

**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 \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
**освітньо-наукова програма Енергетичний менеджмент, електропостачання та інжиніринг електротехнічних комплексів**

**на тему: «Оптимізація режимів роботи локальної електроенергетичної системи з розосередженими енергетичними ресурсами»**

Виконав: студент II курсу, групи ГН-31мн

\_\_\_\_\_ Тарасенко Георгій Олегович \_\_\_\_\_  
( прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Белоха Галина Сергіївна \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

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»

Освітньо-наукова програма «Енергетичний менеджмент, електропостачання та інжиніринг електротехнічних комплексів»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
***Тарасенка Георгія Олеговича***  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Оптимізація режимів роботи локальної електроенергетичної системи з розосередженими енергетичними ресурсами»

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Белоха Галина Сергіївна \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом по університету від 25 березня 2025 р. №1234-с

2. Строк подання студентом дисертації 16 травня 2025 року

3. Об'єкт дослідження: локальні електроенергетичні системи з сонячним генератором та системами зберігання..

4. Предмет дослідження: алгоритми оптимального режиму роботи локальної електроенергетичної системи за економічним критерієм..

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Провести аналітичний огляд та порівняльний аналіз сучасних методів секціонування розподільних мереж і підходів до оптимізації режимів у присутності розосередженої генерації та систем накопичення енергії. 2. Розробити математичні моделі генерації

відновлюваних джерел і акумуляційних систем із врахуванням їх динамічних та стохастичних характеристик. 3. Сформулювати загальну задачу оптимізації режимів розподільної мережі з критеріями мінімізації втрат та паливних витрат, дотриманням обмежень на потужність, напругу і баланс енергії, та реалізувати її розв'язок комбінованим алгоритмом LP-PSO. 4. Провести чисельні експерименти та верифікацію запропонованого підходу на прикладах практичних сценаріїв (захист мережі, розподіл розосередженої генерації, двосторонні потоки) з використанням пакета PS CAD і проаналізувати отримані результати.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження (алгоритми розрахунків та діаграми, листинги програмного коду)

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. Тесленко О.І., Белоха Г.С., Тарасенко Г.О. Напрями технологічної оптимізації локальної електроенергетичної системи з різнотиповою генерацією. Збірник робіт VIII міжнародної науково-практичної конференції “Scientific research: modern challenges and future prospects”.

2. О.І.Тесленко, Г.О.Тарасенко. Оптимізація технологічних структур локальних електроенергетичних систем. Збірник тез доповідей XXVI міжнародної науково-практичної онлайн - конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”.

8. Консультанти розділів дисертації

*Нормоконтроль*

*Прокопенко І.Д.*

9. Дата видачі завдання 10 березня 2025 року

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Грунтовне ознайомлення з предметною областю дослідження	з 10.03. по 14.03.25	
2	Визначення структури магістерської дисертації; вивчення літератури, пошук додаткової літератури	з 15.03 по 19.03.2025	
3	Робота над першим розділом магістерської дисертації; проведення наукового дослідження	з 19.03. по 28.03.2025	
4	Проведення наукового дослідження; робота над другим розділом магістерської	з 29.03. по 09.04.2025	

	дисертації		
5.	Проведення наукового дослідження; робота над статтею за результатами наукового дослідження	З 10.04. по 17.04.2025	
6.	Проведення наукового дослідження; робота над третім розділом магістерської дисертації; підготовка матеріалів доповіді на конференції	З 18.04. по 25.04.2025	
7.	Робота над четвертим розділом магістерської дисертації; підготовка ілюстративного матеріалу;	З 26.04.2025 по 07.05.2025	
8.	Оформлення текстової і графічної частини магістерської дисертації, оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	З 07.05. по 16.05.2025	
9.	Захист дисертації	20.05.2025	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

**Структура і об'єм роботи.** Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Обсяг роботи – 105 сторінок основного тексту, містить 23 рисунків, 5 таблиць. Список використаних літературних джерел налічує 44 найменування.

**Актуальність.** Інтеграція розосередженої генерації з відновлюваних джерел і накопичувачів в розподільні мережі при побудові локальних електроенергетичних систем вимагає нових підходів до оптимізації режимів для мінімізації втрат, зниження паливних витрат та забезпечення надійності й якості електропостачання.

**Мета і задачі дослідження.** Розробити стратегію керування локальної електроенергетичною системою на основі правил при оптимізації за економічним критерієм.

**Об'єктом дослідження.** Локальні електроенергетичні системи з сонячним генератором та системами зберігання.

**Предметом дослідження** є алгоритми оптимального режиму роботи локальної електроенергетичної системи за економічним критерієм.

**Методи дослідження.**

- Математичне моделювання ВДЕ та систем зберігання енергії;
- Мета-евристика PSO;
- Імітаційне моделювання;
- Методи лінійного програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- Вдосконалено алгоритм для оптимізації мінімуму втрат мережі та паливних витрат.
- Розроблено стратегію керування режимами роботи локальної системи на основі правил з використанням у системі декількох систем накопичення енергії, що дозволило максимально використовувати енергію відновлюваних джерел та ефективно використання систем зберігання.

**Практична цінність**

- Використання запропонованої стратегії керування при проектуванні локальних систем дозволить максимально використати енергію відновлюваних джерел для задоволення потреб навантаження та з врахуванням зміни цін на електроенергію мережі.
- Використання алгоритмів диспетчерського керування двосторонніми потоками в ІЕС 61850-системах.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дослідження були представлені на науково-практичних конференціях: VIII міжнародна науково-практична конференція “Scientific research: modern challenges and future prospects” та XXVI міжнародна науково-практична онлайн - конференція “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”.

#### **Публікації.**

1. Тарасенко Г. О., Белоха Г. С., Тесленко О. І. Напрями технологічної оптимізації локальної електроенергетичної системи з різнотиповою генерацією. с. 196. Збірник робіт VIII міжнародної науково-практичної конференції “Scientific research: modern challenges and future prospects”. с. 196.
2. О.І.Тесленко, Г.О.Тарасенко. Оптимізація технологічних структур локальних електроенергетичних систем. Збірник тез доповідей XXVI міжнародної науково-практичної онлайн - конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”.

Ключові слова: МІКРОМЕРЕЖА, РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ, МІНІМІЗАЦІЯ ВТРАТ, LP-PSO.

## ABSTRACT

**Structure and scope of the work.** The master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, and appendices. The total length of the thesis is 105 pages of main text, containing 23 figures and 5 tables. The list of references includes 44 sources.

**Relevance.** The integration of distributed generation from renewable sources and storage systems into distribution networks in the construction of local energy systems requires new approaches to optimizing operational modes to minimize losses, reduce fuel costs, and ensure the reliability and quality of power supply.

**Aim and Objectives of the Research.** To develop a control strategy for a local energy system based on rule-based optimization according to an economic criterion.

**The object of the research.** Local energy systems with solar generators and storage systems.

**The subject of the research is** the algorithms for optimal operation modes of local energy systems according to an economic criterion.

### **Research Methods.**

- Mathematical modeling of RES and energy storage systems;
- PSO meta-heuristics;
- Simulation modeling;
- Linear programming methods.

### **Scientific Novelty of the Results.**

- The algorithm for optimizing network loss minimization and fuel cost reduction has been improved.

- A rule-based control strategy for local system operation modes has been developed, using multiple energy storage systems, which enabled maximum utilization of renewable energy and efficient use of storage systems.

### **Practical Value.**

- The use of the proposed control strategy in designing local systems will maximize the use of renewable energy to meet load demands while considering changes in grid electricity prices.
- Use of dispatch control algorithms for bidirectional flows in IEC 61850-based systems.

### **Approbation of the Thesis Results.**

The research results were presented at scientific and practical conferences: the 8th International Scientific and Practical Conference “Scientific research: modern challenges and future prospects” and the 26th International Online Conference “Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century”.

### **Publications.**

1. Tarasenko G. O., Bielokha H. S., Teslenko O. I. Directions for technological optimization of a local energy system with diverse generation. p. 196. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference “Scientific research: modern challenges and future prospects”. p. 196.
2. O.I. Teslenko, G.O. Tarasenko. Optimization of technological structures of local energy systems. Proceedings of the 26th International Online Conference “Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century”.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
1 АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ВИРШЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
1.1 Методи оптимізації, що застосовуються до енергетичних систем.....	15
1.2 Оцінка стану електроенергетичних систем на основі історичних даних .....	28
1.3 Пом'якшення впливу атак на енергосистему .....	33
Висновки до розділу 1 .....	39
2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ВИРШЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	40
2.1 Комплексна оцінка елементів накопичення енергії в гібридних енергетичних системах для оптимізації енергетичних резервів .....	40
2.2 Огляд оптимізації накопичення енергії в акумуляторах у забудованому середовищі .....	49
Висновки до розділу 2 .....	59
3 ВИРШЕННЯ ПРИКЛАДНИХ РОЗРАХУНКОВИХ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	60
3.1 Захист розподіленої генерації: проблеми та рішення .....	60
3.2. Розв'язання задачі розподілу розподіленої генерації за допомогою нового методу.....	68
Висновки до розділу 3 .....	75
4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ .....	76
4.1 Стратегії керування локальними електроенергетичними системами на основі правил.....	76
4.2 Стратегія оптимального керування режимами .....	80
4.3 Дослідження режимів роботи. ....	82
4.4 Математичне моделювання та розробка алгоритму керування двонаправленим потоком потужності.....	87
Висновки до розділу 4 .....	95
ВИСНОВКИ.....	97
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АРМ – активна розподільча мережа

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ЗВ – зелений водень

ЕС – енергетична система

кВАР – кіловар, позасистемна одиниця вимірювання реактивної потужності

ЛЕС – локальна енергетична система

ПЕР – розподілені енергетичні ресурси

РГ – розподілена генерація

СНАЕ – системи накопичення електричної енергії

ЦСР – цілі сталого розвитку

AI – artificial intelligence, штучний інтелект

BESS – battery energy storage systems, системи акумуляторного накопичення енергії

BMS – battery management system, система управління акумуляторами

CAPEX – capital expenditure, капітальні витрати

CES – citizen energy storage, громадське накопичення енергії

DG – distributed generation, розподілена генерація

DOD – depth of discharge, глибина розряду

EMS – energy management system, система управління енергією

EV – electric vehicle, електричний транспортний засіб

FCL – fault current limiter, обмежувач струму короткого замикання

FLISR – fault location, isolation, and service restoration, ізоляція місця несправності та відновлення електропостачання

HESS – hybrid energy storage system, гібридна система накопичення енергії

HV – high voltage, висока напруга

LV – low voltage, низька напруга

MATLAB – прикладне програмне забезпечення для моделювання

MESS – mechanical energy storage systems, системи механічного накопичення енергії

MG – microgrid, мікромережа

NERC – North-American Electric Reliability Corporation

OPEX – operational expenditure, операційні витрати

OTEC – ocean thermal energy conversion, система перетворення теплової енергії океану

PCC – power control center, центр управління електроенергією

PCS – power conversion system, система контролю стану живлення

PHS – pumped hydro storage, гідроаккумуляція

PV – photovoltaic system, фотоелектрична система

ROI – return on investment, рентабельність інвестицій

RTU – remote terminal unit, пристрій дистанційного керування

SCADA – Supervisory control and data acquisition, диспетчерське управління і збір даних

SOS – symbiotic organism search, алгоритм

TOU – time of use, тарифи на основі часу використання

VPP – virtual power plant, віртуальна електростанція

H<sub>2</sub> – водень

CO<sub>2</sub> – вуглекислий газ

°C – градус Цельсія

## ВСТУП

Зі зростанням інтеграції технологій розподіленої генерації (РГ) та інтелектуальних мереж, потреба в підвищеній надійності та ефективності енергосистем стає все більш важливою. Енергетична система переходить від традиційної централізованої та регульованої мережі передачі до дерегульованої структури, яка включає різні типи розподіленої генерації в мережі. Ця структура, що розвивається, відома як «активна розподільча мережа», що характеризується інтеграцією нових технологій для адаптації до динамічних середовищ та підтримки концепцій «розумної мережі». Розумну мережу можна визначити з різних точок зору, але загалом вона стосується двонаправленого потоку електроенергії та інформації між пропозицією та попитом. Основними цілями розумних мереж є сприяння інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищення надійності та ефективності системи. Розподілені енергетичні ресурси (РЕР), що охоплюють розподілену генерацію (РГ), системи накопичення енергії (СНА) та керовані навантаження, є ефективним методом підвищення надійності системи розподілу електроенергії та якості електроенергії. Однак ефективна інтеграція РЕР вимагає ретельного розгляду існуючих схем захисту, механізмів регулювання напруги, операцій перемикавання фідерів та інших обмежень в енергосистемі.

Було проведено широке дослідження оптимізованого розміщення розподілених систем накопичення енергії для підвищення надійності та стійкості систем розподілу електроенергії. Під час планування системи накопичення енергії одним з головних міркувань є енергетичні потреби застосування. Загалом, потреба в енергії, пов'язана з конкретними застосуваннями, такими як скидання навантаження, визначає розмір і складність необхідної системи накопичення. Зі збільшенням енергетичних потреб система накопичення повинна масштабуватися відповідно, включаючи передові конструкції та технології для забезпечення більшої ємності та надійної роботи. Тому необхідно проаналізувати такі фактори, як номінальна потужність навантаження, що живиться, вимоги до напруги та

струму цього навантаження, а також будь-які додаткові навантаження, які можуть бути підключені до тієї ж системи накопичення. Крім того, необхідно враховувати такі речі, як втрати ефективності з часом та можливі резервні джерела на випадок, якщо основне електропостачання стане недоступним. Розуміючи ці критичні фактори, можна розробити систему накопичення, яка відповідає як поточним потребам, так і майбутньому потенціалу зростання, оскільки бізнес або організація продовжує розширюватися.

Існує багато різних факторів, які впливатимуть на енергетичні потреби систем зберігання енергії, такі як тип технології, частота її використання та тривалість зберігання енергії. Під час проектування системи зберігання енергії необхідний комплексний аналіз усіх відповідних змінних, щоб забезпечити вибір рішення, яке ефективно відповідає як поточним експлуатаційним вимогам, так і очікуваним майбутнім потребам.

Метою роботи є дослідження та класифікація особливостей технологій РГ та їх комбінацій щодо гарантованого електропостачання споживачів в умовах ЛЕС.

Матеріали та методи. В роботі застосовувався метод системного аналізу техніко-економічних показників сучасних апробованих технологій РГ із використанням джерел науково – технічної інформації.

# 1 АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Методи оптимізації, що застосовуються до енергетичних систем

Сучасна енергосистема – це складна мережа взаємопов’язаних компонентів, таких як генератори, лінії електропередачі та розподільчі підсистеми, призначені для ефективного та надійного постачання електроенергії споживачам. Ці системи використовують передові технології та системи керування для моніторингу та управління потоками електроенергії, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), впровадження систем інтелектуальних мереж та використання передових методів прогнозування та оптимізації для забезпечення стабільності та безпеки мережі. Метою сучасних енергосистем є забезпечення сталого та надійного джерела електроенергії, яке задовольняє потреби зростаючого населення, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище та зменшуючи витрати.

