиницю площі. У System Advisor Model ця величина вноситься як цільовий параметр, після чого програма автоматично підбирає кількість модулів у послідовних і паралельних гілках та кількість інверторів або дає змогу користувачеві виконати такий підбір вручну.

На рисунку 3.3 наведено налаштування конфігурації фотоелектричної системи, зокрема параметри масиву, орієнтації панелей та співвідношення постійної й змінної потужності в середовищі System Advisor Model.

**AC Sizing**

Number of inverters: 13  
DC to AC ratio: 1.34

Size the system using modules per string and strings in parallel inputs below.

Estimate Subarray 1 configuration

**Sizing Summary**

Nameplate DC capacity	43,616.871 kWdc	Number of modules	82,180
Total AC capacity	32,593.522 kWac	Number of strings	2,935
Total inverter DC capacity	33,529.080 kWdc	Total module area	212,024.400 m <sup>2</sup>
Battery maximum power	29,999.897 kWdc		

System and subarray capacity and voltage ratings are at module reference conditions shown on the Module page.

**DC Sizing and Configuration**

To model a system with one array, specify properties for Subarray 1 and disable Subarrays 2, 3, and 4. To model a system with up to four subarrays connected in parallel to a single bank of inverters, for each subarray, check Enable and specify a number of strings and other properties.

Electrical Configuration	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
	(always enabled)	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable
Modules per string in subarray	28			
Strings in parallel in subarray	2,935			
Number of modules in subarray	82,180			
String Voc at reference conditions (V)	1,377.6			
String Vmp at reference conditions (V)	1,159.2			

**Multiple MPPT Inputs**

Set MPPT inputs: 1

Set MPPT inputs when Number of MPPT Inputs on the Inverter page is greater than 1.

**Tracking & Orientation**

Fixed  
 1 Axis  
 2 Axis  
 Azimuth Axis  
 Seasonal Tilt

Tilt=latitude

Tilt (deg): 30  
Azimuth (deg): 180  
Ground coverage ratio (GCR): 0.3  
Tracker rotation limit (deg): 45  
Backtracking:  Enable  
Terrain slope (deg): 0  
Terrain azimuth (deg): 0

Ground coverage ratio is used (1) to determine when a one-axis tracking system will backtrack, (2) in self-shading calculations for fixed tilt or one-axis tracking systems on the Shading page, and (3) in the total land area calculation. See Help for details.

Рисунок 3.3 – Налаштування конструкції фотоелектричної системи, орієнтації масиву та співвідношення постійної та змінної потужностей

### 3.2.4 Моделювання втрат та допоміжних елементів системи

Реальна продуктивність сонячної електричної станції завжди є меншою за розрахункову потужність модулів через наявність низки втрат, пов'язаних із забрудненням поверхні модулів, невідповідністю робочих умов стандартним умовам випробувань, електричними втратами у кабельних лініях, втратами у силових перетворювачах та допоміжних системах. System Advisor Model містить окремий блок налаштувань, який дає змогу задавати сумарні або деталізовані коефіцієнти втрат на різних етапах перетворення енергії.

У моделі сонячної електричної станції формуються такі основні групи втрат:

- оптичні втрати, пов'язані із забрудненням та старінням поверхні фотомодулів;
- втрати від невідповідності фактичної температури модуля стандартним умовам, які враховуються через температурні коефіцієнти потужності;
- електричні втрати у ланцюгах постійного струму та змінного струму, у тому числі втрати у кабельних лініях, трансформаторах та розподільчому обладнанні;
- втрати від невідповідності робочих точок окремих модулів, часткова затіненість, розкид параметрів та інші ефекти, що призводять до зниження корисної потужності;
- втрати, пов'язані з роботами систем керування і допоміжних пристроїв.

Користувач задає відповідні коефіцієнти втрат або розподіляє їх за окремими елементами системи. System Advisor Model виконує розрахунок вихідної потужності фотоелектричного поля на кожному кроці часу з урахуванням усіх заданих втрат, що дозволяє отримати реалістичний профіль генерації. У подальшому цей профіль використовується для аналізу покриття навантаження підприємств та взаємодії з установкою зберігання електроенергії.

На рисунку 3.4 показано налаштування параметрів втрат фотоелектричної системи, зокрема втрат на забруднення, у постійному та змінному струмі, а також трансформаторних втрат у програмному середовищі System Advisor Model.

**Irradiance Losses**  
Losses apply to the total solar irradiance incident on each subarray. SAM applies these losses in addition to any losses on the Shading and Snow page.

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
Monthly soiling loss	Edit values...	Edit values...	Edit values...	Edit values...
Average annual soiling loss (%)	5	5	5	5
Bifacial rear soiling (%)	0	0	0	0
Bifacial rack shading (%)	4	0	0	0

**DC Losses**  
DC losses apply to the electrical output of each subarray and account for losses not calculated by the module performance model.

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
Module mismatch (%)	2	2	2	2
Diodes and connections (%)	0.5	0.5	0.5	0.5
DC wiring (%)	2	2	2	2
Tracking error (%)	0.5	0	0	0
Nameplate (%)	1	0	0	0
Bifacial electrical mismatch (%)	0	0	0	0
DC power optimizer loss (%)	6	All four subarrays are subject to the same DC power optimizer loss.		
Total DC power loss (%)	11.517	10.174	10.174	10.174

Total DC power loss = 100% \* [ 1 - the product of ( 1 - loss/100% ) ]

**Default DC Losses**  
Apply default losses to replace DC losses for all subarrays with default values.

Apply default losses for:  Central inverters  Microinverters  DC optimizers

**AC Losses**  
AC losses apply to the electrical output of the inverter and account for losses not calculated by the inverter performance model.

AC wiring  % of AC output

**Subhourly Clipping Loss Correction**  
Clipping correction accounts for inverter power limiting that may occur within the hour on partly cloudy days (hourly simulations only).

Enable subhourly clipping loss correction

Matrix lookup method  
 Distribution of PV output method

**Transformer Losses**  
The transformer loss model is intended for distribution or substation transformers in large PV systems. Losses apply to the electrical output of the inverter and assume a power factor of 1. The transformer capacity is equal to the total inverter AC power rating.

Transformer no load loss  % of inverter AC capacity

Transformer load loss  % of AC output

Рисунок 3.4 – Налаштування параметрів витрат сонячної електричної станції

### 3.2.5 Імпорт часових профілів навантаження та узгодження з моделлю сонячної електричної станції

Для аналізу роботи сонячної електричної станції у взаємодії з промисловими підприємствами необхідно узгодити профіль генерації з часовими рядами електричного навантаження. System Advisor Model підтримує можливість імпорту профілів навантаження споживача у вигляді таблиць з рівномірним кроком дискретизації протягом року. Це дає можливість

моделювати взаємодію генерації сонячної електричної станції з фактичним споживанням електроенергії.

На цьому етапі завантажуються сформовані у попередньому підрозділі часові ряди навантаження для обох підприємств. У вікні налаштування споживання електроенергії виконується прив'язка цих рядів до відповідних тарифних зон, робочих та вихідних днів, а також задається профіль коригування у разі сезонних змін навантаження. В результаті System Advisor Model має одночасно профіль генерації сонячної електричної станції та профіль споживання електроенергії, що дозволяє розрахувати величину безпосередньо спожитої сонячної електроенергії на підприємстві, надлишки для відпуску в мережу та необхідні обсяги закупівлі електроенергії.

На рисунку 3.5 наведено налаштування та імпорт погодинного профілю електричного навантаження промислового підприємства з відображенням місячного та річного енергоспоживання у середовищі System Advisor Model.

**Electric Load Data**

Electric load data describes the electricity usage of a building or facility for electricity bill calculations. Enter or import an hourly or subhourly load profile and use the adjustment options to scale the profile or to account for annual load growth. See Help for details.

**Hourly or Subhourly Load Profile**

Electric load power  kW ⓘ

Electric load scaling factor (optional)  ⓘ

Electric load annual growth rate  %/yr ⓘ

**Adjust Load Profile to Monthly Usage**

Scale electric load profile to monthly usage

Monthly electricity usage for scaling  kWh ⓘ

**Download**

Click Download Electric Load Data to run a macro that downloads modeled hourly load data. See Help for details.

**Monthly Load Summary**

These monthly and annual values are calculated from the hourly or subhourly load profile and shown here for reference.

	Energy (kWh)	Peak (kW)
Jan	6,673,717.75	19,560.93
Feb	6,121,446.27	19,337.23
Mar	6,420,780.13	18,851.44
Apr	5,785,511.73	17,454.59
May	5,611,075.40	16,554.60
Jun	5,402,047.26	16,232.20
Jul	5,607,846.30	15,110.88
Aug	5,433,065.57	15,518.97
Sep	5,670,213.51	16,262.75
Oct	5,857,153.92	16,941.12
Nov	6,397,580.21	19,310.27
Dec	6,593,366.96	18,576.05
Annual	71,573,805.00	19,560.93

Рисунок 3.5 – Налаштування та імпорт профілю електричного навантаження промислового підприємства

### **3.2.6 Розрахунок енергетичних показників та підготовка даних для інтеграції з моделлю установки зберігання електроенергії**

Після завершення налаштування конфігурації сонячної електричної станції, параметрів втрат, погодних даних та профілів навантаження запускається розрахунок моделі. System Advisor Model виконує покроковий розрахунок вихідної потужності сонячної електричної станції, енергії, що передається у вузол приєднання до мережі, а також формує річні та місячні підсумки виробітку, коефіцієнтів використання встановленої потужності, частки покриття власного навантаження, обсягів експорту та імпорту електроенергії.

Результати розрахунків доступні у вигляді таблиць, графіків та підсумкових звітів. Особливий інтерес для подальшого дослідження становлять:

- покрокові часові ряди вихідної потужності сонячної електричної станції;
- погодинні або агреговані добові профілі генерації;
- місячні та річні підсумки виробітку електроенергії;
- показники втрат та коефіцієнти використання встановленої потужності.

Ці дані надалі використовуються для побудови спільної моделі гібридної системи з установкою зберігання електроенергії, де профіль генерації сонячної електричної станції виступає одним із вхідних потоків у балансі активної потужності. На основі результатів System Advisor Model формуються сценарії роботи гібридної системи, які відрізняються встановленою потужністю сонячної електричної станції, часткою покриття навантаження та стратегіями використання установки зберігання електроенергії.

На рисунку 3.6 наведено приклад вікна з результатами моделювання виробітку сонячної електричної станції з відображенням добових профілів генерації для кожного місяця та узагальненого річного профілю.

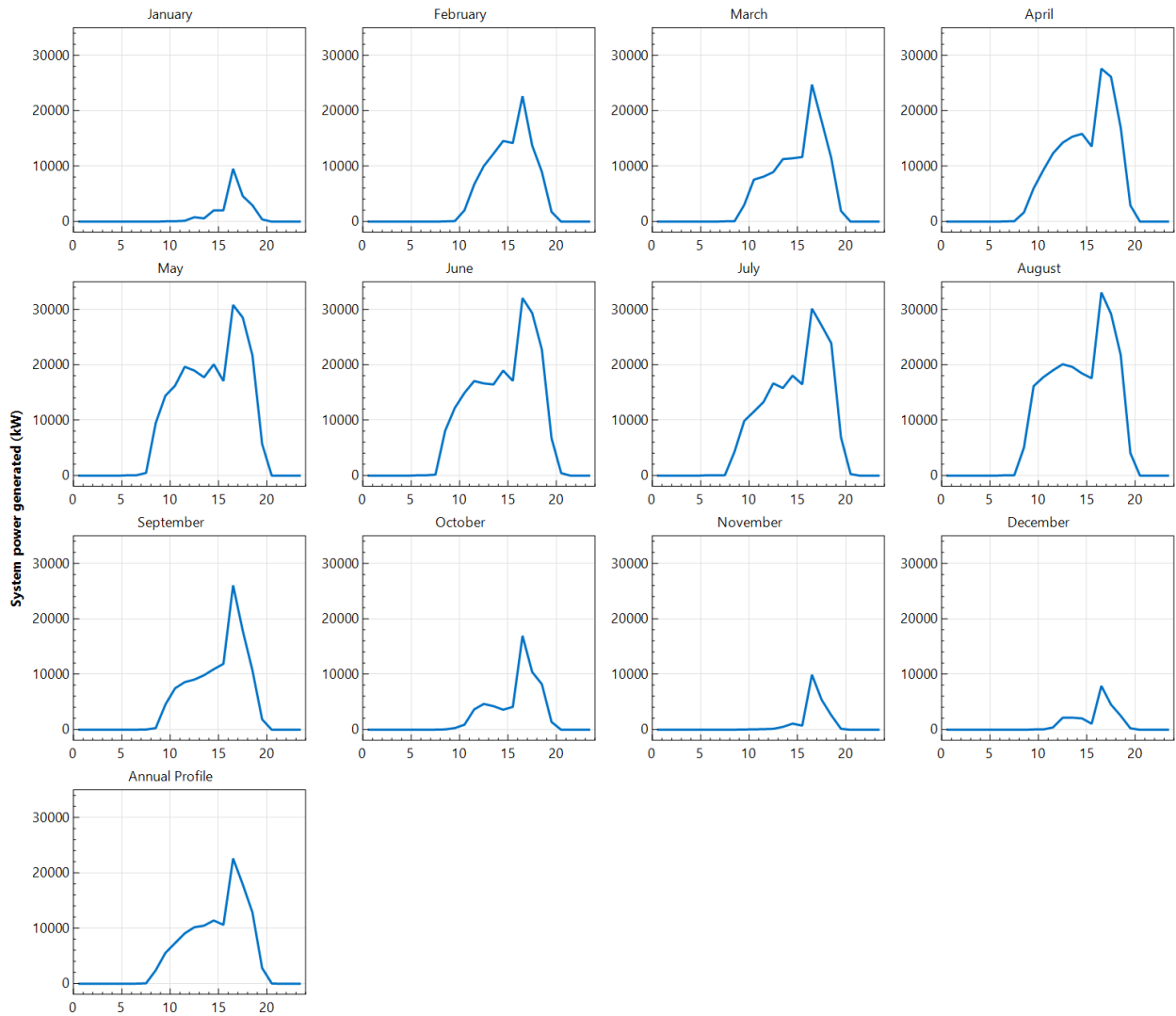


Рисунок 3.6 – Приклад вікна з результатами розрахунку виробітку сонячної електричної станції

Таким чином, у цьому підрозділі наведено детальний опис етапів моделювання сонячної електричної станції у програмному середовищі System Advisor Model для двох промислових підприємств з різною площею та структурою навантаження. Одержані результати є основою для подальшого моделювання гібридної системи енергозабезпечення з установкою зберігання електроенергії та для оцінювання техніко економічної ефективності запропонованих варіантів її впровадження.