Енергетична система потребує прогнозів, які передбачають майбутній попит на електроенергію, виробництво електроенергії з ВДЕ, а також метеорологічних даних, важливих для споживчого попиту та рівня виробництва з ВДЕ. Точне прогнозування забезпечує ефективну роботу енергосистем будь-якого розміру, включаючи мікромережі. Воно необхідне для оптимізації енергетичного балансу, управління накопиченням енергії, гідротермальної координації, планування резервів палива, планування імпорту та експорту електроенергії, а також оцінки безпеки. Воно також має вирішальне значення на конкурентних енергетичних ринках, оскільки ціни на електроенергію значною мірою залежать від попиту на електроенергію та енергетичних балансів. Таким чином, точне прогнозування є фінансово вигідним для всіх учасників енергетичного ринку.

Різноманітність можливих конфігурацій локальних енергосистем визначається доступними ресурсами, технологічними обмеженнями та структурою енергоспоживання. Джерела розподіленої генерації можна поділити на дві основні групи за критерієм гарантованого виробництва електроенергії генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): сонячні, вітрові та гідроелектростанції, яка

має мінливий (стохастичний) характер та залежить від метеорологічних умов, часу доби, сезону року тощо, а також генерація з гарантованим виробництвом електроенергії з використанням двигунів внутрішнього згорання, газових та парових турбін різних термодинамічних циклів, які зазвичай використовують викопні види палива та біомасу (рис.1).

Джерела живлення ЛЕС забезпечують балансування електропостачання споживачів. Ці джерела складаються з одного типу джерела енергії або декількох типів джерел: дизель-генератори (ДГ), сонячні електричні установки (СЕУ), вітроенергетичні установки (ВЕУ) з резервним акумулятором або без нього.

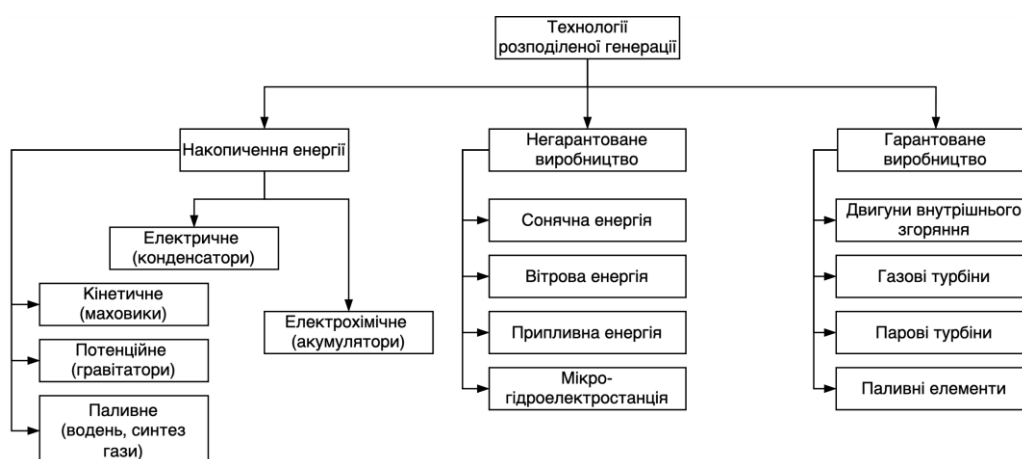


Рисунок 1.1 - Технології розподіленої генерації

Основні архітектури ЛЕС складають:

Вітро-сонячні системи поєднують сонячні електричні установки та вітроенергетичні установки, що забезпечує певний рівень компенсації коливань генерації залежно від змін метеорологічних умов. Синергетичний ефект досягається завдяки їхній комплементарності: вітрова генерація домінує в нічний час та під час непогоди, тоді як сонячна - у ясні дні з високою інсоляцією [1, 2].

Вітро-сонячні системи характеризуються високим потенціалом розвитку, особливо в регіонах із змінними кліматичними умовами, де один з джерел енергії може компенсувати нестачу іншого. У таких системах ключовим питанням

залишається ефективно прогнозування генерації та інтеграція із системами накопичення енергії.

Вітро-сонячні системи з дизель-генератором. Інтеграція дизель-генератора в такі системи забезпечує додаткову гнучкість у випадках недостатньої генерації з ВДЕ. Це особливо актуально для ізольованих мікромереж, де відсутній доступ до загальної енергетичної інфраструктури [1]. ДГ відіграє стабілізуючу роль, забезпечуючи енергопостачання в умовах несприятливих погодних умов або раптового зростання навантаження. Однак, слід зазначити, що експлуатація дизель-генераторів супроводжується високими витратами на пальне та негативним екологічним впливом.

Вітро-сонячні системи із системою зберігання енергії. Додавання акумуляторних батарей (АБ) дозволяє балансувати енергетичні потоки, накопичуючи надлишкову генерацію та забезпечуючи безперебійне електропостачання під час пікових навантажень або дефіциту генерації. Такі системи забезпечують підвищену автономність та покращену адаптивність до змінних умов експлуатації [2, 3].

Вітро-сонячно-дизельні системи з акумуляторами. Дана конфігурація є високоефективною завдяки можливості мінімізувати використання дизельного пального шляхом пріоритетного використання ВДЕ у поєднанні із системою зберігання енергії. В результаті досягається оптимізація експлуатаційних витрат та зниження екологічного навантаження. Такий підхід дозволяє підвищити загальну ефективність системи та забезпечити більш стабільне енергопостачання [1, 2].

Окремо відзначимо застосування дизель-генератора як гарантованого джерела живлення у локальних системах. Основна роль як головне джерело живлення у віддалених районах без централізованої електромережі або для військових цілей, як резервне джерело – для компенсації дефіциту потужності в умовах низької генерації ВДЕ, а також для регулювання частоти та напруги в автономних системах.

Експлуатація дизель-генераторів, хоча і забезпечує надійність, супроводжується високими експлуатаційними витратами та екологічним впливом у вигляді викидів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  та інших забруднюючих речовин. Таким чином, інтеграція дизель-генераторів із ВДЕ потребує ретельного аналізу економічної доцільності [1].

Системи зберігання відіграють ключову роль у стабілізації локальних енергосистем, виконуючи такі функції:

- Акумуляція надлишкової енергії ВДЕ;
- Компенсація навантажувальних дисбалансів;
- Оптимізація роботи дизель-генераторів - їхня робота в оптимальному режимі дозволяє зменшити витрати пального та підвищити довговічність обладнання.

Для максимізації економічних та технічних переваг складових (генератори, системи зберігання навантаження) ЛЕС повинні мати систему керування енергією, яка не тільки узгоджує роботу елементів ЛЕС, реалізує режими роботи а також оптимізує роботу ЛЕС за окремими технічними, економічними, екологічними критеріями або їх комбінацією при багатокритеріальній оптимізації.

Актуальність дослідження оптимізації електроенергетичних систем зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання ресурсів, інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та впровадження інноваційних підходів до управління мережами. Розвиток сучасних енергетичних систем супроводжується зростаючими вимогами до стабільності, гнучкості та економічної доцільності експлуатації, що зумовлює необхідність застосування методів оптимізації для покращення їхньої продуктивності.

Оптимізація електроенергетичних систем може бути класифікована за кількома основними напрямками, зокрема економічна, надійності та екологічна оптимізація. Кожен із цих підходів має власні критерії ефективності та методи реалізації.

Основні напрями оптимізації ефективності локальних енергосистем наведені на рис.1. 2. Також поширення відновлювальних технологій як цільова функція в ЛЕС сприятиме зниження рівня забруднень та мінімізації витрат.

Підвищення ефективності функціонування локальних енергосистем досягається за рахунок використання сучасних алгоритмів оптимального керування, які включають:

- Прогнозування динамічного ціноутворення – адаптивне встановлення тарифів відповідно до генерації ВДЕ;
- Інтелектуальне управління зарядом/розрядом акумуляторів;
- Оптимізація режимів роботи дизель-генераторів для зниження витрат пального та підвищення ККД [1-3].

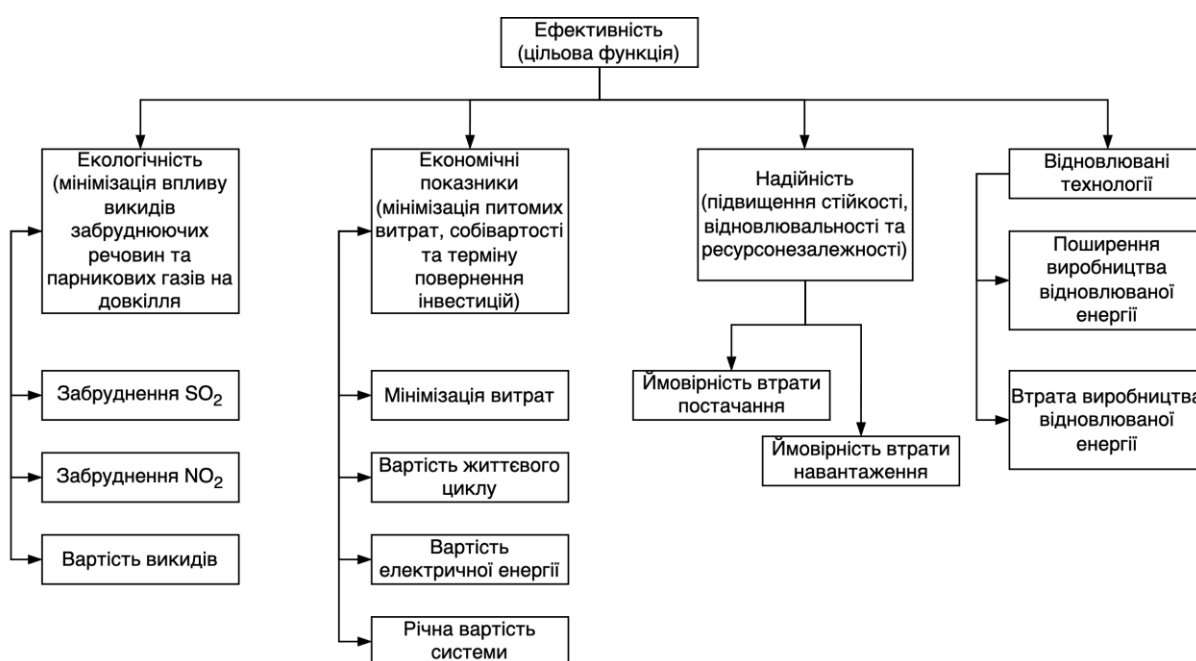


Рисунок 1.2 - Схема оптимізації ефективності локальних енергосистем за напрямками

Розглянемо основні напрями оптимізації електроенергетичних систем, їх особливості, варіанти цільових функцій та ключові сфери застосування.

Оптимізація за економічними показниками. Економічна оптимізація орієнтована на мінімізацію витрат, пов'язаних із виробництвом, передачею та розподілом електроенергії. Вона відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку енергетичних компаній та ефективного використання енергетичних ресурсів.

Основними критеріями оптимізації є:

- Мінімізація операційних витрат: врахування витрат на паливо, технічне обслуговування, амортизацію обладнання.
- Оптимізація структурних інвестицій: вибір ефективних варіантів розвитку інфраструктури з урахуванням прогнозованих навантажень.
- Мінімізація втрат енергії у мережі: забезпечення раціонального розподілу енергії та зменшення трансформаційних втрат.
- Оптимальне ціноутворення: розробка моделей тарифікації, що враховують сезонні коливання попиту та витрати на виробництво.

Оптимізація за показниками надійності. Оптимізація надійності має на меті підвищення стійкості системи до аварійних ситуацій та зменшення частоти відмов обладнання. Основні напрямки включають:

- Мінімізація ризиків виходу з ладу критичних елементів: використання методів оцінки надійності та аналізу відмов.
- Оптимальне розподілення резервних потужностей: впровадження механізмів балансування енергетичних потоків.
- Автоматизоване керування режимами роботи: інтеграція алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування та запобігання порушенням роботи мережі.
- Оптимізація графіків обслуговування обладнання: розрахунок найкращих інтервалів профілактичного обслуговування на основі даних про деградацію компонентів.

Оптимізація за екологічними параметрами. Екологічна оптимізація спрямована на зменшення негативного впливу енергетичних систем на довкілля. Основні напрямки включають:

- Мінімізацію викидів парникових газів: розрахунок оптимальних режимів експлуатації генераторів для зниження рівня забруднення.

- Максимізацію використання відновлюваних джерел енергії: розробка стратегій інтеграції ВДЕ у систему із забезпеченням стабільності електропостачання.
- Оптимізацію використання ресурсів: управління витратами на виробництво електроенергії з урахуванням екологічних стандартів.
- Запровадження циркулярної економіки: рециклінг матеріалів та оптимізація утилізації побічних продуктів енергетичних процесів.

Поширення відновлювальних технологій в ЛЕС сприяє розвитку активних споживачів. Установка невеликих відновлювальних джерел в ЛЕС у окремих споживачів, дає їм змогу не тільки використовувати енергію для власних потреб, а ще прододати її. Розвитку енергетичних спільнот. З екологічної точки зору зменшує залежність від основної мережі на викопному паливі. Але мінливість ВДЕ потребує додаткових рішень в ЛЕС, а також потребують оптимізації режимів роботи, для використання усієї виробленої енергії.

Оптимізаційні підходи знаходять широке застосування у різних сферах електроенергетики, зокрема:

- Розподільчі електромережі: задля підвищення ефективності управління навантаженнями та вдосконалення системи керування потоками енергії.
- Мікромережі та автономні енергосистеми: інтеграція децентралізованих енергетичних ресурсів, оптимізація локального балансування потужностей.
- Енергетичні ринки: розробка стратегій оптимального ціноутворення, управління попитом та пропозицією.
- Інтелектуальні системи управління: впровадження методів машинного навчання для прогнозування та коригування енергетичних режимів.
- Транзактивні енергосистеми: децентралізовані моделі управління, що базуються на технологіях розподілених реєстрів (наприклад, блокчейн).

Метою оптимізації енергосистем є ефективне використання доступних ресурсів для досягнення цільового результату, такого як зниження витрат, підвищення ефективності або підвищення надійності. Оптимізація енергосистем

передбачає пошук оптимальних умов роботи для системи з урахуванням таких обмежень, як потужність обладнання, ціни на енергію та вимоги до надійності системи. Це вимагає врахування широкого спектру факторів, включаючи прогнози виробництва та попиту на енергію, профілі навантаження та доступність накопичувачів енергії та інших ресурсів. Типовими проблемами оптимізації в енергосистемах є фіксація потужності блоку та оптимальний потік потужності. Фіксація потужності блоку – це процес планування доступних генеруючих блоків для задоволення очікуваного навантаження найекономічнішим способом. Це включає визначення того, які генератори експлуатувати, їхньої вихідної потужності та графіків запуску та вимкнення протягом заданого періоду часу. Оптимальний потік потужності – це процес пошуку оптимальних налаштувань для керованих пристроїв в енергосистемі, таких як генератори, трансформатори, пристрої реактивної потужності та комутатори, щоб мінімізувати витрати на виробництво та передачу електроенергії в системі, одночасно задовольняючи системні обмеження, такі як баланс потужності, межі стабільності мережі, межі передачі, межі напруги та межі експлуатації пристроїв.

Нагальна потреба запобігти зміні клімату та зменшити залежність від викопного палива спричиняє значні зміни в глобальному енергетичному середовищі. Як доступні та стійкі замітники традиційної енергії, відновлювані джерела енергії, особливо вітер та сонце, стали ключовими гравцями в цих змінах. Масштабна інтеграція вітрової та сонячної енергії в енергетичну систему значно ускладнена їх нестабільним характером, незважаючи на їхній величезний потенціал [1]. Ідея поєднання відновлюваної енергії з виробництвом зеленого водню викликала великий інтерес як рішення цієї проблеми. Зелений водень ( $H_2$ ), що генерується шляхом електролізу з відновлюваною енергією, діє як гнучкий носій енергії та середовище зберігання, дозволяючи розділити виробництво та використання енергії, а також зберігати надлишок чистої енергії для використання в періоди мінімального виробництва [2, 3]. Сучасні технологічні прориви та збільшення інвестицій у системи відновлюваної енергії спонукали до розробки

кількох рішень для інтеграції сонячної та вітрової енергії з системами зеленого  $H_2$ . Ці методи спрямовані на підвищення ефективності, надійності та економічної доцільності відновлюваних джерел енергії, а також сприяють досягненню ширших цілей скорочення викидів вуглецю та енергетичної безпеки [4]. Поєднання сонячної та вітрової енергії з виробництвом водню не лише враховує мінливий характер відновлюваних джерел енергії, але й має потенціал для створення гібридних енергетичних систем, які можуть функціонувати постійно та гнучко незалежно від змінних потреб в енергії та умов постачання.

Фаран Разі та Ібрагім Дінсер [5] об'єктивно розглянули кілька процесів виробництва сонячного  $H_2$  у своєму дослідженні, з акцентом на електричний, фотонний, тепловий та гібридний вибір енергії. У статті детально розглянуто ці методології, останні досягнення та ключові технології, а також схеми установок, що впливають на ціни виробництва  $H_2$ . Для проведення порівняльного дослідження використовуються вплив на навколишнє середовище, вартість та енергоефективність, а також індекси сталого розвитку. Дослідження виявляє, що високотемпературні енергетичні технології забезпечують вищу ефективність та вихід продукції, водночас є менш екологічно чистими, тоді як біохімічні та фотонні шляхи є більш сталими, але менш ефективними. Марсель та ін. [6] досліджували оптимізацію синтезу зеленого  $H_2$  з сонячної та вітрової енергії для отримання високотемпературного тепла для важкодоступних галузей промисловості Європи. Вони використовували геопросторовий аналіз для покращення визначення розмірів компонентів електростанцій, таких як фотоелектричні та вітрові електростанції, електролізери та гібридні накопичувачі, що поєднують стиснений  $H_2$  і літій-іонні акумулятори. Дослідження показало, що приведена вартість  $H_2$  (LCOH) коливалася від 3,5 до 8,9 євро/кг, причому регіони, багаті на вітроенергетику, мали найнижчі витрати. Оптимальне зберігання  $H_2$  може задовольнити промисловий попит протягом двох-трьох днів. Крім того, стабільний профіль попиту знизив витрати приблизно на 11%, і більшість сценаріїв досягли цільових показників ЄС щодо викидів.

Мохаммад Зогі та ін. [7] провели аналіз енергетичної, ексергетичної та ексергетично-економічної (3Е) ефективності різних систем, спрямованих на виробництво зеленого водню, а саме вітрових, сонячних ставків та систем перетворення теплової енергії океану (ОТЕС). Вони використовували тристоронній цикл (TLC) для покращення узгодження тепла в поєднанні з термоелектричним генератором (TEG) для ефективного відновлення відхідного тепла. Результати показали, що вітрові системи забезпечують найвищу ексергетичну ефективність у діапазоні від 5,8% до 10,47% при швидкості вітру від 8 до 12 м/с, одночасно зберігаючи найнижчу собівартість на рівні 66,08 доларів США/год. Однак система на основі сонячного ставка з градієнтом солоності (SGSP) є найбільш економічно ефективним варіантом для виробництва водню, при цьому витрати коливаються від 42,78 до 44,31 доларів США/ГДж. Це свідчить про значні економічні наслідки для майбутнього сталої енергетики. Хоча показники ефективності вітрових систем є похвальними, не можна ігнорувати загальну економічну перевагу, яку забезпечує система SGSP.

Було проведено комплексний аналіз можливостей відновлюваної енергетики у 27 країнах ЄС та Великій Британії, зокрема досліджуючи сонячну, вітрову, гідроенергетику та зелений водень. Дослідження визначило Австрію, Бельгію та Німеччину як лідерів у виробництві відновлюваної енергії; проте Німеччина виділяється як провідний виробник. Зелений водень, особливо в Німеччині та Франції, виконує вирішальну функцію як альтернативне паливо. Такі регіони, як Північна Швеція та Німеччина, визнані потенційними центрами зеленої електроенергії (це важливо, оскільки це підкреслює ринки, що розвиваються). Дослідження підкреслює необхідність балансування попиту та пропозиції, водночас наголошуючи на значному прогресі та відданості ЄС та Великій Британії цілям сталого розвитку в енергетичному секторі. Хоча проблеми залишаються, результати дослідження малюють багатообіцяючу картину для майбутніх енергетичних стратегій.

Науковці досліджували останні досягнення у виробництві зеленого водню (ЗВ) з використанням водних електролізерів, що працюють на відновлюваних джерелах енергії. Їхня увага охоплює сонячні, вітрові та гібридні системи. Вони провели комплексне дослідження різних типів електролізерів, приділяючи особливу увагу протонно-обмінним мембранам (ПОМВ) та лужним водним електролізерам (ЛВ). Примітно, що ПОМВ може досягти надзвичайного рівня чистоти водню 99,9999% поряд з чудовою щільністю струму. Аналіз витрат показує, що нормована вартість водню (СКВ), отриманого з енергії вітру для ПОМВ, коливається від 5,3 до 9,29 доларів США за кілограм; для порівняння, АВВ коливається від 7,49 до 7,59 доларів США за кілограм. Крім того, твердооксидні електролізери (ТОД) демонструють витрати від 6 до 9,34 доларів США за кілограм, з можливістю значного зниження до 1,9 доларів США за кілограм до 2050 року. Цей аналіз підкреслює, що швидкість вітру суттєво впливає на виробничі витрати ЗВ. Однак, взаємодія різних факторів ускладнює загальний сценарій, оскільки створює багатогранний ландшафт, який потребує ретельного розгляду.

Шібна та ін. [8] досліджували синергію між сонячними фотоелектричними (ФЕ) та вітровими системами для забезпечення енергією зеленої будівлі, розташованої в Раджастанському технічному університеті в Коті, Індія. Використовуючи алгоритм iNOGA, дослідники оптимізували гібридну систему, яка виробляє 6988 кВт·год/рік енергії, що ефективно задовольняє потреби будівлі в 6759 кВт·год (з мінімальним надлишком). Однак система зменшує втрати енергії до 276 кВт·год/рік та зменшує вражаючі викиди CO<sub>2</sub> на 5273,14 кг щорічно. Крім того, інтеграція цих відновлюваних джерел значно зменшує інші забруднювачі, зокрема, 9601,512 кг SO<sub>2</sub> та 32 424,32 кг NO<sub>x</sub> щороку, що підкреслює екологічні переваги цього підходу. Хоча результати є багатообіцяючими, дослідження закликає до подальших досліджень щодо оптимізації таких систем, оскільки потенціал для більшої ефективності та сталого розвитку залишається.

Джабраїл та ін. [9] представили систему, що базується на сонячній та вітровій енергії, для виробництва рідкого водню та аміаку – двох стійких енергоносіїв – що

задовольняють міські потреби в електроенергії, охолодженні, опаленні та прісній воді. У дослідженні оцінюються три сценарії: виключне виробництво рідкого водню, аміаку та подвійний підхід до виробництва. Штучна нейронна мережа сприяє прогнозуванню, а генетичний алгоритм оптимізує всю систему. При використанні 40% чистої потужності в електролізері система досягає енергетичних та ексергетичних показників 56,78% та 44,69% відповідно, виробляючи 13,2 МВт чистої потужності. Це поєднується зі значним виходом рідкого водню, аміаку, прісної води та навантаження на охолодження. Ексергетичний аналіз показує високі показники руйнування в циклі Ренкіна та електролізері. Однак оптимальні показники виробництва та ефективність визначені для сценарію подвійного виробництва, що підкреслює складність системи. Хоча результати є багатообіцяючими, необхідні подальші дослідження для підвищення продуктивності та сталості.

Зі зростанням світового попиту на енергію та виснаженням традиційних ресурсів, посилюється необхідність просування рішень у сфері чистої енергії. Це підкреслює критичну необхідність дослідження та розробки альтернативних відновлюваних джерел енергії, які можуть ефективно задовольнити зростаючі потреби в енергії [10]. Нещодавні досягнення в технологіях відновлюваної енергії, таких як сонячна, вітрова та біоенергетика, відкрили нові можливості для сталого виробництва енергії. Ці інновації мають потенціал для трансформації енергетичного ландшафту, забезпечуючи життєздатні та екологічно чисті альтернативи традиційному викопному паливу [11]. Використовуючи весь потенціал цих відновлюваних джерел, ми можемо працювати над створенням більш сталого та стійкого енергетичного майбутнього. На рисунку 1.1 наведено візуальне представлення тенденцій споживання енергії як у США, так і в усьому світі.

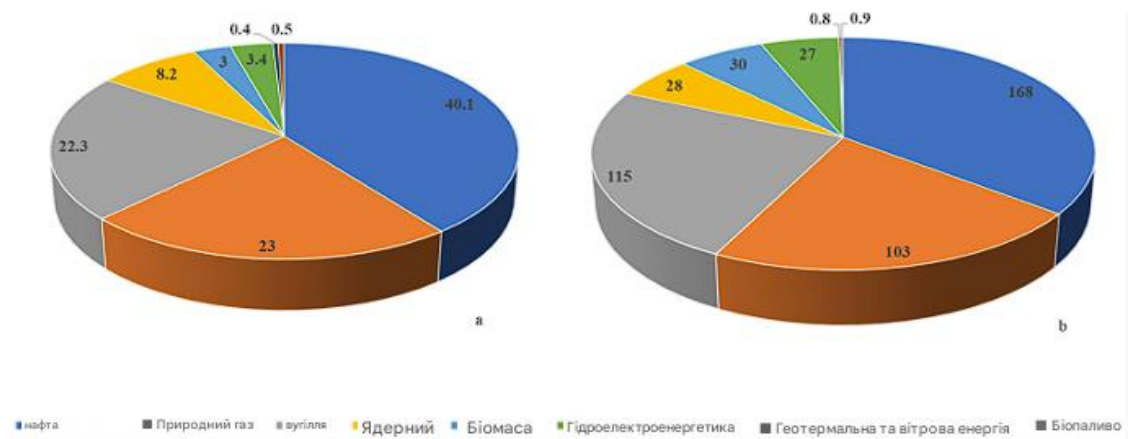


Рисунок 1.3 - Споживання викопного палива та сонячної енергії в (а) США та (б) у всьому світі в BTU (квадриллини = 10<sup>15</sup> BTU )

Для досягнення мети чистого енергетичного суспільства та вирішення глобальних кліматичних проблем до 2050 року, як це передбачає Міністерство енергетики США, вкрай важливо розробити стійкі та ефективні системи чистої енергії [12 , 13]. Цей шлях підкреслює необхідність фундаментального зрушення, зумовленого пошуком стійких та екологічно чистих альтернатив традиційній залежності від викопного палива. Сонячна та вітрова енергія мають вирішальне значення в переході до стійкої енергетичної системи, пропонуючи значні екологічні, економічні та технологічні переваги. Ці джерела, головним чином сонячна та вітрова, використовуються з природних процесів, що відбуваються на Землі. Промениста енергія сонця та безперервний рух вітру забезпечують невичерпну енергію, яка може задовольнити енергетичні потреби людства на невичерпний термін. Технологічний прогрес та дослідження ще більше сприяли впровадженню та інтеграції цих відновлюваних джерел енергії, роблячи їх все більш ефективними, економічно вигідними та доступними [14]. Згідно зі звітом ООН, ціни на технології відновлюваної енергетики швидко знижуються. Між 2010 і 2020 роками вартість електроенергії, виробленої з сонячної енергії, знизилася на 85%, тоді як витрати на наземну та морську вітрову енергетику знизилися на 56% та 48% відповідно. Це зниження цін підвищує привабливість відновлюваної енергії в усіх сферах, особливо для країн з низьким та середнім рівнем доходу, де

очікується більша частина нового попиту на електроенергію. Завдяки цьому зниженню витрат існує значна можливість для того, щоб значна частина нового енергопостачання в найближчі роки вироблялася з низьковуглецевих джерел. Ці відновлювані джерела енергії відіграють життєво важливу роль у зниженні викидів парникових газів та боротьбі зі зміною клімату, оскільки вони виробляють електроенергію, не покладаючись на викопне паливо. Серед них сонячна енергія виділяється своїм величезним потенціалом для виробництва відновлюваної енергії. Крім того, на відміну від інших відновлюваних джерел, таких як біомаса, які можуть мати певний негативний вплив на навколишнє середовище [15], відомо, що виробництво сонячної енергії не має шкідливого впливу на навколишнє середовище [16]. Ця відсутність викидів також зменшує забруднення повітря та води, що призводить до чистішого навколишнього середовища та покращення здоров'я населення.

Інтеграція сонячних та вітрових енергетичних систем набирає обертів як стратегія збалансування нестабільного характеру та географічних обмежень цих відновлюваних джерел. Такий підхід вирішує проблеми непередбачуваності та технічних обмежень, пов'язаних з кожною системою, роблячи їх більш надійними та життєздатними у більших масштабах. Наприклад, використання енергії вітру обмежене на певних ділянках через низьку швидкість вітру [17]. Таким чином, гібридні рішення максимізують їхню ефективність та надійність [18].

## **1.2 Оцінка стану електроенергетичних систем на основі історичних даних**

Загально визнаний вектор сталого розвитку вимагає фундаментальної зміни енергетичної політики та переходу на сталий енергетичний розвиток. Всесвітня комісія ООН з навколишнього середовища та розвитку (UN WCED) визначає сталий розвиток енергетики як «безпечний, екологічно безпечний та економічно вигідний енергетичний шлях, який підтримуватиме прогрес людства у віддаленому майбутньому». Можна виділити такі основні характеристики сталого розвитку

енергетики: (i) Його можна використовувати знову і знову, не наражаючи джерело на небезпеку виснаження, зникнення або втрати ресурсів; (ii) Він не шкодить нашому довкіллю; та (iii) Він доступний навколо нас і є безкоштовним. Вважається, що лише відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відносяться до сталого розвитку енергетики [19], тоді як викопне паливо є несталим джерелом енергії [20]. Отже, перехід до систем сталого розвитку енергетики означає повну відмову від останніх. Бем, Мозер, Пушнігг та Цаунер визначають систему сталого розвитку енергії наступним чином: у довгостроковій перспективі викопне паливо CO не викидається в атмосферу, а енергетична система повністю підтримується відновлюваними джерелами енергії [21]. Водночас створення системи сталого розвитку енергії спрямоване на вирішення енергетичної трилеми: енергетична безпека, енергетична справедливість та екологічна стійкість. Таким чином, забезпечення стійкості енергетичної системи передбачає пошук компромісу між економічними, соціальними та екологічними аспектами як невід'ємними частинами стійкості, без шкоди для різних аспектів складності системи.