### **3.3 Моделювання установки зберігання електроенергії та алгоритмів її диспетчеризації в складі гібридної системи**

Моделювання установки зберігання електроенергії у складі гібридної системи енергозабезпечення промислових підприємств виконувалося із використанням програмного середовища System Advisor Model. У цьому середовищі реалізовано інтегровану модель акумуляторної установки, яка поєднує детальний опис електрохімічної батареї, модульні параметри системи зберігання, алгоритми диспетчеризації та моделі довговічності, узгоджені з техніко економічним аналізом проєкту.

Для задачі, що розглядається, установка зберігання електроенергії інтегрується з детальною моделлю сонячної електричної станції як єдина система «сонячна електрична станція плюс установка зберігання електроенергії», яка працює у режимі промислового споживача, що приєднаний до електричної мережі. Така конфігурація відповідає варіанту розташування установки зберігання електроенергії за обліковим приладом споживача, коли метою є мінімізація витрат на електроенергію та підвищення рівня самозабезпечення власною генерацією.

#### **3.3.1 Вибір конфігурації моделі установки зберігання електроенергії**

На першому етапі моделювання в System Advisor Model до вже створеного проєкту сонячної електричної станції додається модуль установки зберігання електроенергії. Для цього у конфігурації обирається відповідний варіант комбінованої системи, у якому батарейна установка інтегрується з детальною моделлю сонячної електричної станції. Це дає змогу розглядати генерацію та накопичення енергії як взаємопов'язані процеси.

У вікні налаштувань установки зберігання електроенергії активується модель батарейної системи для застосування за обліковим приладом промислового споживача. System Advisor Model у цьому випадку розглядає установку зберігання електроенергії як засіб зниження витрат підприємства на

електроенергію за рахунок зменшення пікового споживання, підвищення частки власного споживання сонячної генерації та, за потреби, участі у цінових сигналах тарифної структури.

На рисунку 3.7 показано вибір моделі «сонячна електрична станція – установка зберігання енергії» та фінансової конфігурації комерційного споживача в програмному середовищі System Advisor Model.

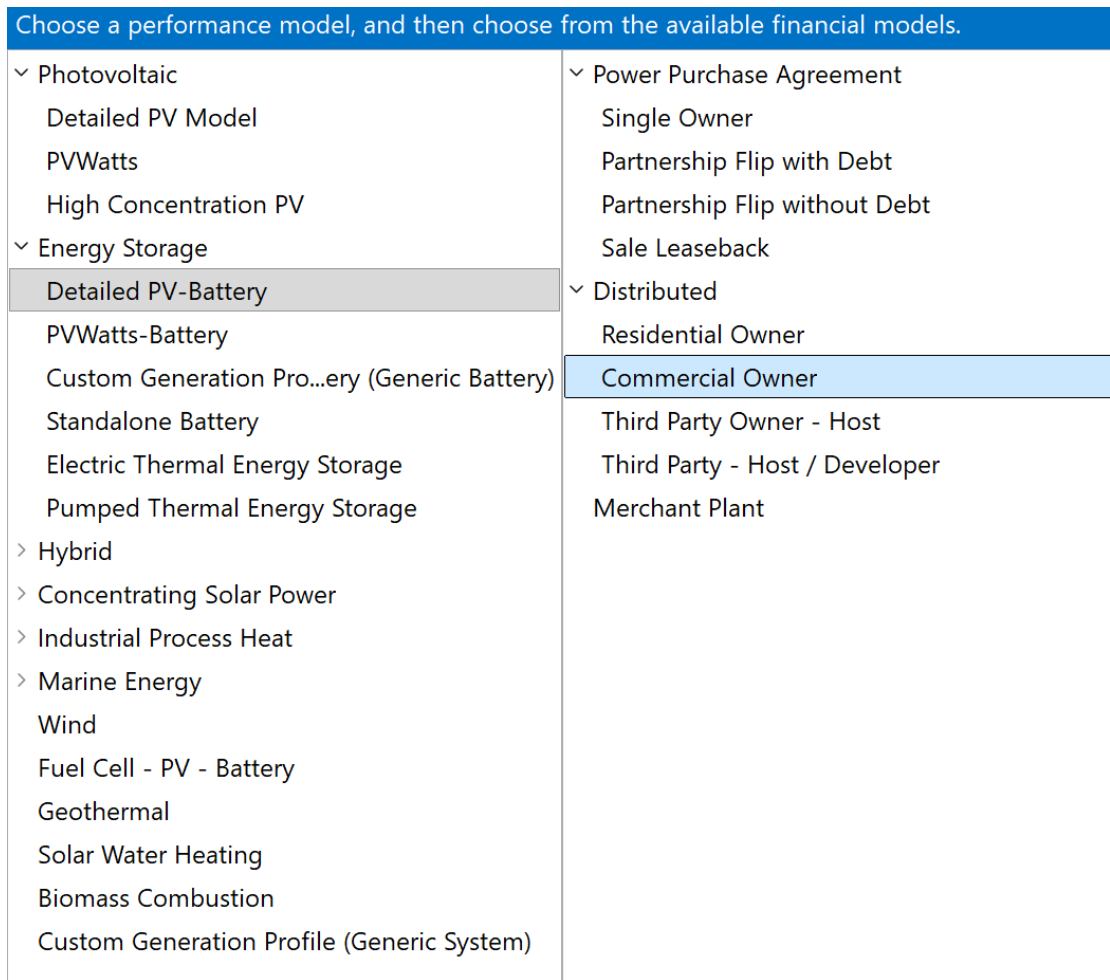


Рисунок 3.7 – Активування модуля установки зберігання електроенергії та вибір конфігурації «сонячна електрична станція плюс установка зберігання»

### 3.3.2 Задання параметрів УЗЕ

Основні технічні параметри установки зберігання електроенергії задаються на сторінці налаштувань батарейних елементів та системи. System Advisor Model використовує фізично обґрунтовані моделі електрохімічних

батареї, у яких окремо описуються характеристики елемента та його інтеграція у модульну систему зберігання.

У моделі задаються такі групи параметрів:

- тип хімічної системи батареї, номінальна напруга елемента, номінальна ємність, криві напруга–заряд та напруга–розряд;
- конфігурація з'єднання елементів у модулях і шафах, що визначає сумарну енергетичну ємність системи зберігання і максимальну потужність;
- граничні значення стану заряду, які визначають допустимий діапазон глибини розряду, що використовується для розрахунку режимів роботи та оцінювання довговічності;
- коефіцієнти корисної дії заряджання та розряджання, внутрішній опір, а також параметри саморозряду;
- параметри теплової моделі, якщо у розрахунках враховується вплив температури на поведінку батареї.

У нашій задачі сумарна енергетична ємність установки зберігання електроенергії становить 80 МВт·год, а встановлена активна потужність 30 МВт. Ці величини задаються як цільові параметри системи, після чого у System Advisor Model уточнюється кількість модульних батарейних блоків, що формують загальну ємність, та номінальні значення потужності. Конфігурація модулів узгоджується з прийнятим контейнерним виконанням, у якому кожний контейнер відповідає певній ємності, а сумарна система складається з масиву таких контейнерів[41].

На рисунку 3.8 наведено налаштування параметрів батарейних елементів та модульної установки зберігання електроенергії, зокрема потужності, енергоємності та електричних характеристик у середовищі System Advisor Model.

**Chemistry**

Battery type: Lithium Ion: Lithium Iron Phosphate (LFP/Graphite)

---

**Optimal Sizing and Dispatch from REopt**

The REopt API web service automatically sizes the battery bank and calculates a time series dispatch schedule. Click Get Size and Dispatch to run a simulation, send data from SAM to the service, run a REopt optimization on the service, and choose whether to modify SAM battery size and dispatch inputs with results from the REopt run. You can also choose whether to size the battery to maintain power during a grid outage. See Help for details.

Consider grid outage in REopt optimization

---

**Battery Bank Sizing**

Specify desired values for the nominal bank capacity and power for SAM to calculate the number of cells and strings, or specify the number of cells and strings yourself. Verify the battery size under Current and Capacity below.

Set desired bank size  
 Specify cells

Desired bank power: 30,000.000 kW  DC units  
Desired bank capacity: 80,000.000 kWh  AC units

Number of cells in series: 3  
Number of strings in parallel: 1

Max C-rate of charge: 0.5 per/hour  
Max C-rate of discharge: 0.5 per/hour

Bank capacity and power fields are values measured before conversion and parasitic losses. If specified in AC, the DC/AC conversion efficiency will be used to scale the battery size.

---

**Current and Capacity**

Use default nominal cell voltage and capacity for the battery chemistry if data is not available from another source. Check the computed properties to verify the battery is sized correctly.

Desired bank voltage: 500 Vdc  
Cell nominal voltage: 3.98 Vdc  
Cell capacity: 2.25 Ah

---

**Computed Properties**

Nominal bank capacity	79,999.725 kWhdc	Max C-rate of discharge	0.375 per/hour
Nominal bank power	29,999.897 kWdc	Max C-rate of charge	0.375 per/hour
Time at maximum power	2.667 h	Maximum discharge current	59,822.719 A
Nominal bank voltage	501.480 Vdc	Maximum charge current	59,822.719 A
Total number of cells	8,933,526		
Cells in series	126		
Strings in parallel	70,901		
		<b>DC</b>	<b>AC</b>
		Maximum discharge power	29,999.897 28,799.901 kW
		Maximum charge power	29,999.897 31,249.893 kW

Рисунок 3.8 – Налаштування параметрів батарейних елементів та модульної системи зберігання електроенергії

### 3.3.3 Обмеження режимів роботи та модель довговічності установки зберігання

Важливою складовою моделювання є врахування обмежень на режими роботи установки зберігання електроенергії, зокрема стану заряду, потужності заряджання та розряджання, а також частоти циклів. У System Advisor Model ці параметри задаються на сторінці обмежень заряджання та пріоритетів, а також на сторінках, присвячених моделі довговічності батареї.

Для установки зберігання електроенергії визначаються:

- мінімальний стан заряду у відсотках від доступної ємності, який обмежує глибину розряду та забезпечує збереження ресурсу;
- максимальний стан заряду, що запобігає перенаповненню батареї;
- початковий стан заряду на початку моделювання;
- максимальні значення потужності заряджання та розряджання, погоджені з номінальною потужністю силових перетворювачів і допустимим струмом батарей;
- параметр мінімального часу перебування у поточному стані, що зменшує надмірне циклування між заряджанням та розряджанням при швидких змінах навантаження або тарифів.

Модель довговічності може базуватися на поєднанні календарної деградації та деградації від циклів. У System Advisor Model реалізовані підходи, в яких втрати ємності залежать від глибини циклу та кількості циклів, а також від температури та тривалості експлуатації. У моделі задається таблиця або аналітичні залежності, що пов'язують глибину циклу з відносною втратою ємності, а також параметри календарної деградації. Це дозволяє оцінити зміну доступної енергетичної ємності установки зберігання електроенергії протягом строку служби проєкту і врахувати відповідні наслідки для техніко економічних показників[42].

На рисунку 3.9 показано налаштування обмежень стану заряду та параметрів довговічності установки зберігання електроенергії з урахуванням циклічної та календарної деградації батареї в середовищі System Advisor Model.

**Battery Bank Replacement**

Choose Replace at Specified Capacity to have SAM automatically replace the battery when the available capacity calculated by the life model reaches the level you specify. Choose Replace at Specified Schedule to force battery replacements in specific years regardless of available capacity. The battery replacement cost is on the Operating Costs page.