Проблеми сталого розвитку енергосистеми пов'язані з цілями сталого розвитку (ЦСР), встановленими Організацією Об'єднаних Націй [11]. По-перше, електроенергія вважається пріоритетним та сучасним джерелом енергії для розвитку людства, яке покликане замінити інші. Тому соціальні проблеми пов'язані з ЦСР 1, 8 та 12, а їх досягнення передбачає подолання енергетичної бідності та забезпечення економічного зростання шляхом відповідального споживання енергії. По-друге, електроенергія є високостандартизованим, безпечним та екологічно чистим джерелом енергії. Економічні проблеми функціонування енергосистем пов'язані з Цілями 12 та 7, і тому їх вирішення спрямоване на забезпечення ефективного та чистого виробництва електроенергії відповідно до потреб споживачів. По-третє, виробництво електроенергії відповідає за понад 40% викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних з енергетикою. З цієї причини екологічні проблеми в першу чергу пов'язані з Ціллю 13 та вимагають скорочення викидів парникових газів від виробництва електроенергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства

(MEA), світ перейде до електрифікованої енергетичної системи, багатой на відновлювані джерела енергії, що призведе до зростання попиту на електроенергію з боку промисловості та домогосподарств, переходу на електроенергію для мобільності та відмови від котлів на викопному паливі для опалення; проте, водночас, це вимагає розвитку всіх форм гнучкості системи, таких як вдосконалення електричних мереж та цифрових технологій і технологій акумуляторного зберігання енергії. Все це визначає постійну зосередженість вчених на вирішенні проблем, пов'язаних зі стійкістю енергосистеми.

Нижче представлено аналіз особливостей методології LCA для оцінки стійкості енергосистеми:

На першому етапі (аналіз інвентаризації) розраховуються локальні показники та складений показник стійкості енергосистеми. Однією з фундаментальних робіт, що стосуються цього етапу, є дослідження Лю, яке розглядає методологічні особливості розробки загального показника стійкості з урахуванням багатьох базових показників стійкості, та пропонує методи вибору, кількісної оцінки, оцінки та зважування базових показників, а також методи їх агрегації. Сьогодні вчені розробляють багато варіацій загальних показників стійкості та дають їм різні назви залежно від аспекту, який вони хочуть підкреслити у своїх дослідженнях. Серед таких досліджень варто відзначити такі публікації: Шаабан, Шеффран, Бехнер та Елсобкі розробили інтегрований індекс стійкості з урахуванням п'яти вимірів, включаючи технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти, за 13 обраними критеріями. Вони оцінили сім технологій та дійшли висновку, що технологія, що використовується на газових електростанціях, є найбільш стійкою, за якою йдуть технології відновлюваної енергетики [23]. Кирстя, Молдован-Теселіос, Кирстя, Турку та Дар-аб розробили композитний індекс, а саме індекс стійкості відновлюваної енергетики, який розраховується на основі 23 показників, розділених на чотири виміри: економічний, екологічний, соціальний та інституційний. Вони виявили, що вплив відновлюваної енергетики постійно зростає, що свідчить про усвідомлення концепції сталого розвитку та переходу до

відновлюваних джерел енергії [24]. Фуентес, Вільяфафіла-Роблес, Рулл-Дюран та Гальсеран-Ареллано розробили індекс безпеки енергосистеми, який враховує 44 показники, розділені на п'ять вимірів: доступність; інфраструктура; економіка; навколишнє середовище; управління; та дослідження, розробки та інновації. Вони дійшли висновку, що гнучкість енергосистем може бути підвищена завдяки наявності міжнародних взаємозв'язків та наявності газових електростанцій [25]. Слід зазначити, що вибір локальних показників стійкості енергосистеми впливає із суб'єктивних поглядів авторів на цю проблему та залежить від їхніх дослідницьких цілей.

Другий етап (Оцінка впливу) передбачає визначення факторів, що впливають на стійкість енергосистеми. Наш огляд літератури показує, що такі важливі роботи можуть слугувати основою для цього дослідження: Ма, Чонг, Чжан, Лю, Лі, Лі та Ні досліджували коефіцієнт перетворення кількості первинної енергії та коефіцієнт викидів первинного вуглекислого газу на основі діаграм Санкі. На думку авторів, ці показники відображають весь процес уніфікації енергії та пов'язані з нею викиди CO<sub>2</sub>, і вони дозволяють відобразити енергію та розподіл CO<sub>2</sub> [26]. Гомес-Камачо та Руджері пропонують аналіз енергетичної стійкості, який враховує всю траєкторію енергії, від джерел енергії до корисної енергії. Вони побудували індекс енергетичної стійкості, щоб врахувати додаткові відповідні потоки енергії до технологічної межі енергетичної системи, такі як уже витрачена енергія та/або уникнута енергія, які необхідно враховувати для розрахунку доступної енергії [27]. Ролдан-Блей, Міранда, Карвалью та Ролдан-Порта проаналізували профілі попиту та виробництва, щоб досягти ефективної інтеграції ВДЕ. Вони вивчали наслідки, які установки ВДЕ можуть мати для мереж передачі, а також їхні втрати енергії та пов'язані з ними викиди [28].

На третьому етапі (Інтерпретація) розробляються рекомендації щодо забезпечення стійкості енергосистеми. Такі рекомендації можуть бути надані за допомогою різних методів сценарного моделювання, а саме: нечіткого синтетичного оцінювання [29], моделювання Монте-Карло [30], багатоцільової

оптимізації [31] або інших методів. Багатоцільова оптимізація вважається найбільш доцільним методом для використання під час прийняття довгострокових стратегічних рішень, тоді як моделювання Монте-Карло зосереджено на невизначеностях у розвитку енергосистем. Аль Шидхані, Іоанну та Фальконе пропонують проводити багатоцільову оптимізацію на основі чотирьох цільових функцій: мінімізація загальних дисконтованих витрат, викидів вуглецю, землекористування та соціального опору. Вони виявили відсутність компромісів між мінімізацією викидів CO<sub>2</sub> та соціальним опором, а також між загальними витратами та цільовими функціями землекористування [31]. Використовуючи багатоцільову оптимізацію, Джунне, Цао, Місків, Хоттенрот та Неглер оцінили компроміси між системними витратами та викидами парникових газів протягом життєвого циклу майбутніх енергетичних систем. Вони виявили тенденцію, що розгортання наземної вітрової енергетики, електромережі та скорочення кількості фотоелектричних електростанцій та літій-іонних накопичувачів зменшує викиди парникових газів, з невеликим збільшенням системних витрат, тоді як розгортання концентрованої сонячної енергії, морської вітрової енергетики та ядерної енергетики допомогло досягти подальшого скорочення, але призвело до значного збільшення витрат [32]. Ван, Тан, Тан, Ян, Лін, Цзі, Геджіріфу та Сонг вивчали розподілену енергетику та знайшли оптимальне рішення Парето для комбінації вітрової та фотоелектричної енергії, з урахуванням співпраці між ціною використання за часом та системою накопичення енергії акумулятора [33].

Усі проведені дослідження є емпіричними, що відображає суб'єктивне ставлення авторів до цієї проблеми, оскільки навряд чи буде знайдено універсальний підхід, який забезпечить лише об'єктивне представлення цього явища. Проблема стійкості енергосистеми зберігатиметься, оскільки вона не втрачає своєї актуальності, що зумовлює необхідність нових досліджень у цій галузі.

### 1.3 Пом'якшення впливу атак на енергосистему

Енергетичні системи зазвичай проектуються та будуються таким чином, щоб протистояти різноманітним природним збоям та продовжувати працювати. Наприклад, вони часто можуть витримувати або швидко відновлюватися після таких подій, як удари блискавки, вітрові та крижані бурі, пожежі та різні несправності обладнання. Деякі функції, розроблені в системах, щоб вони могли витримувати такі «нормальні» події, також забезпечують захист від атак терористів невеликого масштабу. Зі зростанням складності різних технологій, система електроенергетики, що розвивається, може бути спрямована на ще більш стійку конфігурацію.

Система електропостачання складається з дорогих генераторів, апаратури та ліній, які можуть швидко пошкодитися або зруйнуватися внаслідок коротких замикань (несправностей), теплового перевантаження або інших аномальних умов. Системи захисту призначені для автоматичного виявлення та ізоляції ліній та апаратури після електричних несправностей або збоїв, щоб захистити обладнання від пошкоджень через випадки коливань напруги, струму або частоти за межі розрахункових значень. До первинних захисних пристроїв належать реле, повторні вмикачі, запобіжники, автоматичні вимикачі та перемикачі. У відповідь на короткі замикання захисні реле виявляють аномальні електричні сигнали та розмикають автоматичні вимикачі, щоб ізолювати несправне обладнання.

Системи захисту мають вирішальне значення для забезпечення безпечної та надійної роботи взаємопов'язаних мереж передачі. Система захисту повинна бути надійною та захищеною у всіх своїх операціях. Надійність означає, що захисні пристрої належним чином реагують, коли зміни електричних умов вказують на аномальний або небезпечний стан. Безпека означає, що системи захисту не будуть працювати неправильно за нормальних умов або за умов, що виходять за межі експлуатаційного проекту системи захисту. Зазвичай підвищення надійності системи означає зниження безпеки або навпаки. Наприклад, надійність системи захисту можна підвищити шляхом включення резервування пристроїв. Збільшення

резервування за рахунок використання кількох реле для моніторингу лінії передачі на наявність аномальних умов підвищує ймовірність виявлення події та, таким чином, підвищує надійність. Однак, кілька реле, що працюють паралельно, також можуть знизити безпеку через більшу складність та більшу схильність до відмов компонентів та неправильної роботи. Отже, надійність вимагає тонкого балансу між надійною роботою та захистом від неналежних операцій.

Багато проблем та підходів до проектування можуть впливати на характеристики систем захисту та керування, зокрема такі:

- Швидкість спрацьовування систем захисту. Швидке рішення про відключення автоматичного вимикача може запобігти нестабільності та постійному пошкодженню ліній або апарату в умовах несправності. Однак, збурення та динаміка системи можуть створювати електричні сигнали, що імітують умови несправності або перевантаження, які можна розрізнити лише за умови достатнього часу аналізу. Отже, швидке рішення про відключення може знадобитися за певних умов, але також може призвести до неправильного рішення за різних динамічних умов.
- Методи тестування та технічного обслуговування. Це може призвести до неправильних налаштувань захисту або ненавмисних змін у логіці захисту. Це також спричинило масштабні відключення електроенергії. Наприклад, навіть поверховий аналіз відключення електроенергії у серпні 2003 року показує кілька проблемних областей щодо проектування системи захисту, інтегрованих з експлуатацією системи та комунікаціями. Втрата першої лінії електропередачі була спричинена неправильною роботою реле для усунення несправності, спричиненої провисанням лінії в дерева. Це призвело до більшого навантаження на паралельні лінії з подальшою втратою кількох ліній через несправності та перевантаження. Лінії, пов'язані з цими подіями, були належним чином захищені та збережені, і їх можна було б негайно відновити в експлуатації, якби оператори мали достатні знання та усвідомлення динамічних подій, що відбувалися.

- Системи для покращення обізнаності про робочі умови. Нові цифрові реле з розширеними можливостями зв'язку та обміну інформацією, поєднані з системами керування та інформації, можуть зменшити ймовірність каскадних збоїв внаслідок спрацьовування кількох систем захисту.
- Правильне налаштування реле. Неправильне налаштування призвело до каскадних відключень електроенергії, спричинених спрацьовуванням ліній електропередачі в умовах безпомилкової дії. Неправильне налаштування реле імпедансу (дистанції) «зони 3» було безпосередньою причиною відключення електроенергії на північному сході 9 листопада 1965 року. Реле працювало правильно відповідно до своїх налаштувань, але його не було скинуто зі зростанням навантаження системи. Високе навантаження, але безпомилкові електричні умови призвели до спрацьовування реле. Слід зосередитися на дистанційному моніторингу налаштувань захисних реле та вдосконаленні процедур технічного обслуговування та випробувань, які зменшують можливість неправильної та ненадійної роботи реле.
- Вирішення проблеми «перевантаження» систем захисту. Захист від перевантаження дистанції, головним чином у вигляді реле зони 3, спричинив або сприяв багатьом відключенням електроенергії. Захист від перевантаження зазвичай застосовується як резервний захист у разі відмови вимикача на віддаленій підстанції. Іншими словами, якщо локальна система захисту не виявляє несправності, навколишні підстанції «перевантажуються», щоб виявити несправність та усунути подачу струму короткого замикання на локальну підстанцію. Потрібні чутливі налаштування, тому реле схильні до спрацьовування в безаварійних умовах перевантаження, зниженої напруги або електромеханічних коливань між генераторами. Існує кілька рішень цієї проблеми, включаючи резервні локальні реле, реле відмови вимикача, захист шин та обмеження досяжності реле імпедансу. NERC та галузь вирішили проблему резервного реле у

відповідь на відключення електроенергії 2003 року. Північноамериканські енергетичні компанії внесли тисячі змін.

Вищезазначені підходи не вирішують усіх проблем захисту, які можуть спричинити або посилити каскадне відключення електроенергії. З мільйонами захисних реле та схем захисту, що встановлені, неможливо запобігти небажаним або непотрібним операціям. Однак, плідні сфери досліджень та вдосконалень включають наступне:

- Удосконалення інтелектуальних цифрових реле, що дозволяє проводити самооцінку та дистанційну оцінку налаштувань і стану реле для забезпечення надійної роботи.
- Інтеграція систем захисту з іншими системами керування та експлуатації для забезпечення повної оперативної обізнаності операторів щодо змін та погіршення умов під час каскадної події.
- Удосконалені філософії та стратегії керування для кількох надзвичайних ситуацій, що відбуваються у безпосередній близькості. Такі вдосконалення можуть вирішити ситуації, в яких належна робота реле у відповідь на зміну умов, в цілому, може створити невиправну нестабільність в енергосистемі.
- Методи визначення пріоритетів модернізації релейного захисту та схем, включаючи зв'язок, такий як оптоволоконний зв'язок між станціями.

Завдяки використанню автоматизованого розподілу існують значні можливості для підвищення надійності розподілу електроенергії без реконструкції існуючої системи розподілу. Загалом, до них належать:

- Автоматизація систем розподілу, включаючи системи SCADA. Цей підхід полягає у використанні передових датчиків із комунікаційною інфраструктурою, щоб електроенергетична компанія могла контролювати та дистанційно керувати розподілом. Системи SCADA як частина розподільчих підстанцій дозволяють диспетчерам електроенергетичних компаній контролювати інформацію про фідери, таку як рівень напруги та навантаження фідерів, з одночасною можливістю дистанційно вмикати та

вимикати автоматичні вимикачі фідерів. Системи автоматизованого розподілу та керування можуть бути поступово впроваджені та вже діють у деяких частинах країни. Можна навести переконливі аргументи щодо економічного розвитку принаймні на користь деяких таких покращень, оскільки збої в системі розподілу є причиною більшості відключень електроенергії, з якими стикаються споживачі. Державні регулятори повинні вимагати від місцевих компаній, що займаються розподілом, проведення досліджень, які вивчають потенційні переваги та витрати на таку модернізацію, а потім розробляти програми вдосконалення, які мають чіткі позитивні чисті вигоди.

- Використання дистанційних пристроїв дистанційного керування (RTU), розосереджених по всій розподільчій системі. Такі системи будуть встановлені на рівні фідерів, що дозволить диспетчеру розподілу секціонувати фідер або виконувати комутаційні операції для відновлення живлення шляхом ізоляції несправностей. Ця дія відновлює живлення великої кількості споживачів, мінімізуючи тривалість відключення завдяки швидкому виявленню та ізоляції несправної секції. Нові розробки включають автоматизоване секціонування та відновлення справних секцій фідерів після несправності за допомогою інтелектуальних розподілених RTU.
- Передові системи зв'язку. У розподільчі системи впроваджуються передові системи зв'язку, включаючи радіо- та стільниковий зв'язок, для отримання даних та керування віддаленими пристроями. Сам розподільчий фідер використовується як засіб зв'язку в системах ліній електропередач. З удосконаленням комунікацій зростає функціональність та складність автоматизації розподілу.
- Інші досягнення в автоматизації розподілу. До них належать використання інтелектуальних електронних пристроїв, автоматичне зчитування показників лічильників та безперервний високочастотний моніторинг розподільчих фідерів для виявлення початкових відмов розподільчого обладнання та

виявлення дуже низькострумових дугових замикань. Якщо несправне обладнання можна виявити та відремонтувати або замінити до катастрофічної відмови, кількість та тривалість перебоїв у подачі електроенергії можна зменшити. Комп'ютерні інтелектуальні електронні пристрої можна застосовувати для моніторингу та захисту розподільчих фідерів, що призводить до отримання великої кількості інформації, яка підтримує відновлення системи та підвищує її надійність

Протягом наступного десятиліття зусилля можна розсудливо зосередити на таких напрямках:

1. Слід визначити критично важливих споживачів та приділити особливу увагу забезпеченню безперервності обслуговування та підтримці критично важливих функцій під час терористичної атаки. Такого рівня захисту можна досягти, забезпечивши кілька джерел живлення для споживачів розподільчих мереж та забезпечивши виробництво електроенергії на місці у разі втрати основної передачі. Недавній досвід масштабних відключень електроенергії показав, що багато критично важливих навантажень є вразливими та не мають належного резервного допоміжного живлення.

2. Автоматизацію розподілу можна застосовувати за розумною ціною, що значно підвищує надійність розподіл та зробити відновлення системи більш детермінованим та швидким. Акцент слід зробити на застосуванні вдосконалених систем SCADA, інтелектуальних електронних пристроїв, передових комунікацій та складного (широкопasmового) моніторингу, що забезпечують безперервний контроль та високоякісні дані щодо роботи розподільчої системи. Ці пристрої можуть негайно повідомити про збій, підтвердити причину збою та надати конкретну інформацію, необхідну для якомога швидше відновлення обслуговування.

3. Потрібен надійний розподіл, що вимагає ретельної уваги до модернізації та технічного обслуговування системи. Системи розподілу, що працюють близькі до проектних меж, або системи, що працюють з деградованим обладнанням, легше

виходять з ладу та ускладнюють відновлення обслуговування. Слід звернути увагу на програми, які контролюють та діагностують стан та надійність розподілу, а також на підтримку технічного обслуговування та ремонту на основі стану. Таке постійне технічне обслуговування також надає можливість для модернізації не лише нового енергетичного обладнання, але й згаданих вище технологій автоматизації розподілу.

### **Висновки до розділу 1**

У цьому розділі детально обговорюється розвиток інтегрованої сонячної та вітрової енергетики із системами зеленого водню для ефективного виробництва, зберігання та споживання водню. У ньому висвітлюються останні технологічні розробки, такі як удосконалені електролізери та вдосконалене накопичення енергії. Критично розглянуто різні випадки впровадження системи в реальних умовах. Потреба в інтегрованих системах відновлюваної енергії та зеленого водню, які допоможуть нам досягти сталого низьковуглецевого майбутнього, зростає, оскільки терміновість вирішення проблеми зміни клімату зменшується. Навіть якщо все ще існують перешкоди, які потрібно подолати, постійний прогрес у технологіях, а також зростаюча урядова та суспільна підтримка рішень у сфері сталої енергетики, вказують на світле майбутнє для цих креативних підходів. Успіх поєднання сонячної та вітрової енергії із системами зеленого водню зрештою залежатиме від скоординованих зусиль у кількох сферах – технологічних інноваціях, політичній підтримці, розвитку ринку та залученні громадськості. Оскільки дослідження розвиваються, а витрати продовжують знижуватися, ці інтегровані системи мають потенціал відігравати ключову роль у глобальному енергетичному переході, значною мірою сприяючи декарбонізації різних секторів та створенню більш сталого та стійкого енергетичного ландшафту.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Комплексна оцінка елементів накопичення енергії в гібридних енергетичних системах для оптимізації енергетичних резервів

Оскільки світовий попит на стійкі та надійні джерела енергії зростає, потреба в ефективних системах накопичення енергії стає все більш критичною для забезпечення надійного енергопостачання, особливо враховуючи нестабільний характер відновлюваних джерел. Існує кілька методів накопичення енергії, і в цій роботі розглядається та враховуються їхні зростаючі потреби. У цьому дослідженні варіанти накопичення енергії поділено відповідно до їхньої основної дисципліни, включаючи електричні, механічні, теплові та хімічні. Різні можливі варіанти накопичення енергії в кожній дисципліні були оцінені та проаналізовані, і на основі цих варіантів було проведено цікаве обговорення, в якому аналізуються ці технології в гібридному режимі для ефективної та надійної роботи, їхні переваги та обмеження. Крім того, комбінації кожного елемента накопичення, гібридні системи накопичення енергії (HESS), - це системи, які поєднують характеристики різних елементів накопичення для заповнення розриву між пропозицією та попитом на енергію. Розглянуто HESS для різних систем зберігання енергії, таких як гідроакумулятори (ГАЕ), акумуляторні батареї (АБ), повітряні накопичувачі енергії (СГАЕ), маховикові системи накопичення енергії (МАХ), суперконденсатори, надпровідні магнітні котушки та накопичувачі водню, щоб з'ясувати можливості гібридного накопичення, яке може допомогти створити більш стабільні енергетичні системи в майбутньому.

Не можна нехтувати важливістю систем накопичення енергії, оскільки вони відіграють життєво важливу роль у плавних та покращених кривих енергії, оскільки забезпечують безперебійну енергію [34]. Вони використовуються комунальними підприємствами [35], промисловістю, будівлями та транспортним секторами для забезпечення резервного копіювання енергії, що запобігає будь-яким перебоям у постачанні енергії до навантаження. Використання електроенергії

зросло за попередні десятиліття зі швидким зростанням населення світу та, як очікується, зростатиме в найближчі роки завдяки зростанню проникнення різних видів енергоспоживаючих секторів, включаючи транспорт, будівництво та інші промислові сектори. Енергія з викопного палива легкодоступна, і її можна використовувати будь-коли, але відновлювані джерела енергії більше залежать від природних погодних умов та ресурсів. Джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, більше залежать від природи, оскільки вони доступні лише тоді, коли є сонце та вітер відповідно. Через свою нестабільну природу, енергію необхідно накопичувати, коли вона є в надлишку, відповідно до потреб, щоб її можна було використовувати за потреби. Накопичення енергії пропонує багато переваг, включаючи кращі економічні варіанти у вигляді гібридних систем накопичення енергії (HESS) та інших окремих елементів накопичення, які забезпечують високу ефективність без будь-яких перебоїв у подачі енергії. Резервне копіювання енергії за допомогою елементів накопичення допомагає у зменшенні пікових навантажень, вирівнюванні навантаження та багатьох інших подібних застосуваннях. Ведеться робота над системами накопичення енергії, яка значно покращила їхні елементи накопичення. Сьогодні існують різні системи накопичення енергії, засновані на різних механізмах, тобто механічних, електричних, теплових, хімічних, ядерних тощо. Цей аналіз допомагає визначити сильні та слабкі сторони кожної технології та може допомогти дослідникам у виборі найбільш підходящих варіантів для конкретних застосувань.

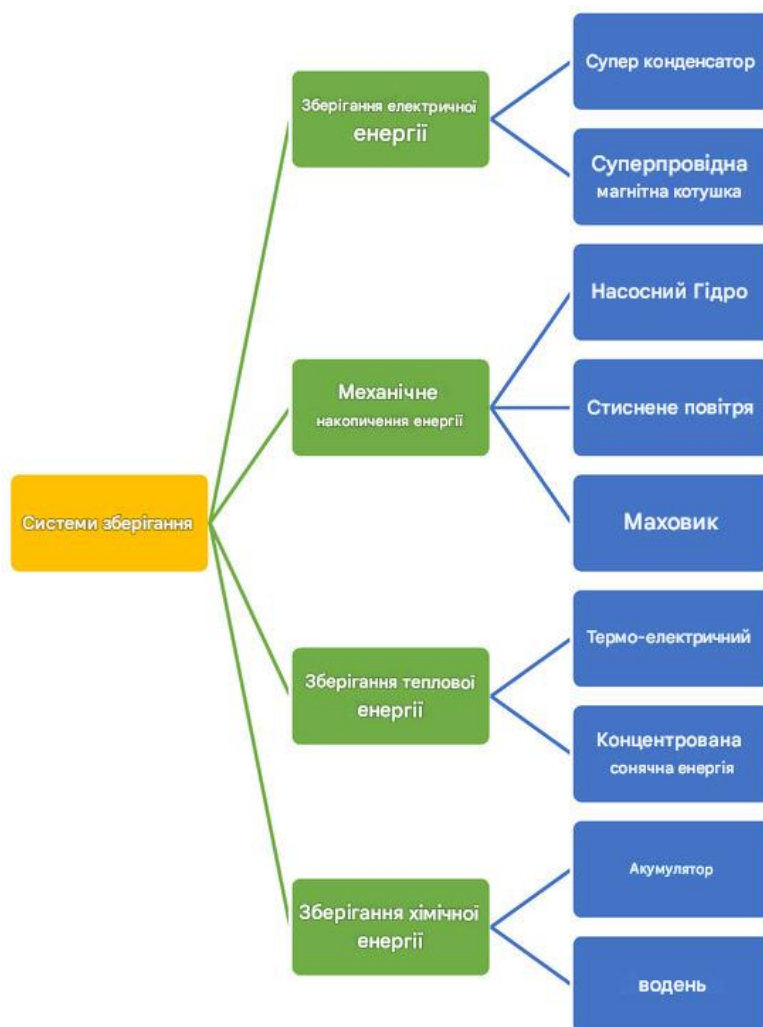


Рисунок 2.1 - Ієрархія систем накопичення енергії

Системи накопичення електричної енергії (СНЕ) (рис.2.1) відіграють вирішальну роль у стабільності електричних енергетичних систем та безперебійному постачанні енергії. Електричні накопичувачі зберігають енергію шляхом застосування статичних та динамічних зарядів, використовуючи електричні властивості елементів накопичення. Електрична енергія зберігається у вигляді зарядів на основі електростатики та електродинаміки. Електромагнітна поведінка систем використовується для накопичення енергії в надпровідних магнітних котушках, тоді як електростатичні властивості використовуються для накопичення електричної енергії в суперконденсаторах. Таким чином, найпоширенішими формами накопичення електричної енергії на сучасному ринку є суперконденсатори та надпровідні магнітні котушки.

Суперконденсатори – це пристрої накопичення енергії з високою щільністю потужності порівняно з батареями. Вони є ефективними пристроями накопичення, які можна використовувати в кращому температурному діапазоні та мають високу здатність до струму заряду/розряду [30]. Ван та ін. обговорили роль суперконденсаторів у системах відновлюваної енергії разом з їхніми перевагами та недоліками. Суперконденсатори можна розділити на різні класи на основі явищ заряджання, згідно з нещодавнім дослідженням: тонкоплівкові суперконденсатори, гнучкі суперконденсатори, сендвіч-суперконденсатори та планарні суперконденсатори. Гнучкі суперконденсатори мають багато особливостей, найдомінантнішою з яких є їх високі характеристики заряджання. Тонкоплівкові електроди, що використовуються в суперконденсаторах, виготовлені з високоякісного матеріалу, тому вони забезпечують вихідний сигнал з гарною якістю. Планувальні суперконденсатори відомі своїми планувальними каналами, які дозволяють швидко передавати електролітичні іони в обох напрямках. Суперконденсатори також можна класифікувати залежно від їхньої конструкції як (а) електрохімічні двошарові суперконденсатори, (б) гібридні суперконденсатори або (в) псевдосуперконденсатори. Електричні двошарові суперконденсатори можна класифікувати на різні типи залежно від їхніх матеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, вуглецеві аерогелі та активоване вугілля. Ще однією згаданою категорією є псевдоконденсатори, які можна класифікувати на провідні полімери та оксиди металів.

Суперконденсатори використовуються як гібридні накопичувачі енергії з акумулятором для збільшення його циклічності, додаткових характеристик та терміну служби. Гібридні системи забезпечують комбіновані характеристики обох елементів та призводять до підвищення ефективності. На рисунку 2.2 показано комбінацію двох елементів – акумулятора та суперконденсатора. Технологія на основі суперконденсаторів та акумуляторів набула популярності протягом десятиліття завдяки її використанню в електромобілях (EV). В електромобілях гібридні системи на основі суперконденсаторів не тільки підвищують

ефективність, але й термін служби акумулятора. Часті цикли зарядки та розрядки систем, що працюють лише з акумуляторами, в електромобілях скорочують термін їхньої служби; тому суперконденсатори використовуються з акумуляторами для збільшення їх циклічності за допомогою гібридного системного підходу. Суперконденсатор у цій гібридній системі забезпечує надлишок енергії там, де акумулятор не може її забезпечити, або забезпечує її за низьких рівнів якості живлення.



Рисунок 2.2 - Гібридна система зберігання енергії на базі суперконденсаторів

Системи механічного накопичення енергії (MESS) забезпечують ефективний та найновіший підхід до механічного накопичення енергії різними способами. Застосування різних типів сил у різних системах механічного накопичення забезпечує енергію, яка є або кінетичною, або потенційною. Кінетична енергія отримується від руху тіл, а потенційна енергія зумовлена положенням тіл. У системах механічного накопичення всі механізми використовуються для накопичення енергії або шляхом руху, або положення речовини. Накопичення енергії в механічних системах доступне в різних формах, залежно від різних принципів, які включають енергію пружини, відому як пружна потенційна енергія,

кінетична енергія та потенційна енергія. Джерела механічної енергії легко адаптуються та можуть використовуватися як у механічних, так і в електричних системах. Використовуючи джерела механічної енергії, енергію можна виробляти з різних джерел, таких як вода, хвилі, повітря, висота та припливи. Механічну енергію можна накопичувати та збільшувати за допомогою різних методів, включаючи маховик, гідроакumuлюючі електростанції та акумулювання стисненого повітря.