No replacements  
 Replace at specified capacity  
 Replace at specified schedule

Battery bank replacement threshold:  % capacity

Battery bank replacement schedule (%/year):

---

**Battery Life Options**

The battery life model determines how battery capacity decreases over time. Capacity may decrease with the number of charge and discharge cycles (cycle degradation), with age regardless of cycling (calendar degradation), or both.

Cycle and calendar degradation  
 Li-ion NMC/Graphite  
 Li-ion LMO/LTO

The best battery life option for Lithium Ion: Lithium Iron Phosphate (LFP/Graphite) (batt\_type=5) is empirical cycle and calendar degradation.

The Cycle and Calendar Degradation inputs below define battery degradation curves.

---

**Cycle and Calendar Degradation**

Use the options and tables below to define cycle degradation and calendar degradation curves. SAM automatically updates these inputs when you choose a battery type on the Battery Cell and System page. The empirical calendar degradation model is suitable for Lithium-ion batteries. See help for details.

**Cycle Degradation**

Import...	Depth-of-discharge (%)	Cycles Elapsed	Capacity (%)
Export...	100	202	97.9632
Copy	100	277	97.3904
Paste	100	371	96.6266
Rows:	100	523	95.9265
	100	666	95.2263
	100	1012	93.9533
	100	1354	92.9349
	100	1733	91.9484
	100	2052	91.0573

**Calendar Degradation**

None  
 Empirical  
 Custom

$q = 1.02 - k_{cal} * \sqrt{t}$   
 $k_{cal} = 0.00266 * \exp[-7280 * (1/T - 1/296)] * \exp[939 * (SOC/T - 1/296)]$

Рисунок 3.9 – Налаштування обмежень стану заряду та параметрів довговічності установки зберігання електроенергії

### 3.3.4 Налаштування джерел заряджання та напрямків розряджання в гібридній системі

Для коректного відтворення роботи установки зберігання електроенергії у складі гібридної системи необхідно задати правила, за якими батарейна система може заряджатися від елементів системи та розряджатися до навантаження або електричної мережі. У System Advisor Model ці налаштування формуються на сторінці параметрів установки зберігання, де задаються можливі джерела заряджання та напрямки розряджання.

Зокрема, для досліджуваної системи задаються такі варіанти:

- дозвіл заряджання від сонячної електричної станції, коли доступна потужність генерації перевищує навантаження підприємства;
- можливість заряджання від електричної мережі у години низької вартості електроенергії залежно від обраної стратегії диспетчеризації;
- заборона або дозвіл розряджання до електричної мережі в залежності від того, чи розглядається сценарій продажу електроенергії;
- пріоритет використання потужності сонячної електричної станції на покриття навантаження або заряджання установки зберігання електроенергії;
- умови, за яких батарея може заряджатися лише при надлишку сонячної генерації над навантаженням, а також умови, за яких розряджання допускається тільки тоді, коли навантаження перевищує потужність сонячної електричної станції.

Такі налаштування дозволяють узгодити модель установки зберігання електроенергії з балансом активної потужності у вузлі приєднання гібридної системи, описаним у попередньому розділі, та забезпечити коректне відтворення потоків енергії між сонячною електричною станцією, установкою зберігання, електричною мережею та навантаженням[43].

На рисунку 3.10 наведено налаштування стратегій заряджання та розряджання установки зберігання електроенергії, включно з режимами peak shaving, самоспоживання та обмеженнями стану заряду в середовищі System Advisor Model.

**Charge Limits and Priority**

Minimum state of charge  %      Initial state of charge  %  
Maximum state of charge  %      Minimum time at charge state  min

---

**Behind-the-meter (BTM) Storage Dispatch Options**

The storage dispatch options determine how and when the battery charges and discharges. Choose an option below and then set dispatch parameters as appropriate.

Peak shaving  
 Input grid power targets  
 Input battery power targets  
 Manual dispatch  
 Retail rate dispatch  
 Self-consumption

Battery can charge from grid  
 Battery can charge from system  
 Battery can charge from grid-limited system power  
 Battery can charge from clipped system power  
 Battery can discharge to grid  
 Charge from system only when system output exceeds load  
 Discharge battery only when load exceeds system output

Battery is AC-connected. Charging from clipped power is only available for DC-connected batteries. See input under Power Converters on Battery Cell and System page. See input under Power Converters on Battery Cell and System page.

---

**Peak Shaving**

Peak shaving attempts to reduce daily demand peaks based on the solar resource and load in either the previous 24-hour period or next 24-hour period.

One day look ahead (perfect)  
 One day look behind  
 Custom forecast

For the Custom Forecast option, choose a weather file in the SAM CSV format to use for the dispatch forecast instead of the weather file on the Location and Resource page.

Weather file for peak shaving forecast

---

**Load Forecast Horizon**

Perfect look ahead  
 One day look behind  
 Look ahead to custom load

For the Look Ahead to Custom Load option, provide a custom load profile to use for the dispatch forecast instead of the data on the Electric Load page.

Custom load profile   kW       Match load growth      Load forecast growth rate  %/yr  
 Enter custom load growth

Рисунок 3.10 - Налаштування джерел заряджання та напрямків розряджання установки зберігання електроенергії

### 3.3.5 Алгоритми диспетчеризації установки зберігання електроенергії за обліковим приладом

Центральною частиною моделювання установки зберігання електроенергії у System Advisor Model є вибір алгоритму диспетчеризації, який визначає моменти заряджання та розряджання батарейної системи. Для застосування за обліковим приладом реалізовано кілька варіантів алгоритмів, що орієнтовані на різні завдання: зменшення пікової потужності, мінімізацію рахунку за електроенергію, максимізацію частки власного споживання сонячної генерації, реалізацію заданих графіків потужності та інші цілі.

System Advisor Model для установки зберігання електроенергії за обліковим приладом підтримує такі основні режими диспетчеризації:

- режим зрізання пікових навантажень, за якого батарея розряджається під час максимумів споживання, зменшуючи максимальну потужність, що споживається з електричної мережі, і відповідні платіжні зобов'язання за потужність;

- режим роботи за заданими цільовими значеннями потужності з електричної мережі, коли користувач задає бажаний рівень споживання з мережі за кожен крок часу, а установка зберігання електроенергії заряджається або розряджається для наближення фактичної потужності до заданих значень;
- режим роботи за заданими цільовими значеннями потужності установки зберігання, при якому задаються часові ряди потужності заряджання та розряджання, а модель перевіряє можливість реалізації цих графіків з урахуванням обмежень стану заряду та потужності;
- режим ручної диспетчеризації за місяцями та годинами, у якому користувач формує послідовність періодів із визначеними правилами заряджання та розряджання у робочі та вихідні дні;
- режим диспетчеризації за роздрібним тарифом, орієнтований на мінімізацію енергетичної і потужнісної складових рахунку за електроенергію на основі структури тарифу;
- режим самоспоживання, за якого батарея працює таким чином, щоб мінімізувати потоки потужності між підприємством та електричною мережею, максимізуючи безпосереднє використання сонячної генерації.

Алгоритми автоматичної диспетчеризації, зокрема для зрізання пікових навантажень та мінімізації роздрібного тарифу, базуються на евристичних підходах із використанням прогнозів навантаження та генерації. Для режиму зрізання піків формується прогноз енергетичного ресурсу та навантаження на обраний горизонт, після чого розраховується цільовий профіль потужності з мережі. Установка зберігання електроенергії заряджається та розряджається таким чином, щоб за можливості тримати фактичну потужність у межах цільових значень з урахуванням обмежень стану заряду та потужності[44].

У режимі диспетчеризації за роздрібним тарифом алгоритм аналізує часову структуру тарифів на електроенергію та визначає періоди, у яких доцільно заряджати або розряджати установку зберігання електроенергії для мінімізації сукупної вартості рахунку. При цьому враховуються як енергетичні тарифи, так

і тарифи за потужність, а також обмеження на стан заряду, доступну ємність та тривалість циклів. Режим самоспоживання орієнтується переважно на зменшення потоків потужності між вузлом приєднання підприємства та електричною мережею, що приводить до максимізації частки сонячної енергії, використаної безпосередньо на підприємстві.

На рисунку 3.11 показано вибір режиму диспетчеризації установки зберігання електроенергії за обліковим приладом, який визначає правила заряджання та розряджання батареї залежно від навантаження і генерації.

**Behind-the-meter (BTM) Storage Dispatch Options**

The storage dispatch options determine how and when the battery charges and discharges. Choose an option below and then set dispatch parameters as appropriate.

<input checked="" type="radio"/> Peak shaving	<input type="checkbox"/> Battery can charge from grid	Battery is AC-connected. Charging from clipped power is only available for DC-connected batteries. See input under Power Converters on Battery Cell and System page. See input under Power Converters on Battery Cell and System page.
<input type="radio"/> Input grid power targets	<input checked="" type="checkbox"/> Battery can charge from system	
<input type="radio"/> Input battery power targets	<input type="checkbox"/> Battery can charge from grid-limited system power	
<input type="radio"/> Manual dispatch	<input type="checkbox"/> Battery can charge from clipped system power	
<input type="radio"/> Retail rate dispatch	<input type="checkbox"/> Battery can discharge to grid	
<input type="radio"/> Self-consumption	<input checked="" type="checkbox"/> Charge from system only when system output exceeds load	
	<input checked="" type="checkbox"/> Discharge battery only when load exceeds system output	

Рисунок 3.11 - Вибір режиму диспетчеризації установки зберігання електроенергії за обліковим приладом

Режим ручної диспетчеризації дозволяє реалізувати наперед задану стратегію експлуатації установки зберігання електроенергії, яка узгоджується з попередньо розрахованими оптимальними графіками роботи або з внутрішньою політикою підприємства. У цьому режимі користувач задає періоди доби для заряджання та розряджання, обмеження на використання потужності установки зберігання електроенергії і джерела заряджання. Це дає змогу відтворити результати задачі оптимального керування, сформульованої у попередньому розділі, та перевірити їх у середовищі детального моделювання System Advisor Model.

Після виконання моделювання System Advisor Model формує розширений набір показників, що описують роботу установки зберігання електроенергії у складі гібридної системи. До основних результатів належать:

- часові ряди потужності заряджання та розряджання установки зберігання електроенергії;
- часові ряди стану заряду батареїної системи;

- сумарна кількість циклів розрядження за розрахунковий період та розподіл глибин циклів;
- річні та місячні підсумки енергії, що пройшла через установку зберігання електроенергії під час заряджання та розряджання;
- показники впливу установки зберігання електроенергії на профіль потужності з електричної мережі: зменшення піків, зміна форми графіка, скорочення перетоків;
- узгоджені з моделлю довговічності показники зменшення доступної ємності у часі.

На основі цих даних аналізується ефективність обраних алгоритмів диспетчеризації. Для режиму зрізання пікових навантажень оцінюється зменшення максимальної потужності, що споживається з електричної мережі, та відповідне скорочення витрат. Для режиму самоспоживання визначається частка сонячної генерації, яка безпосередньо використовується підприємством, і зменшення обсягів імпорту електроенергії. Для режимів, орієнтованих на тарифні сигнали, оцінюється рівень зменшення сукупної вартості електроенергії та чутливість результатів до зміни тарифної структури.

Результати виводяться як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків. Важливими є графіки сумісного відображення потужності сонячної електричної станції, навантаження підприємства, потужності установки зберігання електроенергії та потужності з електричної мережі, а також графіки зміни стану заряду протягом представницьких діб та місяців. Ці графіки дозволяють візуально оцінити, як установка зберігання електроенергії згладжує профіль навантаження та змінює взаємодію підприємства з електричною мережею.

На рисунку 3.12 наведено результати моделювання добових профілів потужності установки зберігання електроенергії, зміни стану заряду та обміну потужністю з електричною мережею для різних місяців року.