Усі джерела відновлюваної енергії залежать від природи, і дуже важко оцінити фактичний їхню продуктивність через багато факторів. Ця невизначеність іноді може призвести до величезного розриву між попитом і пропозицією енергії, яку можна було б відновити за допомогою елементів накопичення енергії. Різні елементи накопичення використовуються для заповнення прогалини, створеної невизначеністю відновлюваних джерел енергії, і гідроакumuлювання (ГАЕ) є одним з них. Хіно та ін. [36] пояснюють переваги виробництва електроенергії за допомогою ГЕС, а також деякі ключові відмінності. Вони стверджують, що ГЕС легко запускати та зупиняти завдяки швидкому часу реакції. Крім того, вони можуть адаптуватися до коливань частоти, зберігаючи стабільність напруги. Крім того, ГЕС має високу адаптивність до змін навантаження та відстеження навантаження. Принцип роботи ГЕС базується на принципі взаємозамінного перетворення потенційної енергії в кінетичну. Вода перекачується з нижнього резервуара у верхній за допомогою водяних насосів, використовуючи надлишкову енергію за низького періоду споживання. Ця надлишкова енергія зберігається у вигляді потенційної енергії. Коли рівень електроенергії високий, ця енергія використовується для задоволення навантаження шляхом перетворення потенційної енергії на кінетичну енергію шляхом обертання гідротурбіни та вироблення електроенергії. У [37] автор також розглянув гідроакumuлюючу систему (ГАС) щодо її переваг, проблем та ефективності, а також розглянуто гібридизацію ГАС з різними елементами акумулювання. Схематична діаграма гідроакumuлюючої системи представлена на рисунку 2.3.

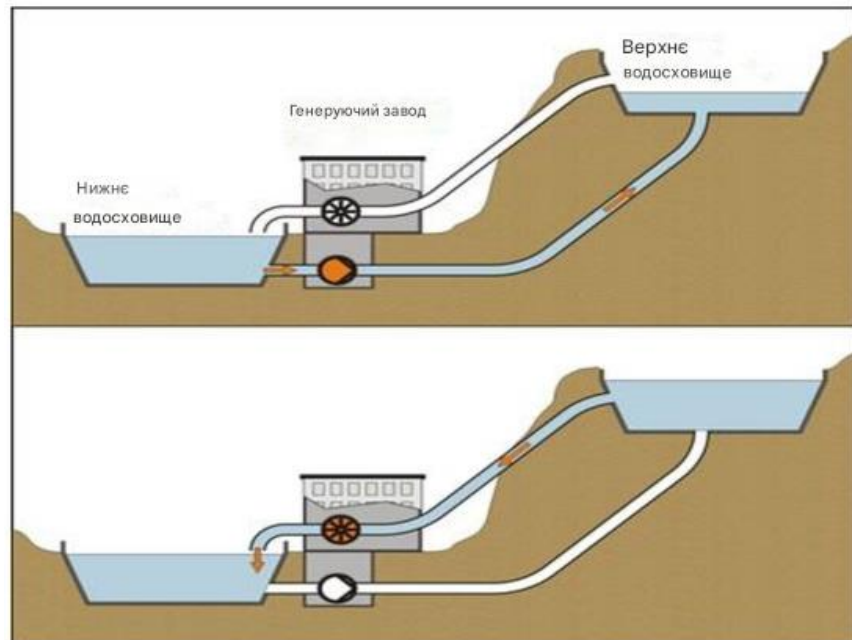


Рисунок 2.3 - Принципова схема гідроакumuлюючої системи

Через широкий спектр застосувань, що потребують накопичення енергії, зростає потреба зосередитися на гібридних системах накопичення енергії (HESS). Ці системи поєднують різні технології накопичення в різних комбінаціях для забезпечення високоякісної енергії за доступними цінами. Однак робоча стратегія HESS може бути складною, оскільки вона включає кілька пристроїв накопичення та їх розмір, і спрямована на зниження як витрат на паливо, так і споживчих цін. Час заряджання та розряджання кожного елемента накопичення залежить від його характеристик і є дуже важливим. Наприклад, акумуляторна батарея зазвичай використовується для короткочасного накопичення, тоді як гідроаккумулятори зазвичай використовуються для довгострокового накопичення. Гідроаккумулятори використовувалися в поєднанні з різними елементами накопичення, і результати помітні. Тут обговорюється робота, проведена над гідроаккумуляванням у поєднанні з різними елементами накопичення та джерелами енергії. Кусакана та ін. [38] розробили метод тестування оптимальної поведінки гібридної системи на основі фотоелектричної та вітрової енергії з накопиченням ПНС та дизельним генератором за допомогою розв'язувача `fmincon` у MATLAB. З цього дослідження було виявлено, що ПНС забезпечує економічне накопичення енергії разом з

меншим споживанням дизельного палива. Інші дослідники використовували моделювання для ПНС разом з фотоелектричною та вітровою енергією для згладжування електричних сигналів при піковому навантаженні. Було враховано природу відновлюваних джерел енергії та їх доступність; наприклад, спостерігалася залежність енергії вітру від швидкості вітру та залежність сонячної енергії від сонця, і покращені результати були отримані з системами PHS на основі вітру та фотоелектричних джерел. PHS виявилася найефективнішою системою з ефективністю близько 80%. PHS можна використовувати в поєднанні з різними елементами накопичення енергії, що може призвести до більш ефективних результатів.

Через зростання попиту на енергію було розроблено різні методи її зберігання. Розвинені країни приділяють особливу увагу методам зберігання, причому акумуляторне зберігання є найпоширенішим методом. Для зберігання енергії використовуються різні типи акумуляторів, такі як натрій-сірчані акумулятори, літій-іонні акумулятори та вдосконалені акумулятори. В одному дослідженні розглядаються різні варіанти зберігання енергії в акумуляторах та обговорюється вибір свинцевих акумуляторів. Також проводяться дослідження інших типів акумуляторів, включаючи вдосконалені свинцево-кислотні акумулятори, проточні акумулятори, суперсвинцево-кислотні акумулятори та метало-повітряні акумулятори. Системи на основі акумуляторів розроблені для коротких циклів і зазвичай використовуються на мережевих станціях для зберігання значної кількості енергії. Система зберігання енергії в акумуляторах включає систему контролю стану живлення (PCS), систему управління акумуляторами (BMS), систему управління енергією (EMS) та акумуляторний блок. BMS контролює ємність акумулятора. PCS виконує функцію перетворення енергії змінного та постійного струму. EMS забезпечує передачу потрібної кількості енергії в потрібне місце. Усі батареї слід тримати під наглядом та періодично перевіряти, оскільки вони виготовляються по-різному та призначені

для виконання різних функцій. Тому будь-яка несправність може призвести до поломки.

Система управління будівництвом (BMS) відповідає за захист акумуляторної батареї, оскільки іноді може статися коротке замикання, а розряд енергії може змінюватися, що може спричинити коротке замикання. Продуктивність кожної батареї важлива, тому за кожною слід ретельно стежити. Використовуючи перетворювачі змінного та постійного струму, електроенергію можна передавати за межі мережевої станції.

Різні акумулятори мають різні рівні заряджання. Наприклад, літій-іонні акумулятори досить чутливі до перезаряджання, тому їх не слід заряджати при високих рівнях напруги; інакше вони можуть спричинити вибух, що призведе до пошкодження. Тому з розвитком акумуляторів системи керування акумуляторами (BMS) стають все більш популярними для використання в балансуванні джерел живлення. Свинцево-кислотні акумулятори знайшли застосування завдяки своїй низькій вартості. Вони мають низьку щільність енергії та низьку щільність потужності. Вони мають короткий термін служби та не такі екологічні, тому їх не обирають у багатьох сферах застосування. Крім того, літій-іонні акумулятори знаходять застосування в електромобілях завдяки своїй здатності працювати при низьких рівнях напруги. Їхній позитивний електрод виготовлений з літію, а негативний - з графіту. Проточні акумулятори на основі ванадію - це ще один тип хімічних акумуляторів, які потребують менше часу для заряджання та працюють ефективно. Аналогічно, натрій-сірчані акумулятори можуть працювати при температурі 300–350 °C, тому вони знаходять застосування за високих температур].

Акумулятор є найпоширенішою системою зберігання енергії, яка має основне застосування як на побутовому, так і на промисловому рівнях. Акумулятори можна легко та ефективно гібридизувати з різними елементами зберігання для досягнення найбільш економічних результатів. Інші науковці досліджували гібридні технології зберігання енергії, що складаються з акумуляторних та гідроакумуючих систем на основі фотоелектричних джерел

виробництва енергії. Це дослідження пропонує деякі чудові ідеї, засновані на дослідженнях у галузі HESS (систем накопичення теплової енергії), але баланс потужності не має великого значення в цьому дослідженні. Використання акумуляторів у гібридних системах може заповнити короткострокові енергетичні прогалини, тоді як більші прогалини можна заповнити, використовуючи деякі довгострокові елементи зберігання, такі як PHS (системи довгострокового зберігання). Таким чином, гібридна система зможе задовольнити як довгострокові, так і короткострокові потреби в енергії.

## **2.2 Огляд оптимізації накопичення енергії в акумуляторах у забудованому середовищі**

Системи акумуляторного накопичення енергії (BESS) знаходяться на передовій глобального переходу до відновлюваної енергії та декарбонізації міського середовища. Оскільки міста прагнуть скоротити викиди парникових газів та підвищити енергетичну стійкість, батареї стали ключовим компонентом для інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні фотоелектричні (PV) системи, у забудоване середовище. Вони дозволяють накопичувати енергію, забезпечувати стабільність мережі та керувати навантаженням, вирішуючи як місцеві, так і національні енергетичні проблеми.

У житлових будівлях акумулятори можуть відігравати трансформаційну роль, сприяючи власному споживанню, зменшуючи пікове навантаження та забезпечуючи резервне живлення під час перебоїв. Окрім житлових приміщень, акумулятори підтримують ширші міські системи, забезпечуючи мікромережі, спільне використання енергії та управління перевантаженнями. Окрім житлових застосувань, промислові та великі комерційні системи акумуляторного зберігання енергії надають критично важливі послуги у більшому масштабі. Ці акумулятори підтримують великих споживачів енергії, беручи участь у програмах регулювання частоти, резервного живлення та реагування на попит, знижуючи експлуатаційні витрати та підвищуючи гнучкість мережі.

Акумулятори, що використовуються в житлових енергетичних системах, повинні відповідати певним вимогам, таким як (пожежна) безпека, масштабованість, ефективність та економічна ефективність. У таблиці 2.1 порівнюються кілька типів акумуляторів, що використовуються. Найпоширенішим типом акумуляторів у житловому секторі є літій-іонний акумулятор. Кожен тип акумулятора має унікальні переваги та обмеження, які впливають на його придатність для конкретних житлових застосувань, таких як зменшення пікового навантаження, власне споживання або резервне живлення. Вибір акумулятора часто залежить від таких факторів, як вартість системи, ефективність, безпека та очікуваний життєвий цикл.

Таблиця 2.1 - Огляд типів акумуляторів та їх характеристик

Тип	Щільність енергії (Вт·год/кг)	Ефективність туди й назад (%)	Економічно ефективна вартість	Цикл заряджання (повільне/звичайне-швидке)
Літій-іонний (NMC, NCA)	100–265	90–95	Високий (++)	2000–5000/1500–3500
Літій-залізофосфат (ЛЗФ)	80–160	90–94	Високий (++)	3000–10000/2000–6000
Свинцево-кислотний	30–50	70–85	Низький (-)	500–1500/300–800
Нікель-кадмій (NiCd)	40–60	70–75	Помірний (+)	1000–2500/800–1500
Нікель-металгідридні (NiMH) акумулятори	60–120	60–70	Помірний (+)	500–1200/300–800
Проточні батареї (ванадієво-відновні, цинк-бромні)	15–70	65–85	Помірний (+)	10 000–20 000/8 000–15 000
Символи (++)/+/– вказують на відносну економічну ефективність різних типів акумуляторів: (++) = Висока, (+) = Помірна, (-) = Низька.				

Літій-іонні акумулятори є найпоширенішим рішенням для накопичення енергії в житлових приміщеннях завдяки високій щільності енергії, ефективності та тривалому терміну служби. Вони стали основою житлових енергетичних систем, де продуктивність, компактність та надійність є критично важливими. У цьому дослідженні детально розглядаються характеристики, переваги та останні тенденції впровадження літій-іонних акумуляторів, особливо в житловому секторі. Літій-іонні акумулятори мають ряд переваг порівняно з іншими хімічними типами акумуляторів, що робить їх кращим вибором для житлових рішень для накопичення енергії. Однією з їхніх ключових переваг є висока щільність енергії, що забезпечує співвідношення енергії до ваги 100–265 Вт·год/кг, що дозволяє створювати компактні установки, які добре підходять для житлових приміщень. Крім того, літій-іонні акумулятори відомі своєю високою ефективністю, з ефективністю в обох напрямках, яка часто перевищує 90%, що мінімізує втрати енергії та робить їх ідеальними для власного споживання та енергозберігаючих застосувань. Їхня довговічність є ще однією значною перевагою, оскільки вони зазвичай пропонують термін служби 10–15 років, іншими словами, близько 3000–5000 циклів заряду-розряду залежно від таких факторів, як глибина розряду (DoD), температура та умови експлуатації, а також залежно від моделей використання та обслуговування, що забезпечує надійність та економічну ефективність для довгострокових енергетичних проєктів. Крім того, їхня здатність швидко заряджатися та розряджатися робить їх дуже придатними для динамічних застосувань, таких як зменшення піків та регулювання частоти, де швидкий час відгуку є критично важливим. Ці комбіновані характеристики позиціонують літій-іонні акумулятори як ефективне, довговічне та універсальне рішення для зберігання енергії для сучасних житлових приміщень.

Літій-залізофосфатні (LFP) акумулятори, добре відома різновид літій-іонних акумуляторів, отримали все більше застосування в побутових системах зберігання енергії завдяки своїм очевидним перевагам з точки зору безпеки, довговічності та економічної ефективності. Однією з основних переваг LFP акумуляторів є їх

підвищена безпека, яка впливає з їхньої чудової термічної та хімічної стабільності. На відміну від інших літій-іонних хімічних речовин, LFP акумулятори демонструють менший ризик теплового вибуху, небезпечного стану, який може призвести до пожежі або вибуху, що робить їх особливо придатними для житлових приміщень. Їхня покращена термічна стабільність дозволяє їм працювати в широкому діапазоні температур з мінімальним ризиком, забезпечуючи домовласникам безпечніше рішення для зберігання енергії.

Ще однією ключовою перевагою акумуляторів LFP є їхній довший термін служби, що означає їхню здатність витримувати більшу кількість циклів заряду-розряду, перш ніж відбудеться значне зниження ємності. Дослідження показали, що акумулятори LFP можуть досягати тисяч циклів, часто перевищуючи 2000–5000 циклів за стандартних умов експлуатації, що робить їх довговічним та економічно ефективним вибором для потреб довгострокового зберігання енергії. Така довговічність особливо корисна для житлових приміщень, де акумулятори щодня циклічно розряджаються та заряджаються як частина систем сонячної енергії.

Незважаючи на відносно нижчу щільність енергії порівняно з іншими літій-іонними хімічними речовинами, LFP-акумулятори пропонують значну економічну ефективність. Матеріали, що використовуються в LFP-акумуляторах (залізо та фосфат), є більш поширеними та дешевшими, ніж кобальт та нікель, що використовуються в інших літій-іонних технологіях. Це сприяє зниженню виробничих витрат і, зрештою, більш доступному рішенню для зберігання енергії для домовласників. Знижені витрати в поєднанні з тривалим терміном служби роблять LFP-акумулятори привабливим вибором для житлових приміщень, які шукають баланс між продуктивністю та доступністю.