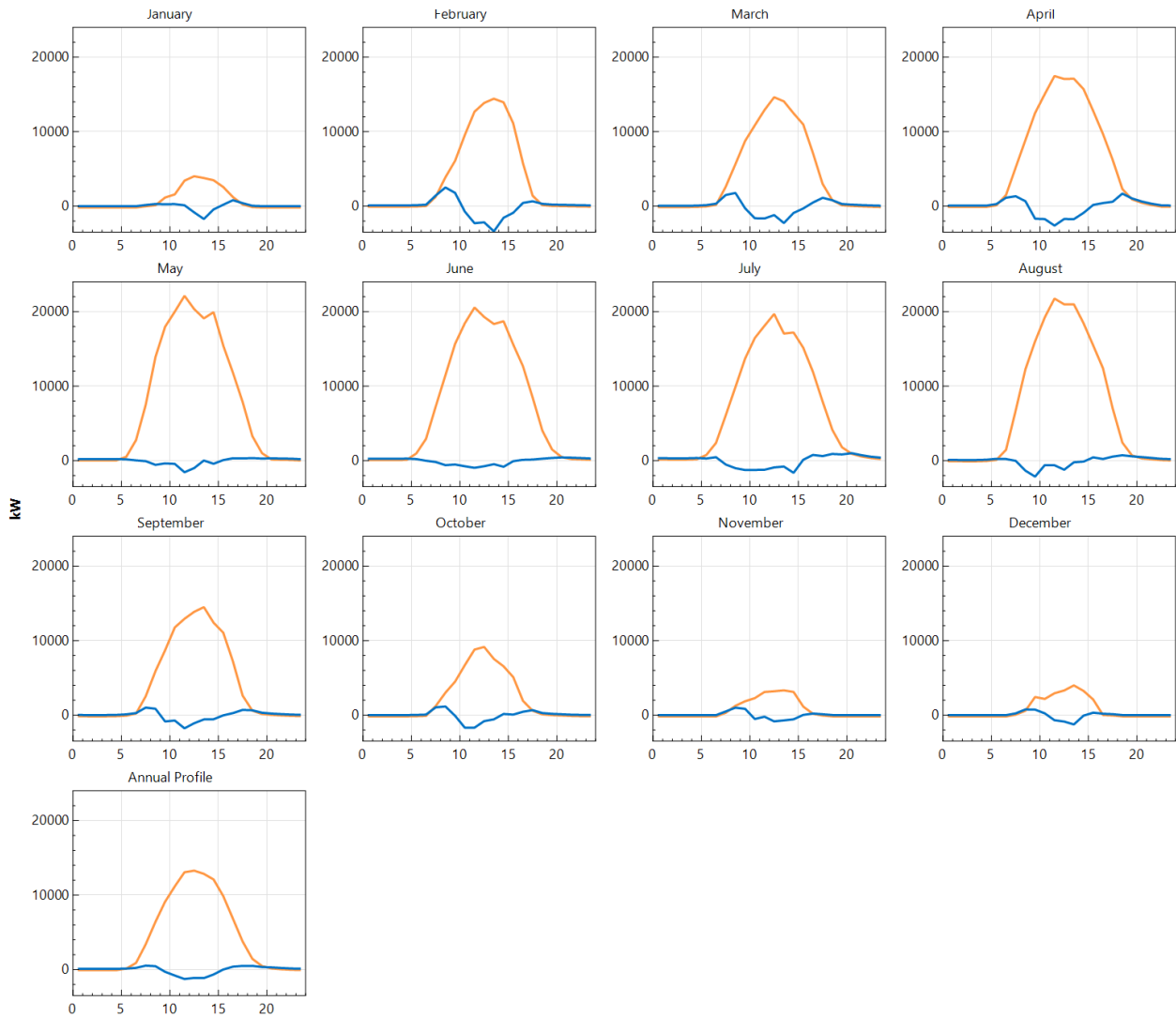


Рисунок 3.12 - Приклад результатів моделювання: профілі потужності установки зберігання електроенергії, стан заряду та потужність з електричної мережі

Таким чином, використання вбудованої моделі установки зберігання електроенергії та алгоритмів її диспетчеризації у System Advisor Model забезпечує можливість детального аналізу ролі батареїної системи у гібридній системі енергозабезпечення промислових підприємств. Поєднання фізично обґрунтованих моделей батарей, розвинених алгоритмів диспетчеризації за обліковим приладом та модельних інструментів техніко економічної оцінки створює цілісну основу для задач, поставлених у дисертаційній роботі.

### **3.4 Аналіз результатів моделювання та оцінювання ефективності впровадження гібридної системи енергозабезпечення**

Комплексне моделювання сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії у складі гібридної системи енергозабезпечення промислових підприємств у програмному середовищі System Advisor Model дає змогу перейти від теоретичної постановки задачі до кількісної оцінки енергетичних та економічних переваг впровадження такої системи. У цьому підрозділі розглядаються структура сценаріїв моделювання, основні етапи налаштування моделі установки зберігання електроенергії та алгоритмів її диспетчеризації, а також підходи до аналізу отриманих результатів та оцінювання ефективності гібридної системи.

#### **3.4.1 Структура сценаріїв моделювання гібридної системи**

Для забезпечення можливості порівняння різних конфігурацій енергетичної системи промислових підприємств у дослідженні сформовано кілька варіантів сценаріїв моделювання, які відображають послідовні етапи модернізації системи електропостачання.

У базовому варіанті розглядається існуюча система без сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії. Все електроспоживання промислових підприємств покривається за рахунок електричної мережі, а профіль потужності з мережі повністю збігається з профілем навантаження підприємств. Цей варіант використовується як еталон для оцінювання ефекту від впровадження гібридної системи.

У другому варіанті до системи додається сонячна електрична станція з параметрами, визначеними у попередньому підрозділі на основі доступної площі промислових майданчиків. У цьому варіанті відсутня установка зберігання електроенергії. Частина навантаження підприємств покривається безпосередньо сонячною генерацією, надлишки електроенергії відпускаються в електричну мережу, а нестача покривається за рахунок імпорту електроенергії.

У третьому варіанті в систему додається установка зберігання електроенергії з енергетичною ємністю 80 МВт·год та встановленою потужністю 30 МВт. Установка зберігання електроенергії працює за відносно простою стратегією керування, орієнтованою на підвищення частки власного споживання сонячної генерації та згладжування найбільш виражених піків навантаження. У цьому варіанті аналізується сам факт інтеграції установки зберігання електроенергії та її базовий вплив на енергетичні показники.

Четвертий варіант передбачає використання установки зберігання електроенергії з розвиненішими алгоритмами диспетчеризації, які враховують структуру тарифів, часовий розподіл навантаження та генерації, а також обмеження довговічності батарейної системи. У цьому варіанті розглядаються сценарії, орієнтовані на мінімізацію сумарних витрат на електроенергію та на більш глибоке зрізання пікових навантажень. Загальний перелік сценаріїв поданий у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Сценарії моделювання гібридної системи енергозабезпечення промислових підприємств

Варіант	Склад енергетичної системи	Основні цілі аналізу
1	Лише електрична мережа	Оцінка базового рівня енергоспоживання та витрат на електроенергію
2	Сонячна електрична станція плюс електрична мережа	Визначення частки покриття навантаження сонячною генерацією, обсягів експорту та імпорту електроенергії
3	Сонячна електрична станція плюс установка зберігання електроенергії плюс електрична мережа (базова диспетчеризація)	Оцінка впливу установки зберігання електроенергії на профіль потужності з мережі та частку власного споживання сонячної генерації
4	Сонячна електрична станція плюс установка зберігання електроенергії плюс електрична мережа (оптимізована диспетчеризація)	Аналіз зменшення витрат на електроенергію, зрізання піків навантаження та впливу на довговічність установки зберігання електроенергії

### **3.4.2 Налаштування моделі установки зберігання електроенергії в програмному середовищі System Advisor Model**

Моделювання установки зберігання електроенергії виконується у межах інтегрованої моделі «сонячна електрична станція плюс установка зберігання електроенергії» у програмному середовищі System Advisor Model. Для цього до вже створеного проєкту сонячної електричної станції додається модуль установки зберігання електроенергії, що забезпечує спільний розрахунок генерації та накопичення електроенергії.

На сторінці загальних налаштувань вибирається варіант застосування установки зберігання електроенергії за обліковим приладом промислового споживача. У цьому варіанті установка зберігання електроенергії розташована на стороні низької напруги і працює з тим самим профілем навантаження, що й промислові підприємства. Це дозволяє безпосередньо оцінювати вплив батарейної системи на потужність, що споживається з електричної мережі, та відповідні витрати.

На рисунку 3.13 показано загальне вікно створення проєкту в програмному середовищі System Advisor Model з вибраною конфігурацією «сонячна електрична станція + установка зберігання електроенергії» та моделлю власника комерційного об'єкта.

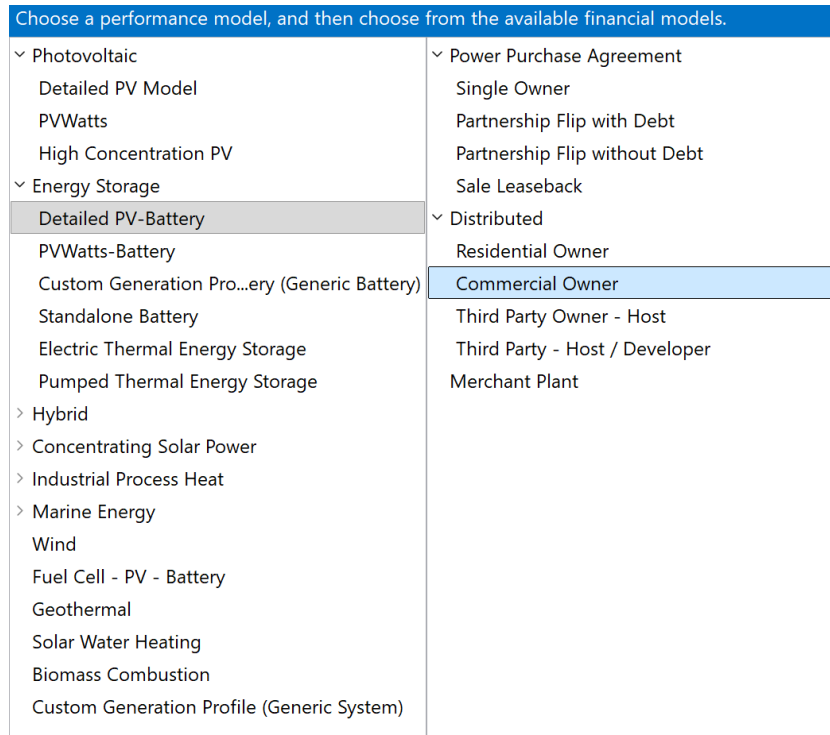


Рисунок 3.13 - Загальне вікно проєкту в System Advisor Model з активованим модулем установки зберігання електроенергії

Основні технічні параметри батарейної системи задаються на сторінці опису батарейних елементів та модульної конфігурації. На цьому етапі визначаються тип хімічної системи, номінальна напруга і ємність елементів, конфігурація їх з'єднання у модулі та шафи, а також параметри силових перетворювачів. Сумарна енергетична ємність системи встановлюється на рівні 80 МВт·год, а номінальна активна потужність на рівні 30 МВт. Ці величини узгоджуються з концепцією контейнеризованої установки зберігання електроенергії, яка складається з групи модулів, що розміщуються у стандартних контейнерах.

Для забезпечення коректної роботи моделі задаються граничні значення стану заряду, коефіцієнти корисної дії заряджання та розряджання, а також максимальні значення потужності заряджання і розряджання. У разі необхідності активується тепловий модуль, який враховує вплив температури на характеристику батарейної системи.

На рисунку 3.14 наведено вікно налаштування параметрів установки зберігання електроенергії в середовищі System Advisor Model, зокрема вибір

хімії акумулятора, встановленої потужності, енергоємності та обмежень режимів заряду й розряду.

**Chemistry**

Battery type:

---

**Optimal Sizing and Dispatch from REopt**

The REopt API web service automatically sizes the battery bank and calculates a time series dispatch schedule. Click Get Size and Dispatch to run a simulation, send data from SAM to the service, run a REopt optimization on the service, and choose whether to modify SAM battery size and dispatch inputs with results from the REopt run. You can also choose whether to size the battery to maintain power during a grid outage. See Help for details.

Consider grid outage in REopt optimization

---

**Battery Bank Sizing**

Specify desired values for the nominal bank capacity and power for SAM to calculate the number of cells and strings, or specify the number of cells and strings yourself. Verify the battery size under Current and Capacity below.

Set desired bank size  
 Specify cells

Desired bank power:  kW  DC units Number of cells in series:  Max C-rate of charge:  per/hour

Desired bank capacity:  kWh  AC units Number of strings in parallel:  Max C-rate of discharge:  per/hour

Bank capacity and power fields are values measured before conversion and parasitic losses. If specified in AC, the DC/AC conversion efficiency will be used to scale the battery size.

---

**Current and Capacity**

Use default nominal cell voltage and capacity for the battery chemistry if data is not available from another source. Check the computed properties to verify the battery is sized correctly.

Desired bank voltage:  Vdc  
 Cell nominal voltage:  Vdc  
 Cell capacity:  Ah

---

**Computed Properties**

Nominal bank capacity	<input type="text" value="79,999.725"/> kWhdc	Max C-rate of discharge	<input type="text" value="0.375"/> per/hour
Nominal bank power	<input type="text" value="29,999.897"/> kWdc	Max C-rate of charge	<input type="text" value="0.375"/> per/hour
Time at maximum power	<input type="text" value="2.667"/> h	Maximum discharge current	<input type="text" value="59,822.719"/> A
Nominal bank voltage	<input type="text" value="501.480"/> Vdc	Maximum charge current	<input type="text" value="59,822.719"/> A
Total number of cells	<input type="text" value="8,933.526"/>		
Cells in series	<input type="text" value="126"/>		
Strings in parallel	<input type="text" value="70,901"/>		
		<b>DC</b>	<b>AC</b>
		Maximum discharge power	<input type="text" value="29,999.897"/> kW <span style="margin-left: 20px;"><input type="text" value="28,799.901"/> kW</span>
		Maximum charge power	<input type="text" value="29,999.897"/> kW <span style="margin-left: 20px;"><input type="text" value="31,249.893"/> kW</span>

Рисунок 3.14 - Налаштування параметрів УЗЕ

Окремо налаштовується модель довговічності установки зберігання електроенергії. У програмному середовищі System Advisor Model реалізовано варіанти опису довговічності через комбінацію календарної деградації та деградації від циклів. Задається таблиця або аналітична модель, яка пов'язує глибину циклу розрядження з еквівалентною втратою ємності, а також параметри, що описують зменшення ємності внаслідок тривалого перебування у зарядженому стані. Це дає змогу оцінювати зміну доступної енергетичної ємності установки зберігання електроенергії у часі та аналізувати вплив вибраної стратегії диспетчеризації на ресурс батареїної системи.

На рисунку 3.15 показано налаштування параметрів довговічності установки зберігання електроенергії, зокрема моделі циклічної та календарної деградації, а також умови заміни батарейного банку в середовищі System Advisor Model.

**Battery Bank Replacement**

Choose Replace at Specified Capacity to have SAM automatically replace the battery when the available capacity calculated by the life model reaches the level you specify. Choose Replace at Specified Schedule to force battery replacements in specific years regardless of available capacity. The battery replacement cost is on the Operating Costs page.

No replacements  
 Replace at specified capacity  
 Replace at specified schedule

Battery bank replacement threshold  % capacity

Battery bank replacement schedule (%/year)

**Battery Life Options**

The battery life model determines how battery capacity decreases over time. Capacity may decrease with the number of charge and discharge cycles (cycle degradation), with age regardless of cycling (calendar degradation), or both.

Cycle and calendar degradation  
 Li-ion NMC/Graphite  
 Li-ion LMO/LTO

The best battery life option for Lithium Ion: Lithium Iron Phosphate (LFP/Graphite) (batt\_type=5) is empirical cycle and calendar degradation.

The Cycle and Calendar Degradation inputs below define battery degradation curves.

**Cycle and Calendar Degradation**

Use the options and tables below to define cycle degradation and calendar degradation curves. SAM automatically updates these inputs when you choose a battery type on the Battery Cell and System page. The empirical calendar degradation model is suitable for Lithium-ion batteries. See help for details.

**Cycle Degradation**

Import...	Depth-of-discharge (%)	Cycles Elapsed	Capacity (%)
Export...	100	0	100
Copy	100	128	98.7907
Paste	100	202	97.9632
Rows:	100	277	97.3904
172	100	371	96.6266
	100	523	95.9265
	100	666	95.2263
	100	1012	93.9533
	100	1354	92.9349

**Calendar Degradation**

None  
 Empirical  
 Custom

$q = 1.02 - k_{cal} * \sqrt{t}$   
 $k_{cal} = 0.00266 * \exp[-7280 * (1/T - 1/296)] * \exp[939 * (SOC/T - 1/296)]$

Рисунок 3.15 - Налаштування параметрів довговічності УЗЕ

### 3.4.3 Алгоритми диспетчеризації установки зберігання електроенергії та їх реалізація у програмному середовищі System Advisor Model

Алгоритми диспетчеризації визначають, коли установка зберігання електроенергії повинна заряджатися та розряджатися, від яких джерел вона може заряджатися та куди може віддавати енергію під час розряджання. У System

Advisor Model реалізовано кілька режимів диспетчеризації для застосувань за обліковим приладом, які орієнтовані на різні завдання.

Для досліджуваних сценаріїв можуть бути використані такі режими:

- режим, орієнтований на зрізання пікових навантажень за потужністю з електричної мережі;
- режим, орієнтований на мінімізацію сукупних витрат на електроенергію за рахунок врахування тарифних сигналів;
- режим, орієнтований на максимізацію частки власного споживання сонячної генерації;
- режим з ручним завданням графіків заряджання та розряджання, який дає змогу реалізувати заздалегідь розраховані добові або тижневі профілі потужності.

У програмному середовищі System Advisor Model для кожного режиму задаються додаткові параметри, що описують правила роботи установки зберігання електроенергії протягом доби та року. Наприклад, для режиму зрізання піків визначаються періоди доби, у які необхідно обмежувати потужність з електричної мережі, а також цільові значення потужності. Для режиму, орієнтованого на тарифні сигнали, задаються зони високих і низьких цін на електроенергію, а також пріоритети використання установки зберігання електроенергії в кожній зоні.

На рисунку 3.16 наведено варіанти режимів диспетчеризації установки зберігання електроенергії, зокрема режим згладжування пікових навантажень (peak shaving) та альтернативні стратегії керування.

- Peak shaving
- Input grid power targets
- Input battery power targets
- Manual dispatch
- Retail rate dispatch
- Self-consumption

Рисунок 3.16 - Вибір режимів диспетчеризації УЗЕ

Окрім вибору режиму, задаються параметри, які визначають джерела заряджання та напрямки розряджання. Для досліджуваної гібридної системи природно прийняти, що установка зберігання електроенергії може заряджатися від сонячної електричної станції та від електричної мережі за умов низьких тарифів. Розряджання установки зберігання електроенергії орієнтується насамперед на покриття власного навантаження підприємств. У сценаріях, де дозволено відпуск електроенергії до електричної мережі, допускається також розряджання до мережі за умов, коли потужність сонячної електричної станції та потужність установки зберігання електроенергії перевищують поточне навантаження.

На сторінці налаштування джерел заряджання та напрямків розряджання задаються відповідні прапорці та обмеження, що регламентують ці потоки потужності. Це забезпечує узгодження алгоритмів диспетчеризації з балансом активної потужності у вузлі приєднання гібридної системи.

На рисунку 3.17 показано налаштування джерел заряджання та умов розряджання установки зберігання електроенергії залежно від співвідношення генерації та навантаження системи.

- Battery can charge from grid
- Battery can charge from system
- Battery can charge from grid-limited system power
- Battery can charge from clipped system power
- Battery can discharge to grid
- Charge from system only when system output exceeds load
- Discharge battery only when load exceeds system output

Рисунок 3.17 - Налаштування джерел заряджання та напрямків розряджання установки зберігання електроенергії

### **3.4.4 Аналіз часових профілів потужності та стану заряду за результатами моделювання**

Після запуску розрахунків для кожного сценарію System Advisor Model формує часові ряди потужності сонячної електричної станції, установки зберігання електроенергії, електричної мережі та навантаження підприємств. Також формується часовий ряд стану заряду батарейної системи. Аналіз цих рядів є першим кроком до оцінювання ефективності гібридної системи.

Для репрезентативних діб типових місяців року будуються графіки, на яких одночасно відображаються:

- активна потужність навантаження промислових підприємств;
- активна потужність сонячної електричної станції;
- активна потужність установки зберігання електроенергії зі знаком, що відображає заряджання та розряджання;
- активна потужність, що споживається з електричної мережі або відпускається до неї;
- стан заряду установки зберігання електроенергії.

Такі графіки дозволяють наочно побачити, як встановлення сонячної електричної станції та інтеграція установки зберігання електроенергії змінюють добовий профіль потужності з електричної мережі, згладжують пікові навантаження та підвищують рівень самозабезпечення електроенергією.

На рисунку 3.18 наведено добові профілі навантаження підприємства, сонячної генерації, обміну потужністю з установкою зберігання та електричною мережею, а також зміну стану заряду акумулятора для одного зі сценаріїв роботи системи.

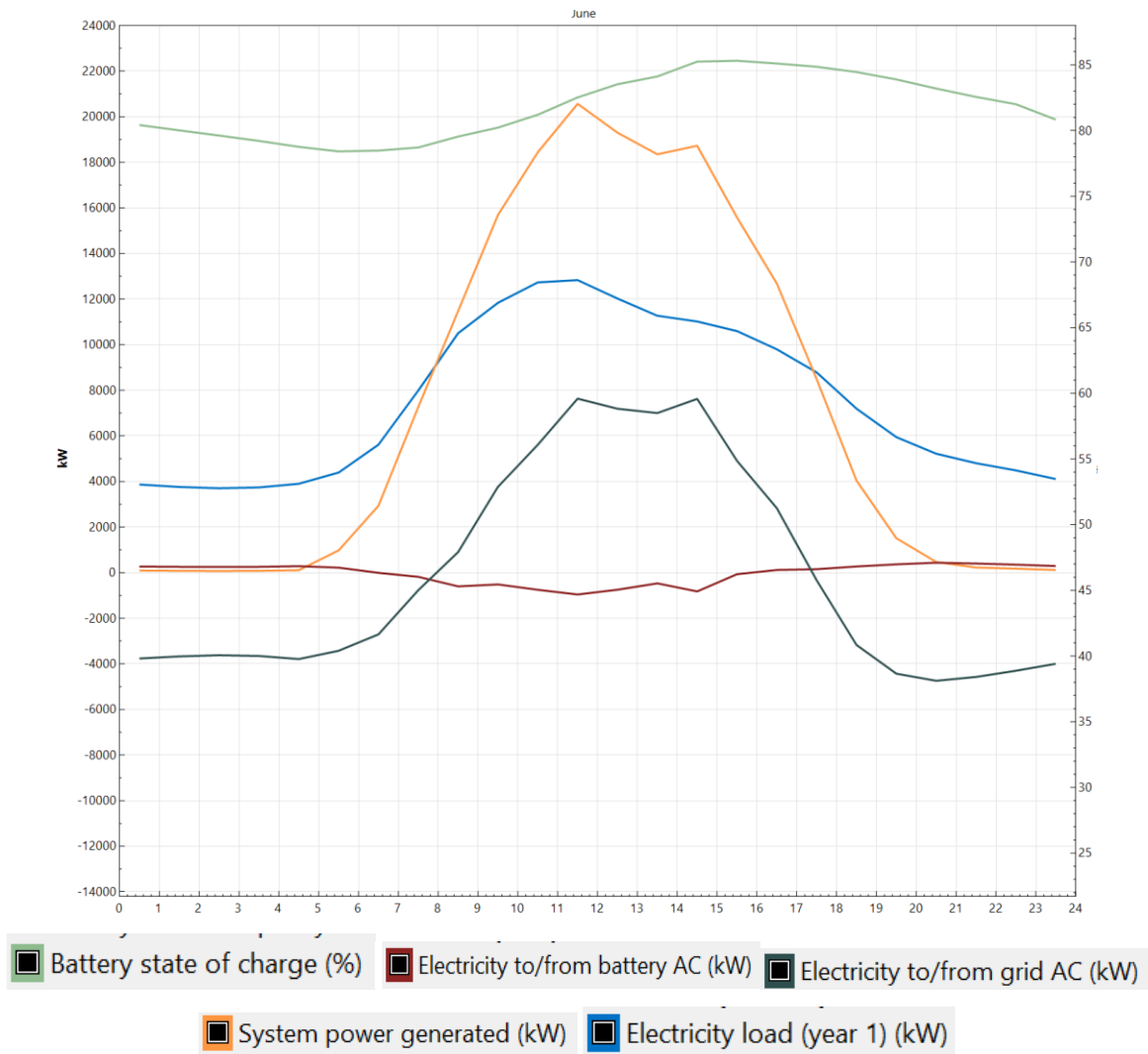


Рисунок 3.18 - Приклад добових профілів потужності для одного з сценаріїв: навантаження підприємств, сонячна генерація, потужність установки зберігання електроенергії, потужність з електричної мережі та стан заряду

На основі часових рядів формуються узагальнені показники використання установки зберігання електроенергії. Зокрема, визначаються:

- середня кількість циклів розряджання на рік;
- розподіл глибин циклів;
- середні значення стану заряду та його коливань;
- коефіцієнт використання встановленої потужності та енергетичної ємності.

Ці дані подаються у вигляді або таблиці 3.2 і використовуються для оцінювання навантаженості батарейної системи та очікуваного ресурсу з урахуванням моделі довговічності.

Таблиця 3.2 - Характеристики режимів роботи установки зберігання електроенергії за сценаріями

Варіант	Середня кількість циклів на рік	Середня глибина циклу	Оціночна втрата ємності за період моделювання
3	315	53 %	40 %
4	240	30 %	24 %

### 3.4.5 Порівняння енергетичних показників гібридної системи за сценаріями

На основі результатів розрахунку енергетичних потоків для кожного сценарію формується система показників, яка дозволяє кількісно порівняти варіанти гібридної системи між собою та з базовим варіантом.

До ключових енергетичних показників належать:

- річне виробництво електроенергії сонячною електричною станцією;
- частка електричного навантаження підприємств, покрита сонячною генерацією безпосередньо;
- частка навантаження, покрита за рахунок енергії, що проходить через установку зберігання електроенергії;
- частка енергії, відпущеної в електричну мережу;
- загальні обсяги імпорту електроенергії для кожного сценарію;
- зменшення пікової потужності, що споживається з електричної мережі, порівняно з базовим варіантом.