Акумулятори LFP забезпечують оптимальне рішення для зберігання енергії в житлових приміщеннях, пропонуючи поєднання безпеки, довговічності та економічних переваг, що робить їх переконливою альтернативою традиційним літій-іонним акумуляторам. На відміну від нікель-марганцево-кобальтових (NMC) та нікель-кобальтово-алюмінієвих (NCA) акумуляторів, які містять токсичні

метали, такі як кобальт та нікель, акумулятори LFP використовують залізо та фосфат, які є нетоксичними та більш екологічно безпечними.

Вплив кобальту пов'язують зі значними ризиками для здоров'я, включаючи проблеми з диханням та серцево-судинні захворювання, через його біоаккумуляцію та токсичність під час видобутку, виробництва та утилізації. Аналогічно, сполуки нікелю класифікуються як канцерогенні та пов'язані зі шкірною алергією та підвищеним ризиком раку при тривалому впливі. Свинцево-кислотні акумулятори, хоча й широко використовуються, становлять додаткову небезпеку для навколишнього середовища через високу токсичність свинцю, який може забруднювати ґрунт та водні джерела, спричиняючи серйозні неврологічні та розвиткові проблеми зі здоров'ям.

Завдяки відмові від використання кобальту, нікелю та свинцю, акумулятори LFP значно зменшують як ризики для здоров'я людини, так і шкоду для навколишнього середовища, що робить їх безпечнішим та екологічнішим вибором для застосування в накопиченні енергії.

Свинцево-кислотні акумулятори, які традиційно використовуються в автономних та резервних системах, є дешевшими, але мають нижчу щільність енергії, яка зазвичай коливається від 30 до 50 Вт·год/кг, порівняно з літій-іонними акумуляторами, які коливаються від 100 до 265 Вт·год/кг. Вони також мають короткий термін служби, але залишаються придатними для використання в економічно чутливих застосуваннях або системах, де їх обмеження можна ефективно контролювати.

Хоча й менш поширені, нікель-кадмієві (NiCd) та нікель-металгідридні (NiMH) акумулятори використовуються в нішевих сферах застосування. NiCd акумулятори особливо корисні в аерокосмічній галузі, промислових системах резервного живлення та електроінструментах завдяки своїй довговічності та здатності витримувати екстремальні температури. В енергетичному секторі NiCd акумулятори також використовуються у віддалених мікромережах та системах

аварійного живлення, де надійність у суворих умовах навколишнього середовища є критично важливою.

Зокрема, нікель-металгідридні акумулятори цінуються за їхню безпеку та помірні характеристики продуктивності, що робить їх придатними для гібридних електромобілів (HEV), медичних пристроїв та портативної електроніки. Крім того, нікель-металгідридні акумулятори досліджувалися для стабілізації мережі та зберігання відновлюваної енергії в малих масштабах, де їх довший термін служби порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами забезпечує перевагу в балансуванні навантаження та управлінні попитом.

Широке впровадження літій-іонних акумуляторів у житлових енергетичних системах у забудованому середовищі зумовлене, головним чином, їхньою здатністю безперешкодно інтегруватися з відновлюваними джерелами енергії, зокрема з сонячними фотоелектричними (PV) системами. Ці акумулятори пропонують універсальне та ефективне рішення для проблем накопичення енергії, дозволяючи домовласникам оптимізувати споживання енергії, підвищувати незалежність від мережі та робити внесок у більш сталу енергетичну екосистему. Зростаюча доступність, покращена щільність енергії та подовжений термін служби літій-іонних акумуляторів ще більше сприяють їх зростаючій популярності в житлових приміщеннях]. Деякі з найпоширеніших випадків використання літій-іонних акумуляторів у житлових приміщеннях включають:

Максимізація власного споживання: Одним з основних факторів впровадження літій-іонних акумуляторів є їхня здатність накопичувати надлишок фотоелектричної енергії, що генерується протягом пікових годин сонячного світла. Цю накопичену енергію можна використовувати в періоди низької або відсутньої сонячної генерації, наприклад, вночі або в хмарні дні, що дозволяє домовласникам максимізувати свою самозабезпеченість. Хоча зменшення залежності від електроенергії з мережі може призвести до економії коштів, фактичні економічні вигоди залежать від кількох факторів, включаючи структуру ціноутворення на електроенергію, доступні субсидії, вартість акумуляторних систем та місцеві

правила. Дослідження показали, що в регіонах з високими цінами на електроенергію та сприятливою політикою (наприклад, Німеччина, Австралія та Каліфорнія) домовласники можуть досягти швидшої окупності інвестицій завдяки накопиченню енергії в акумуляторах [39]. Однак у районах, де нетто-лічильник дозволяє домовласникам продавати надлишок фотоелектричної електроенергії назад у мережу за конкурентними цінами, фінансове обґрунтування використання акумуляторів є слабшим через нижчий економічний стимул для власного споживання.

Крім того, досягнення в системах керування акумуляторами (BMS) дозволяють інтелектуальне планування та оптимізовані цикли заряджання та розряджання для подальшого підвищення ефективності власного споживання. Однак терміни окупності житлових акумуляторних накопичувачів все ще можуть коливатися від 6 до 15 років, залежно від тарифів мережі, вартості системи та фінансових стимулів. Як наслідок, хоча акумуляторні накопичувачі можуть підвищити енергетичну незалежність, їх фінансова доцільність вимагає детального економічного аналізу.

Зменшення пікового навантаження: Літій-іонні акумулятори широко використовуються для зменшення пікового навантаження, методу, який передбачає розрядку накопиченої енергії в періоди високого попиту на електроенергію, коли тарифи на комунальні послуги є найвищими. У контексті тарифів на основі часу використання (TOU) це зазвичай стосується періодів із підвищеними цінами на електроенергію, таких як пізній день та вечір. Однак у деяких країнах пікові витрати на електроенергію визначаються тарифами максимального попиту, які стягують плату зі споживачів на основі їхнього найвищого споживання енергії протягом розрахункового циклу, а не фіксованого пікового періоду [40]. У таких випадках стратегії зменшення пікового навантаження адаптуються до зменшення найвищого зареєстрованого споживання потужності, мінімізуючи плату за попит, а не реагуючи на коливання фіксованої ціни TOU.

Ця стратегія не лише допомагає домовласникам уникнути дорогих тарифів у години пік, але й зменшує навантаження на місцеву електромережу, підвищуючи загальну стабільність та надійність мережі. Наприклад, у регіонах зі структурою ціноутворення, що базується на часі використання (TOU), акумулятори можна запрограмувати на розряд у періоди пікового навантаження та перезарядку в години поза піковим навантаженням, забезпечуючи економічну ефективність та ефективне використання енергії. Крім того, зростаюче впровадження контрактів з динамічним ціноутворенням, які дозволяють цінам на електроенергію коливатися відповідно до умов мережі в режимі реального часу та цін на оптовому ринку, посилює гнучкість, яку надають акумуляторні системи. Обидва ці фактори сприяють загальній гнучкості акумуляторних систем. Реагуючи на цінові сигнали, акумулятори можуть оптимізувати графіки заряджання та розряджання, щоб мінімізувати витрати на електроенергію, брати участь у програмах реагування на попит та покращувати фінансову життєздатність систем зберігання акумуляторів.

Резервне живлення: у районах, схильних до перебоїв з електропостачанням, ненадійної мережевої інфраструктури або стихійних лих, літій-іонні акумулятори можуть служити надійним резервним джерелом живлення. Вони забезпечують безперебійний перехід на накопичену енергію під час збоїв у мережі, забезпечуючи безперебійну роботу основних побутових приладів та критичних навантажень, таких як холодильники, медичні прилади та системи зв'язку. На відміну від традиційних резервних генераторів, літій-іонні акумуляторні системи пропонують безшумну, без викидів та зручну в обслуговуванні альтернативу, що робить їх кращим вибором для резервного живлення житлових приміщень.

Загалом, впровадження літій-іонних акумуляторів у житлових приміщеннях у забудованому середовищі продовжуватиме зростати завдяки технологічному прогресу, зниженню витрат та підвищенню обізнаності споживачів щодо рішень для сталого розвитку енергії. Оскільки рішення для зберігання енергії продовжують розвиватися, очікується, що домовласники відіграватимуть активну

роль в управлінні енергією, отримуючи вигоду від кращого контролю, фінансової економії та внеску в охорону навколишнього середовища.

Великі виробники та компанії впроваджують літій-іонні технології для житлових енергетичних систем, пропонуючи низку рішень, адаптованих до різних потреб ринку та застосувань. Наприклад, такі компанії, як Tesla (Powerwall), Huawei (FusionSolar Smart PV Energy Storage) та LG Energy Solution (RESU Series), пропонують інтегровані рішення для зберігання енергії в акумуляторах, оптимізовані для власного споживання, резервного живлення та взаємодії з мережею:

Tesla Powerwall: Powerwall від Tesla — популярне в усьому світі рішення для літій-іонних акумуляторів, що забезпечує безперешкодну інтеграцію із системами сонячної енергії та функції інтелектуального управління енергією. Останні моделі використовують хімічний склад LFP, відомий своєю підвищеною безпекою, довшим терміном служби та вищою термостабільністю, що робить їх ідеальними для використання в житлових приміщеннях.

iwell та Friday Energy (Нідерланди): Ці компанії є провідними голландськими компаніями, що впроваджують акумуляторні рішення на основі LFP у міських житлових проектах для покращення власного споживання та підвищення гнучкості мережі. Індивідуальні рішення для густонаселених районів з обмеженим простором дозволяють зберігати надлишок сонячної енергії в будівлях, дозволяючи розряджати її в пікові періоди, тим самим зменшуючи витрати на електроенергію та залежність від мережі. Обидві компанії інтегрують свої системи зберігання в програми реагування на попит, пропонуючи такі послуги, як зменшення пікового навантаження, балансування навантаження та управління перевантаженнями. Iwell зосереджується на інтелектуальних рішеннях для зберігання, які сприяють оптимізації енергії в режимі реального часу. На противагу цьому, Friday Energy пропонує модульні акумуляторні системи, інтегровані з цифровими платформами для прогнозного диспетчеризування та послуг підтримки мережі, включаючи регулювання частоти та керування напругою.

Sonnen: Німецький виробник, що пропонує модульні рішення для зберігання енергії в житлових приміщеннях по всій Європі. Системи Sonnen включають алгоритми штучного інтелекту (ШІ) для прогнозного управління енергією, що дозволяє користувачам досягати вищого рівня енергетичної автономності та участі у віртуальних електростанціях (ВЕС).

LG Chem RESU: Відома своєю високою щільністю енергії та компактним дизайном, компанія LG Chem постачає побутові акумулятори з можливостями інтелектуального керування, що сприяє енергонезалежності та зниженню пікових навантажень. Ці системи широко використовуються як в мережевих, так і в автономних середовищах.

Значні початкові інвестиції (CAPEX), пов'язані з системами акумуляторного зберігання енергії, продовжують створювати головну перешкоду для їх широкого використання в житлових приміщеннях. Ці початкові витрати пов'язані з придбанням та встановленням акумуляторних систем, що охоплюють вартість акумулятора, інверторів, систем керування та професійних послуг з встановлення.

Крім того, експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування (OPEX) ще більше сприяють фінансовому навантаженню, особливо при довгостроковому володінні. Для підтримки ефективності та надійності акумулятори потребують регулярного оновлення програмного забезпечення, оцінки апаратного забезпечення та, врешті-решт, заміни елементів.

Значною складністю є масштабованість, особливо у великих житлових комплексах або енергетичних селищах. З розширенням систем витрати можуть значно зростати, що ускладнює їхню доступність без шкоди для продуктивності. Хоча більші установки можуть використовувати ефект масштабу, загальна фінансова доцільність залишається неоднозначною, особливо при об'єднанні багатьох акумуляторних блоків у цілісну систему.

Більше того, недостатні фінансові стимули перешкоджають широкому впровадженню цих систем у житловому секторі. Державні субсидії, податкові пільги та ринкові стимули можуть значно підвищити рентабельність інвестицій

(ROI) для акумуляторних систем; проте ці механізми часто демонструють невідповідність у різних місцях. За відсутності постійних стимулів домовласники виявляють небажання використовувати акумуляторні системи зберігання енергії, особливо коли конкуруючі альтернативи, такі як нетто-лічильник, пропонують більш економічні методи управління надлишками сонячної енергії. Тому подолання цих економічних перешкод вимагає поєднання зниження витрат, сприятливого регулювання та креативних моделей фінансування для підвищення фінансової привабливості рішень для акумуляторних систем зберігання енергії у житловому секторі.

## **Висновки до розділу 2**

Ключовим результатом цього огляду є структурована класифікація застосувань акумуляторів для індивідуального використання, спільного зберігання та енергетичні спільноти. Хоча окремі BESS в першу чергу спрямовані на покращення власного споживання та зменшення пікових навантажень, спільні системи, такі як громадське зберігання енергії (CES) та агреговані багатобудівельні системи, можуть покращити гнучкість локальної мережі та механізми розподілу витрат. Найбільш масштабне застосування, VPP, демонструє, як розподілене зберігання може брати участь в оптових ринках електроенергії та послугах регулювання частоти. Однак, залишається критична прогалина в тому, як ці різні масштаби динамічно взаємодіють. Майбутні дослідження повинні зосередитися на багаторівневих стратегіях керування, які дозволяють BESS переходити між ролями, максимізуючи гнучкість та прибутковість безперешкодно.

## **3 ВИРІШЕННЯ ПРИКЛАДНИХ РОЗРАХУНКОВИХ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **3.1 Захист розподіленої генерації: проблеми та рішення**

Розподілена генерація (РГ) – це майбутнє енергетики. Ця технологія забезпечує двонаправлений потік енергії в електричній мережі. Дослідники стикаються з багатьма викликами щодо точної реалізації схем захисту для розподільчих мереж, підключених до мереж РГ. Розроблені схеми повинні відповідати вимогам до селективності, надійності та чутливості. Більшість дослідників вважають, що традиційні схеми захисту, засновані на виявленні перевантаження по струму, недостатні для повного та точного захисту розподіленої енергетичної системи, підключеної до РГ. Існує багато проблем, які необхідно вирішити, перш ніж розпочати шлях до успішного впровадження цих схем.