Узагальнення цих показників подається у вигляді таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Енергетичні показники гібридної системи за сценаріями

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Річне виробництво електроенергії сонячною станцією, кВт·год	26 565 643	26 565 643	26 565 643	26 565 643

Продовження таблиці 3.3

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Частка покриття навантаження сонячною генерацією, %	37,11	37,11	37,11	37,11
Частка навантаження, покрита через установку зберігання електроенергії, %	0	5,32	31,39	62,89
Річний імпорт електроенергії з мережі, кВт·год	49 126 122	45 008 161	35 813 757	35 813 757
Максимальна потужність з електричної мережі, кВт	18 746,85	15 483,72	13 333,33	30 000
Зменшення максимальної потужності порівняно з варіантом 1, %	0	- 17,4	- 28,88	+ 60,03

Для узагальненої візуалізації зміни енергетичних потоків будуються діаграми, що показують структуру покриття навантаження за джерелами, частку відновлюваної генерації та внесок установки зберігання електроенергії.

### **3.4.6 Техніко економічна оцінка ефективності впровадження гібридної системи**

Окрім енергетичних показників, важливою є техніко економічна оцінка впровадження гібридної системи. Програмне середовище System Advisor Model забезпечує розрахунок фінансових показників на основі моделі грошових потоків, яка враховує інвестиційні витрати на встановлення сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії, експлуатаційні витрати, доходи від продажу електроенергії та економію від зменшення закупівлі електроенергії з мережі.

До найважливіших фінансових показників належать:

- приведена вартість електроенергії для кожного сценарію;
- чиста приведена вартість проєкту;
- дисконтований строк окупності;
- внутрішня норма прибутку;
- середньорічна економія витрат на електроенергію порівняно з базовим варіантом.

Для кожного сценарію ці показники обчислюються на основі річних енергетичних потоків, тарифів, індексів інфляції, ставок дисконтування та інших фінансових параметрів, заданих у моделі. Результати узагальнюються у таблиці 3.4, яка дозволяє порівняти економічну доцільність впровадження сонячної електричної станції та установки зберігання електроенергії.

Таблиця 3.4 - Фінансові показники за сценаріями впровадження гібридної системи

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Приведена вартість електроенергії, грн/кВт·год	16,17	16,92	13,26	6,63
Чиста приведена вартість, тис. грн	794 153	761 340	474 903	237 451
Дисконтований строк окупності, років	0	>25	2,1	1,2
Середньорічна економія витрат на електроенергію порівняно з варіантом 1, тис. грн/рік	0	- 32 813	- 319 250	- 556 702

На основі фінансових показників здійснюється узагальнений висновок щодо доцільності впровадження гібридної системи. При цьому аналізуються компроміси між зменшенням витрат на електроенергію, обсягами інвестицій, впливом на піки навантаження та довговічністю установки зберігання електроенергії.

Додатковим аспектом оцінювання ефективності гібридної системи є надійність електропостачання та екологічні ефекти. На основі результатів моделювання можна оцінити:

- зменшення обсягів викидів діоксиду вуглецю порівняно з базовим варіантом за рахунок заміщення частини електроенергії з традиційних джерел сонячною генерацією;
- підвищення рівня самозабезпечення підприємств електроенергією, що зменшує залежність від зовнішніх постачальників;
- потенціал використання установки зберігання електроенергії як резервного джерела під час порушень у роботі електричної мережі.

Екологічні показники можуть бути розраховані шляхом множення обсягів зменшеного імпорту електроенергії на питомі коефіцієнти викидів, характерні для енергетичного балансу регіону. Для оцінювання надійності можуть бути побудовані сценарії роботи у режимі обмеженого доступу до електричної мережі, у яких установка зберігання електроенергії разом із сонячною електричною станцією покриває частину критичного навантаження.

### **3.4.7 Узагальнення результатів аналізу ефективності впровадження гібридної системи**

Узагальнюючи результати моделювання, можна сформулювати такі основні висновки:

- впровадження сонячної електричної станції на промислових підприємствах призводить до суттєвого зменшення річних обсягів імпорту електроенергії, а також до формування певних обсягів надлишкової генерації у години низького навантаження;
- додавання установки зберігання електроенергії дозволяє підвищити частку власного споживання сонячної генерації, скоротити обсяги експорту в електричну мережу та ще більше зменшити обсяги імпорту;
- у сценаріях з розвиненими алгоритмами диспетчеризації установка зберігання електроенергії забезпечує більш суттєве зрізання пікових

навантажень, що має прямий вплив на витрати за потужність та загальні витрати на електроенергію;

- використання моделі довговічності дозволяє оцінити компроміс між агресивними режимами використання установки зберігання електроенергії (що дають більшу економію витрат) та прискореною деградацією батарейної системи;
- комплексна техніко економічна оцінка демонструє, що оптимальне поєднання потужності сонячної електричної станції, ємності установки зберігання електроенергії та алгоритмів їх взаємодії дозволяє забезпечити зниження приведеної вартості електроенергії та скорочення строку окупності проєкту порівняно з базовим варіантом.

Отримані результати моделювання у програмному середовищі System Advisor Model створюють кількісну основу для обґрунтування доцільності впровадження гібридної системи енергозабезпечення на реальних промислових підприємствах і дозволяють у подальшому сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів сонячної електричної станції, установки зберігання електроенергії та стратегій керування їх режимами роботи.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто прикладне моделювання гібридної системи енергозабезпечення промислових підприємств із сонячною електричною станцією та установкою зберігання електроенергії із використанням програмного середовища System Advisor Model. На основі виконаних розрахунків і порівняльного аналізу сценаріїв можна сформулювати такі узагальнені висновки.

Сформовано комплекс вихідних даних для моделювання гібридної системи, який включає характеристику двох репрезентативних промислових підприємств, типовий річний профіль електричного навантаження, інформацію про доступну площу для розміщення сонячних фотомодулів та параметри установки зберігання електроенергії. Показано, що обрані значення площі

забудови, річного споживання електроенергії та доступної площі під сонячні фотомодулі відповідають реалістичним умовам середніх і великих промислових майданчиків і створюють репрезентативну основу для подальшого аналізу.

У середовищі System Advisor Model побудовано детальну модель сонячної електричної станції для кожного з досліджуваних підприємств. Враховано географічне розташування, метеорологічні дані, геометрію розміщення фотомодулів, конструкцію фотоелектричного поля, параметри інверторів та основні групи втрат. Продемонстровано можливість узгодження моделі генерації з часовими рядами навантаження промислових підприємств, що дає змогу отримати часові профілі виробітку електроенергії та показники річної генерації, коефіцієнтів використання встановленої потужності та частки покриття навантаження за базового режиму роботи без установки зберігання електроенергії.

У програмному середовищі System Advisor Model реалізовано модель установки зберігання електроенергії з енергетичною ємністю 80 МВт·год та встановленою потужністю 30 МВт, інтегровану з моделлю сонячної електричної станції за обліковим приладом промислового споживача. Налаштовано параметри батарейних елементів і модульної структури, граничні значення стану заряду, коефіцієнти корисної дії, обмеження потужності заряджання та розряджання, а також модель довговічності, що враховує деградацію від циклів і календарний чинник. Це забезпечило можливість аналізувати не лише миттєві режими роботи, а й довгострокові наслідки обраної стратегії диспетчеризації для ресурсу установки зберігання електроенергії.

Налаштовано та досліджено режими диспетчеризації установки зберігання електроенергії, орієнтовані на різні цілі функціонування гібридної системи. Розглянуто сценарії, спрямовані на підвищення частки власного споживання сонячної генерації, зменшення пікової потужності з електричної мережі, мінімізацію сукупних витрат на електроенергію та реалізацію наперед заданих графіків заряджання і розряджання. Показано, що використання вбудованих алгоритмів диспетчеризації у поєднанні з гнучкими налаштуваннями джерел

заряджання і напрямків розряджання дозволяє відтворити на практичному прикладі ті підходи до оптимального керування, які були сформульовані у теоретичній частині роботи.

За результатами моделювання виконано порівняльний аналіз енергетичних показників гібридної системи для кількох сценаріїв. Показано, що впровадження сонячної електричної станції приводить до відчутного зменшення річного імпорту електроенергії з електричної мережі та підвищення частки відновлюваної генерації у балансі енергоспоживання промислових підприємств. Додавання установки зберігання електроенергії додатково збільшує частку власного споживання сонячної генерації, зменшує обсяги відпуску надлишкової енергії до мережі і забезпечує зрізання пікових навантажень, що безпосередньо впливає на максимальну потужність, яку необхідно забезпечувати з боку електричної мережі.

## 4 СТАРТАП-ПРОЄКТ

### 4.1 Опис ідеї стартап-проєкту

Стартап-проєкт спрямований на розробку та впровадження комплексних рішень на базі установок зберігання енергії для комерційних і промислових споживачів електричної енергії. Проєкт передбачає створення готових модульних систем накопичення електричної енергії з інтегрованими засобами перетворення, керування та моніторингу, адаптованих до роботи в умовах погодинного або поквартального обліку електроенергії та наявності власної сонячної генерації.

Основна ідея стартапу полягає у наданні замовникам завершеного інженерного рішення «під ключ», яке дозволяє оптимізувати енергоспоживання підприємства за рахунок згладжування пікових навантажень, підвищення рівня самоспоживання електроенергії сонячної електростанції, зменшення витрат на електропостачання та підвищення надійності живлення. Запропоновані рішення передбачають попередньо налаштовані алгоритми керування режимами заряджання і розряджання установки зберігання енергії з урахуванням профілю навантаження, тарифної структури та прогнозу генерації відновлюваних джерел енергії.

Цільовими напрямками застосування стартап-проєкту є підприємства з нерівномірним графіком електроспоживання та значними піковими навантаженнями, зокрема виробничі майданчики, логістичні центри, об'єкти комерційної нерухомості, насосні станції, підприємства харчової промисловості, а також об'єкти з інтегрованими сонячними електростанціями. У таких системах установка зберігання енергії виступає як інструмент підвищення енергетичної гнучкості та економічної ефективності роботи підприємства.

У таблиці 4.1 наведено узагальнений опис ідеї стартап-проєкту, основні напрями її застосування та очікувані вигоди для кінцевого користувача.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Розробка та впровадження модульних установок зберігання енергії з інтегрованими системами перетворення та керування для комерційних і промислових споживачів	Виробничі підприємства, логістичні центри, насосні станції, комерційні будівлі, об'єкти з власною сонячною електростанцією	Зменшення витрат на електроенергію за рахунок згладжування піків навантаження; Підвищення рівня самоспоживання електроенергії СЕС; Зниження договірної потужності та штрафів за її перевищення; Підвищення надійності електропостачання; Готове рішення з оптимізованими алгоритмами керування

Аналіз можливих техніко-економічних переваг та обмежень запропонованого стартап-проєкту наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Техніко-економічні переваги та обмеження стартап-проєкту

Техніко-економічні характеристики	Слабка сторона	Нейтральна сторона	Сильна сторона
Готові до використання модульні рішення з попередньо налаштованими алгоритмами керування			+
Орієнтація на комерційних та промислових споживачів		+	
Зменшення пікових навантажень та договірної потужності			+
Підвищення рівня самоспоживання електроенергії СЕС			+
Вартість впровадження порівняно з традиційними мережевими рішеннями	+		
Необхідність детального аналізу профілю навантаження перед впровадженням		+	
Масштабованість та гнучкість у виборі потужності й енергетичної ємності			+
Потреба у спеціалізованому сервісному обслуговуванні та моніторингу		+	
Залежність економічного ефекту від тарифної структури		+	

Визначений перелік сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї стартап-проєкту свідчить про її практичну спрямованість і потенційну

конкурентоспроможність на ринку енергетичних рішень для комерційних і промислових споживачів. Основними сильними сторонами є можливість зменшення пікових навантажень, підвищення рівня самоспоживання електроенергії та гнучкість масштабування системи під потреби конкретного об'єкта. Водночас до слабких сторін слід віднести відносно високі початкові інвестиції та чутливість економічного ефекту до тарифних умов і режимів експлуатації. У цілому переважання сильних сторін над слабкими підтверджує доцільність подальшого розвитку та практичної реалізації запропонованої стартап-ідеї.

#### **4.2 Технологічний аудит проекту**

Проект має чітко визначені технологічні межі, які базуються на інтеграції сучасних систем накопичення електричної енергії з існуючими системами електропостачання підприємств та сонячними електростанціями. Основними складовими проекту є батарейні модулі промислового типу, силова перетворювальна електроніка (PCS), системи керування енергією (EMS), системи керування батареями (BMS), а також засоби комунікації та моніторингу.

Технологічний аудит спрямований на оцінку здійсненності ідеї стартап-проекту з точки зору наявності необхідних технологій, ступеня їхньої зрілості, доступності обладнання на ринку та можливості інтеграції в єдину керовану систему для комерційних і промислових споживачів. Окрему увагу приділено відповідності технічних рішень чинним стандартам безпеки, надійності та сумісності з електричними мережами.

Результати технологічного аудиту свідчать про високу практичну реалізованість проекту, оскільки всі ключові технологічні компоненти є доступними, широко застосовуються в сучасних енергетичних системах та мають підтверджений досвід промислової експлуатації. Висновок технологічного аудиту наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність проєкту

Ідея проєкту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
Розробка та впровадження модульних установок зберігання енергії для комерційних і промислових споживачів з власною сонячною генерацією	Інтеграція промислових літій-іонних батарей, двонапрямних інверторів (PCS), систем керування енергією (EMS) та систем керування батареями (BMS) в єдину керовану модульну систему	Технології є наявними, зрілими та перевіреними у промисловій експлуатації	Основні компоненти доступні на ринку України та ЄС, можливе поетапне впровадження і локалізація монтажу та сервісу

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналіз ринкових можливостей є важливим етапом оцінювання перспективності стартап-проєкту, оскільки дозволяє визначити потенційну аудиторію, рівень конкуренції та основні фактори попиту. Зростання тарифів на електроенергію, впровадження погодинного обліку та активний розвиток відновлюваної генерації формують сталий попит на рішення з використанням УЗЕ.

Основними споживачами продукту є підприємства, які вже мають або планують встановлення сонячних електростанцій та зацікавлені у підвищенні ефективності використання власної генерації. Аналіз потреб проєкту та його ринкових перспектив наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Показники стану ринку	Характеристика
Цільова аудиторія	Комерційні та промислові споживачі з власною СЕС
Обсяг ринку	Підприємства з піковим навантаженням, логістика, АПК, виробництво

Продовження таблиці 4.4

Показники стану ринку	Характеристика
Рівень конкуренції	Помірний, з обмеженою кількістю комплексних рішень
Потенційні бар'єри входу	Необхідність техніко-економічного обґрунтування та індивідуального підбору
Перспективи росту	Зростання попиту на УЗЕ через тарифи та децентралізацію енергетики

Основним драйвером попиту на установки зберігання енергії для комерційних і промислових споживачів є прагнення підприємств зменшити витрати на електропостачання та підвищити керованість власного енергоспоживання. За наявності сонячної електростанції значна частина генерації може втрачатися через обмеження інвертора або відпускатися в мережу за економічно не вигідними умовами, тоді як використання УЗЕ дає змогу накопичувати надлишки та використовувати їх у періоди підвищеного навантаження або дорожчої електроенергії. Додатково для багатьох об'єктів важливим чинником є потреба у згладжуванні пікових навантажень і зниженні максимальної споживаної потужності, що безпосередньо впливає на платежі за потужність або на ризик перевищення договірних лімітів.

Водночас ринок таких рішень має низку особливостей: у більшості випадків клієнт очікує не окремого обладнання, а комплексного рішення з проектуванням, налаштуванням алгоритмів керування, інтеграцією у наявну електричну інфраструктуру та подальшим сервісом. Це підвищує вимоги до постачальника, але водночас зменшує конкуренцію, що створює можливість для стартапу зайняти власну нішу. У таблиці 4.5 наведено характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту та їх очікувань щодо продукту.

Таблиця 4.5 – Характеристики потенційних клієнтів стартап-проєкту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці	Вимоги до продукту
Зменшення витрат та пікових навантажень	Підприємства з нерівномірним споживанням	Малі та середні – орієнтація на окупність; Великі – на надійність і масштабування	Надійність, гнучкість, проста інтеграція, сервісна підтримка

Наведені характеристики потенційних клієнтів свідчать про наявність стійкого попиту на рішення з використанням установок зберігання енергії у комерційному та промисловому секторі, особливо для об'єктів з нерівномірним або піковим характером споживання електричної енергії. В умовах зростання тарифів та впровадження погодинного обліку підприємства зацікавлені у зменшенні експлуатаційних витрат, підвищенні передбачуваності енергоспоживання та ефективнішому використанні власної сонячної генерації. Це формує потребу у надійних, масштабованих і простих в інтеграції установках зберігання енергії з сервісною підтримкою, що підтверджує доцільність реалізації стартап-проєкту та обумовлює необхідність аналізу рівня конкуренції, наведеного у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку установок зберігання енергії

Рівень конкуренції	Характеристика	Основні гравці	Слабкі сторони конкурентів
Низький (комплексні інтегровані рішення УЗЕ для підприємств)	Обмежена кількість готових рішень з установками зберігання енергії, адаптованих до профілю навантаження, тарифів та власної сонячної генерації споживача	Окремі системні інтегратори, індивідуальні проєктні рішення	Відсутність типових модульних рішень, довгий цикл проєктування, висока вартість індивідуальної інженерії

Продовження таблиці 4.6

Рівень конкуренції	Характеристика	Основні гравці	Слабкі сторони конкурентів
Середній (постачальники УЗЕ та інверторів)	Значна кількість виробників батарейних систем та двонапрямних інверторів, що пропонують обладнання без глибокої адаптації під конкретний об'єкт	Huawei, Sungrow, BYD, CATL, Tesla Energy, SMA	Необхідність складної інтеграції, відсутність оптимізованих алгоритмів керування під конкретні режими споживання
Високий (окремі компоненти та програмні рішення)	Висока конкуренція на ринку окремих батарейних модулів, інверторів та EMS-платформ	ABB, Schneider Electric, Siemens, Delta, Victron Energy	Орієнтація на універсальні рішення, висока вартість комплексної реалізації, потреба у зовнішньому системному інтеграторі

У таблицях 4.7–4.8 наведено основні характеристики потенційних загроз і можливостей, що можуть впливати на реалізацію та розвиток стартап-проекту.

Таблиця 4.7 – Характеристика потенційних загроз стартап-проекту

1	2	3
Залежність від постачальників	Можливі затримки постачання або зростання вартості ключових компонентів УЗЕ (батарейних модулів, інверторів, систем керування)	Розширення кола постачальників, пошук локальних партнерів, створення резервів обладнання
Бар'єри сертифікації	Тривалі строки сертифікації установок зберігання енергії, необхідність дотримання міжнародних та національних стандартів безпеки	Робота з сертифікаційними органами на ранніх етапах проекту, використання компонентів з чинними сертифікатами
Реакція клієнтів на інновації	Недовіра до нових рішень з УЗЕ через відсутність досвіду експлуатації та підтверджених кейсів	Проведення демонстраційних проектів, створення тестових майданчиків на базі реальних підприємств

## Продовження таблиці 4.7

1	2	3
Юридичні обмеження	Зміни у законодавстві, що впливають на ринок електроенергії, накопичення енергії або тарифоутворення	Відстеження законодавчих змін, активна взаємодія з профільними асоціаціями та регуляторами

Таблиця 4.8 – Фактори потенційних можливостей стартап-проєкту

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Зростання ринку систем зберігання енергії	Збільшення кількості підприємств, що впроваджують установки зберігання енергії разом із сонячними електростанціями	Активна маркетингова стратегія, співпраця з компаніями-інтеграторами СЕС та промисловими споживачами
Стимулювання розвитку «зеленої» енергетики	Державна підтримка, пільги та програми для підприємств, що використовують відновлювані джерела енергії та УЗЕ	Участь у державних і міжнародних програмах, консультування клієнтів щодо доступних механізмів підтримки
Технологічний розвиток УЗЕ	Поява нових батарейних технологій, інверторів та систем керування з покращеними характеристиками	Інтеграція нових технологій у продуктові рішення, регулярне оновлення технічної платформи
Розширення міжнародного ринку	Попит на рішення з УЗЕ у країнах, що активно впроваджують децентралізовану енергетику	Адаптація продукту до міжнародних стандартів, вихід на зовнішні ринки через партнерів
Розвиток партнерської екосистеми	Співпраця з виробниками обладнання, енергетичними компаніями та сервісними організаціями	Формування стратегічних партнерств, створення спільних проєктів та обмін технологічним досвідом

Узагальнення умов конкуренції здійснено за моделлю п'яти сил М. Портера, результати аналізу наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі установок зберігання енергії за М. Портером

Складові аналізу	Висновки
Загроза появи нових гравців	Низька–середня через високу технологічну складність УЗЕ, необхідність інженерної експертизи, дотримання вимог безпеки та сертифікації
Сила постачальників	Висока, оскільки компанія залежить від постачання батарейних модулів, інверторів і силової електроніки, проте диверсифікація постачальників зменшує ризики
Сила покупців	Середня, оскільки підприємства зацікавлені у зниженні витрат і підвищенні енергоефективності, але цикл прийняття інвестиційних рішень є тривалим
Загроза від продуктів-замінників	Низька, оскільки альтернативні рішення (дизель-генератори, збільшення договірної потужності) не забезпечують аналогічної гнучкості та економічного ефекту
Інтенсивність конкуренції	Помірна, більшість конкурентів працюють у сегменті окремих компонентів або індивідуальних проєктів без типових інтегрованих рішень

Подальший аналіз спрямовано на визначення ключових факторів конкурентоспроможності, що наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності стартап-проєкту з установок зберігання енергії

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Зниження витрат клієнтів	Використання УЗЕ дозволяє згладжувати пікові навантаження, зменшувати споживання електроенергії у періоди високих тарифів та підвищувати рівень самоспоживання електроенергії від СЕС
Простота інтеграції	Установка зберігання енергії пропонується як готове модульне рішення з попередньо налаштованими алгоритмами керування, що скорочує терміни впровадження та знижує інженерні витрати

Продовження таблиці 4.10

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Надійність та стабільність роботи	Система забезпечує стабільну роботу електропостачання підприємства, зменшує вплив пікових навантажень і підвищує передбачуваність енергоспоживання
Гнучкість адаптації до об'єкта	Модульна архітектура УЗЕ дозволяє адаптувати рішення до різних профілів навантаження, масштабів підприємств та режимів роботи сонячної електростанції
Підтримка та сервісне обслуговування	Наявність технічної підтримки та можливість коригування алгоритмів керування під конкретні умови експлуатації підвищують довіру клієнтів до продукту
Енергоефективність	Оптимізація режимів заряджання та розряджання УЗЕ сприяє зменшенню втрат електроенергії та підвищенню загальної енергоефективності енергосистеми підприємства

На завершальному етапі аналізу ринкових можливостей виконано SWOT-аналіз, результати якого наведено в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проєкту з установок зберігання енергії

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Інтегроване рішення на базі установок зберігання енергії, адаптоване до профілю навантаження підприємства;</li> <li>– Зниження витрат клієнтів за рахунок згладжування пікових навантажень і підвищення самоспоживання СЕС;</li> <li>– Модульна структура та простота інтеграції в існуючі системи електропостачання;</li> <li>– Гнучкість налаштування алгоритмів керування під конкретні умови експлуатації;</li> <li>– Відповідність сучасним тенденціям децентралізованої та «зеленої» енергетики</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Залежність від постачальників батарейних модулів, інверторів та силової електроніки;</li> <li>– Висока початкова вартість УЗЕ для частини потенційних клієнтів;</li> <li>– Недостатня обізнаність споживачів щодо переваг систем зберігання енергії;</li> <li>– Потреба у кваліфікованому сервісному та інженерному супроводі</li> </ul>

Продовження таблиці 4.11

Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Зростання ринку установок зберігання енергії у комерційному та промисловому секторі;</li> <li>– Підвищення тарифів на електроенергію та впровадження погодинного обліку;</li> <li>– Державна та міжнародна підтримка відновлюваної енергетики та енергоефективних рішень;</li> <li>– Розвиток сонячної генерації та мікромереж;</li> <li>– Можливість виходу на міжнародні ринки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Вихід на ринок великих міжнародних компаній з аналогічними рішеннями;</li> <li>– Нестабільність економічної ситуації, що впливає на інвестиційні рішення підприємств;</li> <li>– Регуляторні та законодавчі зміни у сфері електроенергетики;</li> <li>– Ризики зростання вартості компонентів або порушення ланцюгів постачання;</li> <li>– Консервативність частини споживачів щодо впровадження нових технологій</li> </ul>

SWOT-аналіз свідчить, що стартап-проект з установок зберігання енергії має значний потенціал розвитку завдяки актуальності запропонованого рішення, його відповідності сучасним тенденціям децентралізованої енергетики та зростаючому попиту на оптимізацію енергоспоживання у комерційному й промисловому секторі. Для успішної реалізації проекту доцільно зосередити увагу на зменшенні залежності від постачальників ключових компонентів, активному впровадженні демонстраційних проектів та інформаційній підтримці клієнтів, а також на постійному моніторингу регуляторних і економічних змін, що впливають на ринок електроенергії.

#### 4.4 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Перед впровадженням стартап-проекту доцільно визначити пріоритетні цільові групи потенційних споживачів, для яких використання установок зберігання енергії є найбільш економічно та технічно обґрунтованим. Аналіз цільових сегментів дозволяє оцінити рівень готовності споживачів до впровадження нових рішень, очікуваний попит, інтенсивність конкуренції та

складність виходу на відповідний ринок. Результати такого аналізу наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 - Вибір цільових груп потенційних споживачів стартап-проєкту з установок зберігання енергії

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживача прийняти товар	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Промислові підприємства з нерівномірним та піковим навантаженням	Висока	Високий	Низька	Середня
Підприємства з власними сонячними електростанціями	Висока	Високий	Середня	Середня
Комерційні об'єкти з великим денним споживанням електроенергії (ТЦ, логістичні центри)	Середня	Середній	Середня	Висока
Агропромислові комплекси з сезонним навантаженням	Середня	Середній	Низька	Середня
Малі та середні підприємства з обмеженим енергоспоживанням	Низька	Середній	Висока	Низька

Найперспективнішими цільовими споживачами є промислові та комерційні підприємства з нерівномірним або піковим характером електроспоживання, а також об'єкти з власними сонячними електростанціями, що зумовлено їх високою зацікавленістю у зниженні витрат на електроенергію та оптимізації енергоспоживання. У зазначених сегментах спостерігається відносно невисокий рівень конкуренції комплексних рішень, що робить їх пріоритетними для впровадження стартап-проєкту.

Середні перспективи розвитку має сегмент комерційних і агропромислових підприємств із сезонним або змінним навантаженням, де попит на установки зберігання енергії є стабільним, однак рівень конкуренції та вимоги до техніко-економічного обґрунтування є вищими.

Найменш перспективним на початковому етапі реалізації проєкту є сегмент малих і середніх підприємств з обмеженим енергоспоживанням через високу чутливість до вартості інвестицій та нижчу готовність до впровадження інноваційних енергетичних рішень.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки стартап-проєкту наведено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики і послуги конкурентів, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Пошук нових споживачів серед промислових та комерційних підприємств з піковим або нерівномірним електроспоживанням, а також об'єктів із власною ВДЕ	Ні, компанія формує комплексне інтегроване рішення з установкою зберігання енергії, адаптоване до умов конкретного споживача, без прямого копіювання існуючих продуктів	Стратегія інноваційного прориву, що базується на створенні та впровадженні унікального комплексного енергетичного рішення

Враховуючи результати аналізу цільових груп споживачів та базової стратегії конкурентної поведінки (таблиці 4.12–4.13), обирається стратегія позиціонування стартап-проєкту, наведена в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги цільової групи до продукту	Енергоефективність, зменшення пікових навантажень, стабільність електропостачання, простота інтеграції з існуючими енергосистемами
Базова стратегія розвитку	Інноваційний розвиток та активне впровадження комплексних рішень з установками зберігання енергії
Ключові конкурентоспроможні позиції проєкту	Унікальність інтегрованого рішення, зниження експлуатаційних витрат споживачів, гнучкість адаптації до профілю навантаження
Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію проєкту	Надійність, економічна ефективність, енергозбереження, технологічність, відповідність сучасним вимогам енергетичного ринку

#### Висновок до розділу 4

У межах даного розділу було розглянуто стартап-проєкт, спрямований на розробку та впровадження інтегрованих рішень з використанням установок зберігання енергії для підприємств із двигуновим електричним навантаженням. Проведений аналіз ідеї проєкту показав її технологічну здійсненність та відповідність сучасним тенденціям розвитку енергетичних систем, зокрема зростанню ролі відновлюваних джерел енергії та підвищенню вимог до енергоефективності споживачів.

Технологічний аудит підтвердив наявність необхідних технічних рішень і компонентів для реалізації проєкту, а також можливість їх інтеграції в модульну систему з подальшою адаптацією до умов конкретного об'єкта. Аналіз ринкових можливостей засвідчив наявність стійкого попиту на комплексні рішення, що дозволяють зменшити пускові струми електродвигунів, оптимізувати профіль навантаження та знизити витрати на електроенергію, особливо в умовах зростання тарифів і впровадження погодинного обліку.

Оцінка конкурентного середовища, виконана з використанням методів ступеневого аналізу, моделі М. Портера та SWOT-аналізу, показала відносно низький рівень конкуренції в сегменті готових інтегрованих рішень для вузької

цільової ніші, що створює сприятливі умови для виходу стартап-проєкту на ринок. Визначені фактори конкурентоспроможності та стратегія позиціонування дозволяють сформулювати чітку ринкову пропозицію, орієнтовану на надійність, економічну ефективність та простоту впровадження.

Загалом результати проведеного аналізу свідчать про доцільність реалізації стартап-проєкту та наявність передумов для його подальшого розвитку за умови врахування виявлених ризиків, активної роботи з потенційними споживачами та поступового розширення партнерської й технологічної бази.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано комплексне дослідження, спрямоване на аналіз та обґрунтування доцільності впровадження гібридних систем енергозабезпечення на базі сонячних електростанцій та установок зберігання енергії для комерційних і промислових споживачів з урахуванням сучасних умов функціонування енергетичних ринків і тарифного регулювання.

У ході роботи проаналізовано нормативно-правову, технічну та стандартизаційну базу інтеграції сонячних електростанцій і установок зберігання енергії до систем електропостачання споживачів. Розглянуто вимоги чинного законодавства України, а також міжнародні та галузеві стандарти, що регламентують паралельну роботу розподілених джерел генерації з електричними мережами, питання електробезпеки, сертифікації, кібербезпеки та експлуатації промислових УЗЕ.

Проведено аналіз основних технологій і конфігурацій установок зберігання енергії, включаючи літій-іонні, натрій-іонні, натрій-сірчані та редокс-ванадієві системи. Здійснено класифікацію УЗЕ за тривалістю розряду та режимами роботи, а також розглянуто основні схеми інтеграції УЗЕ в енергосистему підприємства (АС-з'єднання, DC-з'єднання, мікромережі, ВТМ та FTM конфігурації). Це дозволило визначити технічні переваги та обмеження різних архітектур залежно від профілю споживання і цілей експлуатації.

Для дослідження ефективності впровадження гібридної системи енергозабезпечення було обрано два типові промислові підприємства, що відрізняються масштабом виробничої діяльності та площею забудови. На основі доступної території обґрунтовано встановлену потужність сонячної електростанції, сформовано річні часові профілі електричного навантаження та змодельовано роботу системи з урахуванням добової і сезонної змінності споживання.

У роботі установка зберігання енергії розглядається як ключовий елемент гібридної системи, що забезпечує перерозподіл споживання електроенергії в

часі, згладжування пікових навантажень, підвищення частки самоспоживання сонячної генерації та зменшення залежності підприємства від зовнішньої електричної мережі. Обрані параметри УЗЕ за енергоємністю та встановленою потужністю відповідають сучасній практиці застосування літій-іонних систем у комерційному та промисловому секторі.

Проведено техніко-економічну оцінку ефективності впровадження УЗЕ з використанням показників TCO, LCOS, NPV та IRR. Показано, що економічна доцільність системи значною мірою залежить від профілю навантаження підприємства, тарифної структури та обраної стратегії керування заряджанням і розряджанням УЗЕ. Отримані результати підтверджують, що за умов погодинного обліку та зростання тарифів установка зберігання енергії є ефективним інструментом оптимізації витрат на електроенергію.

Окремо розглянуто ринкові аспекти впровадження подібних рішень, що стало підґрунтям для розробки стартап-проєкту, орієнтованого на комерційних і промислових споживачів. Проведений аналіз конкурентного середовища, потенційних загроз і можливостей підтверджує актуальність і перспективність інтегрованих рішень з використанням УЗЕ для підвищення гнучкості та енергоефективності систем електропостачання підприємств.

Загалом результати магістерської дисертації підтверджують, що впровадження гібридних систем енергозабезпечення з використанням сонячних електростанцій та установок зберігання енергії є технічно здійсненним і економічно обґрунтованим напрямом підвищення ефективності, надійності та адаптивності електропостачання комерційних і промислових споживачів в умовах трансформації енергетичного сектору.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Battery Energy Storage System (BESS) [Електронний ресурс]. – Flex Power Energy. – Режим доступу: <https://flex-power.energy/school-of-flex/battery-energy-storage-system-bess/> (дата звернення: 2025).
2. Battery Energy Storage Systems (BESS) [Електронний ресурс]. – EDINA. – Режим доступу: <https://www.edina.eu/power/battery-energy-storage-system-bess> (дата звернення: 2025).
3. Energy Storage Handbook / Sandia National Laboratories. – 2016. – Режим доступу: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/wp-content/uploads/2020/06/2016-ESHB-FINAL.pdf>
4. Electric Energy Storage Handbook / Sandia National Laboratories. – Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2015. – SAND2015-1002. – 390 p. – Режим доступу: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/SAND2015-1002.pdf>
5. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030 / IRENA. – Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2017. – 160 p. – Режим доступу: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf)
6. Utility-Scale Battery Storage [Електронний ресурс]. – NREL Annual Technology Baseline, 2024. – Режим доступу: [https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale_battery_storage)
7. Yaniv O. et al. Techno-economic assessment of battery energy storage systems // Journal of Energy Storage. – 2024. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950264024000078>
8. Wang Z., Shi L. Review of energy storage technologies // Journal of Energy Storage. – 2017. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17304437>
9. Technology Strategy Assessment: Sodium Batteries / U.S. Department of Energy. – Washington, 2023. – Режим доступу:

[https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/6\\_Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20%236%20Sodium%20Batteries\\_508.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/6_Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20%236%20Sodium%20Batteries_508.pdf)

10. Ali A. O. et al. Battery storage applications in modern grids // Journal of Energy Storage. – 2023. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23020911>

11. Defining Long-Duration Energy Storage [Електронний ресурс]. – NREL, 2021. – Режим доступу: <https://www.nrel.gov/grid/news/program/2021/an-evolving-dictionary-for-an-evolving-grid-defining-long-duration-energy-storage>

12. Cardenas P. A. et al. AC- and DC-coupled battery energy storage systems // Applied Energy. – 2022. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261922016713>

13. Wang Z., Shi L. Battery Management Systems for Energy Storage Applications // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 5. – Article 1250. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1250>

14. Total Cost of Ownership (TCO) [Електронний ресурс]. – IBM. – Режим доступу: <https://www.ibm.com/think/topics/total-cost-of-ownership>

15. Sanin-Villa D. et al. Levelized Cost of Storage: methodologies and applications // Energy Reports. – 2022. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221313882200683X>

16. Osman M. G. et al. Battery degradation and cycle life modeling // Journal of Energy Storage. – 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25012320>

17. Притискач І. та ін. Функціонування установок зберігання енергії на ринку допоміжних послуг // Вісник Кременчуцького НУ. – 2023. – № 3. – С. 118–131. – DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.14>

18. Про затвердження Правил користування електричною енергією : Постанова КМУ №1067 від 26.07.2015 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1067-2015-%D0%BF>

19. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України : Закон України №2163-VIII від 05.10.2017 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>
20. Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури : Постанова КМУ №518 від 19.06.2019 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF>
21. Ali A. O. et al. Cybersecurity challenges in energy storage systems // Energy. – 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544225041118>
22. Future development of energy storage systems // Energy Storage Materials. – 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008425000924>
23. Veremiichuk Y. A. et al. Prospects for autonomous low-power renewable energy communities // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1415. – 012120.
24. Prytytskach I. et al. Battery Energy Storage Systems: Enabling Ukraine's Grid Flexibility and Energy Security // Systems, Decision and Control in Energy VI. – Springer, 2024. – Vol. 552. – Pp. 3–36. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6>
25. RLM- und SLP-Zähler in Deutschland [Електронний ресурс]. – ЕНА. – Режим доступу: <https://www.eha.net/blog/details/rlm-zaehler-slp-zaehler.html>
26. Standardlastprofile Strom [Електронний ресурс]. – BDEW. – Режим доступу: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>
27. Веремійчук Ю. А., Опришко В. П., Притискач І. В., Ярмолюк О. С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. – Київ : КИЙ, 2020. – 186 с.
28. Yaniv O. et al. Battery health estimation methods // Journal of Energy Storage. – 2024;
29. Wang Z., Shi L. State estimation of lithium batteries // Electronics. – 2025;

30. Ali A. O. et al. Battery diagnostics and monitoring // Journal of Energy Storage. – 2022.
31. Cárdenas P. A. et al. Sustainable energy storage systems // Sustainability. – 2023;
32. Veremiichuk Y. et al. Optimal generation structure within sustainable energy communities demand // Proc. IEEE RTUCON. – Riga, 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1109/RTUCON60080.2023.10413185>
33. Веремійчук Ю. А. та ін. Оптимізація процесів розподілу електроенергії в системі електропостачання енергетичної спільноти // Праці ІЕД НАН України. – 2023. – Вип. 66. – С. 77–83. – DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.077>
34. Sanin-Villa D. et al. Energy storage economics // Sci. – 2025;
35. Osman M. G. et al. Battery performance assessment // Sustainability. – 2025.
36. Про ринок електричної енергії : Закон України №2019-VIII. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2046-20>
37. Long-duration energy storage systems // Renewable Energy. – 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125022955>
38. IEC 62933-1-1: Electrical energy storage systems – Safety requirements. – IEC, 2018.
39. Advanced battery control strategies // Energy Storage. – 2025. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511725000258>
40. Energy storage integration in power systems // IET Energy Systems Integration. – 2024. – Режим доступу: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/esi2.12166>
41. Battery thermal management systems // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271418304839>

42. Battery safety and standards // Batteries. – 2024. – Vol. 10, No. 12. – Article 418. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/12/418>

43. Energy storage control methods // Journal of Energy Storage. – 2025. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25022789>

44. Battery energy management strategies // Journal of Energy Storage. – 2024. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24009459>