Протягом останніх кількох десятиліть використання відновлюваних джерел енергії зросло через прогрес у використанні відновлюваних ресурсів, погіршення проблем у лініях передачі та розподілу, зростання схильності до виробництва електроенергії на рівні розподілу, скорочення використання викопного палива та необхідність підвищення якості та надійності електроенергії. Ці джерела виробництва електроенергії називаються джерелами розподілу (DG). Встановлення ресурсів DG в електроенергетичній системі змінює її поведінку, дозволяючи комунальним підприємствам використовувати переваги менших та гнучкіших ресурсів. Ця нова технологія перетворила енергосистеми на менші мережі, відомі як мікромережі. Мікромережа - це активна розподільча мережа, що складається з ресурсів DG, різних навантажень на рівні напруги розподілу та елементів накопичення енергії. З точки зору мережі, мікромережа є вигідною, оскільки вона є керованим блоком і може використовуватися як концентроване навантаження. З точки зору клієнтів, мікромережа може бути спроектована відповідно до їхніх особливих вимог, таких як підвищена локальна надійність, менші втрати в фідерах, краща локальна напруга, підвищена ефективність, корекція провалів напруги та

безперебійне живлення. З екологічної точки зору, мікромережа зменшує забруднення навколишнього середовища та глобальне потепління, оскільки вона генерує менше чадного газу. Хоча мікромережа є придатною заміною обмеженого викопного палива та може ефективно вирішувати проблеми з виробництвом електроенергії, вона все ще здебільшого обмежена лабораторним масштабом через багато технічних проблем. Деякі з найважливіших із цих проблем – це захист, безпека, якість електроенергії, робота в нормальному та ізольованому режимах, керування напругою та частотою, робота за принципом «підключи та працюй», управління енергією та стабільність системи.

Розробка відповідного методу захисту мікромережі є складною з двох суттєвих причин. По-перше, мікромережі є переважно динамічними мережами. Фактично, навантаження або блок розподіленої мережі може бути підключений до мікромережі або відключений від неї в будь-який момент часу. Інша проблема полягає в тому, що мікромережі можуть працювати як у мережевому, так і в ізольованому режимах з різними струмами короткого замикання. Тому комплексна схема проектування повинна захищати мережу в обох режимах. Для належної роботи мікромережі життєво важливо, щоб з'єднувальний перемикач (перемикач, що з'єднує мікромережу з основною мережею) розмикався під час будь-якого неприйняттого порушення якості електроенергії або несправності в основній мережі, а мережі РГ повинні бути здатні витримувати навантаження на ізольованій ділянці, підтримуючи прийнятні рівні напруги та частоти для ізольованих навантажень. Слід впроваджувати відповідні схеми скидання навантаження, якщо потужність генерації РГ не задовольняє потреби ізольованої системи. Залежно від технології перемикача, можуть виникнути деякі короточасні перебої з живленням (РГ можуть зупинитися, щоб жити ізольовану ділянку на короткий проміжок часу) під час переходу від мережевого режиму до ізольованого режиму; У цій ситуації розподільчі пристрої (DG) в ізольованій частині повинні бути здатні до швидкого перезапуску та під'єднання ізольованого навантаження після розмикання вимикача. Пристрої DG повинні забезпечувати активну та реактивну потужність в

ізолюваному режимі та повинні виявляти струм короткого замикання після з'єднувального вимикача. Після відновлення основного живлення мережі вимикач не повинен замикатися, доки як мережа, так і ізолювана система не будуть належним чином синхронізовані, тобто напруга, частота та фазовий кут обох систем повинні бути в допустимих межах. Для несправностей, що виникають в ізолюваній системі, повинна бути система захисту, яка може виявити несправність та швидко ізолювати несправну частину від решти системи, забезпечуючи мінімальні втрати генерації та переривання навантаження. Крім того, система захисту ізолюваної системи повинна бути більш чутливою, оскільки струми короткого замикання в ізолюваній системі будуть набагато меншими, ніж струми короткого замикання в системі, підключеній до мережі.

Численні технічні питання системи захисту, з акцентом на проблему координації захисту, обговорюються в [41]. У [42] запропоновано скоординований метод управління як захистом мережі, так і захистом інтерфейсу розподіленої мережі (РД). Для забезпечення ефективного захисту мережі з'єднаної мікромережі в [43] реалізовано багаторівневий підхід.

Існує багато причин, які переконали дослідників та експертів з енергетики змінити парадигму в бік розподіленого випромінювання. Деякі основні фактори застосування, завдяки яким сфера застосування DG покращується та набуває популярності, обговорюються у [44].

Ще одним важливим мотивуючим фактором для використання розподіленого електропостачання (РГ) є якість та надійність постачання. Проблеми з надійністю вказують на тривалі перебої, тобто падіння напруги майже до нуля. Лібералізація ринків електроенергії робить споживачів більш усвідомленими щодо важливості надійності електропостачання. Слід зазначити, що споживачі не турбуються про перебої в постачанні, оскільки не сприймають це як велику небезпеку. Тим не менш, це може відрізнитися на лібералізованих ринках. Високий рівень надійності означає високі інвестиційні витрати та витрати на обслуговування для мережі та генеруючої організації. Через спокусу заощадити гроші, що виникає внаслідок

здорової конкуренції у виробництві, та дії регуляторів, метою яких є досягнення короткострокових знижок на тарифи для мережевих компаній, рівень надійності може знизитися. Однак наявність надійного електропостачання є важливою для суспільства в цілому та промисловості зокрема (хімічна, нафтова, нафтопереробна, паперова тощо). Компанії можуть виявити, що надійність мережі знаходиться на небезпечно низькому рівні, і погодитися інвестувати в РГ, щоб підвищити загальну надійність електропостачання до бажаного рівня. Крім того, при падінні напруги майже до нуля (проблеми з надійністю) також можуть бути менші відхилення напруги. Останні відхилення вважаються ознаками якості електроенергії. Якість електроенергії стосується того, наскільки характеристики потужності відповідають ідеальним формам хвиль синусоїдальної напруги та струму. Тому, якщо говорити прямо, якість електроенергії включає надійність. Технології розподіленого електропостачання (DG) також можуть сприяти забезпеченню переваг у вигляді більш надійного електропостачання для галузей, які потребують безперервного обслуговування. На рисунку 3.1 зображено діаграму потоку енергії у інтегрованій grid системі.



Рисунок 3.1 – Діаграма потоку енергії у інтегрованій grid-системі

Мікромережа – це група взаємопов’язаних навантажень та розподілених енергетичних ресурсів у чітко визначених електричних межах, яка діє як єдиний керований об’єкт стосовно мережі і може підключатися та відключатися від мережі, щоб забезпечити її роботу як у мережевому, так і в ізольованому режимі (див рис. 3.2).

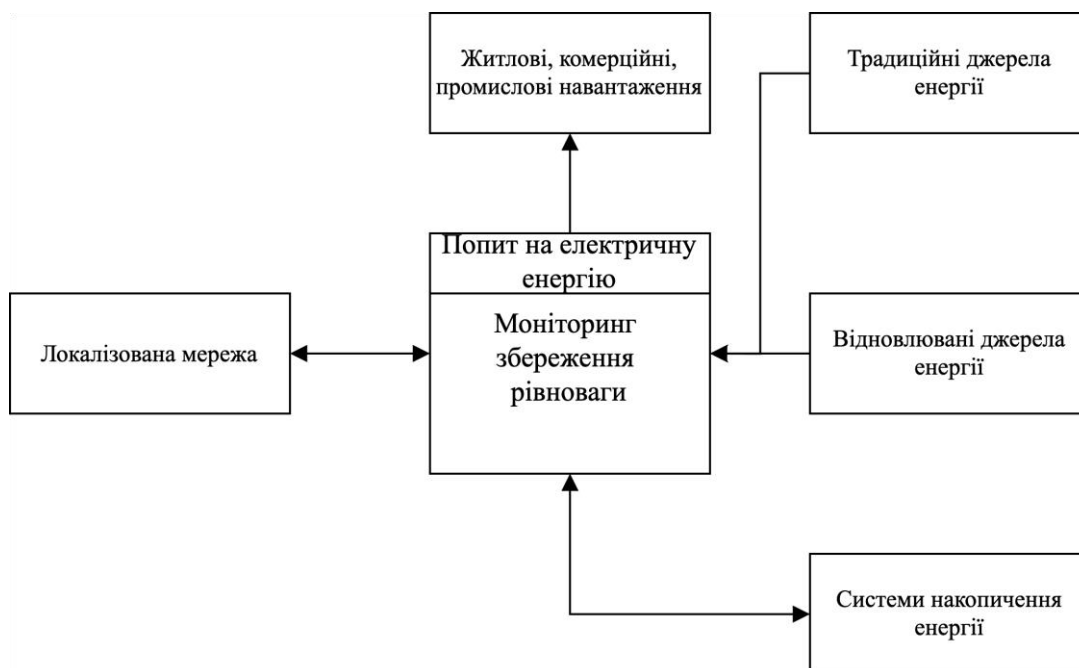


Рисунок 3.2 – Базова діаграма інтегрованої microgrid CAE

Режим підключення до мережі. У цьому режимі основна енергомережа активна, а статичний вимикач замкнутий. Усі живильники отримують живлення від основної мережі. Іншими словами, критичні навантаження (на живильниках А та В) та некритичні навантаження (на живильнику С) живляться від основної мережі. Рисунок 3.3 зображує цю ситуацію. РСС позначає точку спільного підключення.

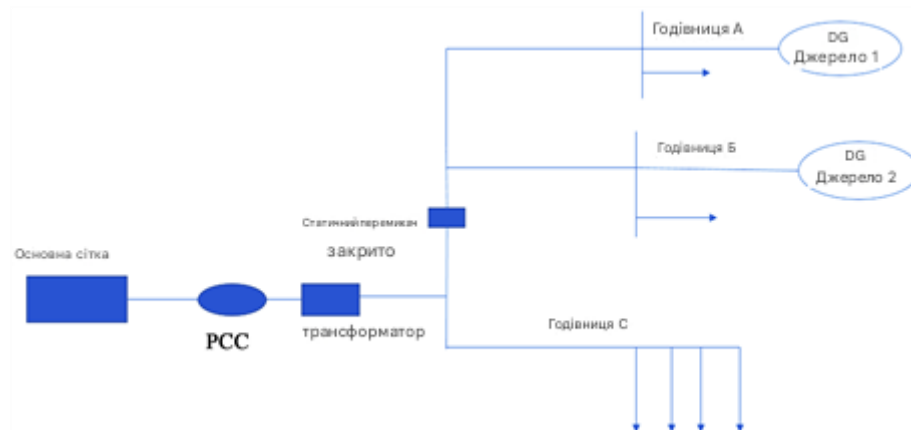


Рисунок 3.3 - Режим підключення мікромережі до мережі

Існує багато джерел несправностей, включаючи стихійні лиха, фізичні аварії, відмови обладнання та неправильну експлуатацію. Вони зведені на рисунку 3.4. Як видно з рисунка, такі природні явища, як блискавка, землетруси, піщані бурі,

снігові хуртовини тощо, відіграють значну роль у виникненні несправностей системи. Іноді людська помилка та фізичні аварії відіграють негативну роль, спричиняючи несправності на лініях та трансформаторах.

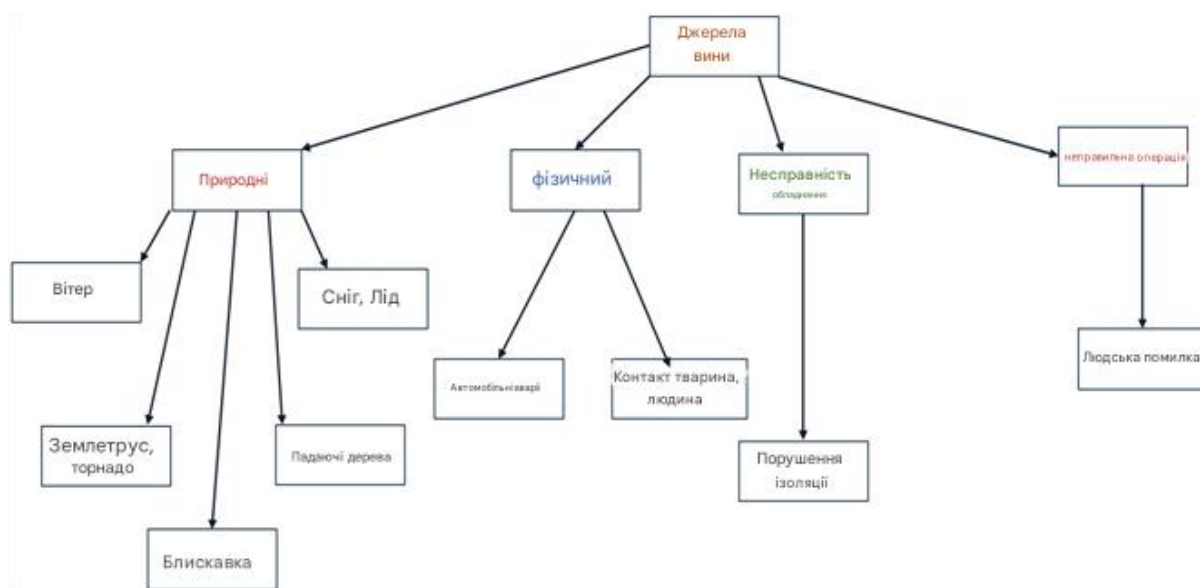


Рисунок 3.4 - Основні джерела несправностей

У багатьох дослідницьких роботах згадуються проблеми, пов'язані із захистом розподіленої ланки; проте лише деякі з них пропонують певні рішення. Нижче наведено деякі можливі рішення проблем, що виникають під час захисту активних розподільчих мереж.

Захист інверторно-інтерфейсних блоків розподіленої генерації. Традиційні системи захисту не можуть забезпечити точний захист для джерел розподіленого струму, підключених до інвертора, оскільки струм короткого замикання, що виробляється цими джерелами розподіленого струму, значно менший. Тепловий номінальний коефіцієнт інвертора обмежує струм. Одним з можливих рішень може бути використання інвертора з вищим номіналом, який може забезпечити струм, достатній для спрацювання захисного реле у разі несправності. Хоча це рішення є дорогим, воно вирішить проблему.

Диференціальний захист за допомогою зв'язку. Традиційний захист від перевантаження по струму не здатний забезпечити точний захист, оскільки він не може розрізняти джерела розподіленого струму, підключені до інвертора, та струм

перевантаження. Для правильного усунення несправності в ізолюваному режимі та забезпечення селективності важливо, щоб різні джерела розподіленого струму ефективно взаємодіяли одне з одним. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати диференціальний зв'язок пілотного дроту. Це дозволяє обмінюватися інформацією на обох кінцях лінії.

Збалансоване поєднання різних типів джерел розподіленого газу. Для належного захисту розподільчої мережі в ізолюваному режимі, джерела розподіленого живлення синхронного генератора можуть використовуватися в поєднанні з джерелами розподіленого живлення, підключеними до інвертора. Таким чином, струму короткого замикання буде достатньо для спрацювання реле.

Симетричні та диференціальні складові струму. Симетричні компоненти можуть бути використані для захисту розподільчої мережі від несиметричних замикань, таких як одиночні замикання між лінією та землею. Одиночні замикання між лінією та землею та між лінією можна виявити за допомогою складових струму нульової та зворотної послідовності відповідно. Тим не менш, нульова та зворотна послідовності струму також не дорівнюють нулю, коли джерело розподіленого струму працює за нормальних умов. Це пояснюється тим, що розподільча мережа, підключена до розподіленого струму, зазвичай може включати однофазні навантаження або трифазні незбалансовані навантаження.

Обмежувач струму короткого замикання (FCL). Обмежувачі струму короткого замикання можуть бути дуже корисними для пом'якшення впливу жерел розподіленої генерації (DG) на головну мережу. По суті, вони складаються з реакторів з великим реактивним опором, з'єднаних послідовно з лінією, що з'єднує головну мережу та джерело DG. Великий реактивний опір відіграє життєво важливу роль у мінімізації струмів короткого замикання, що створюються джерелами DG. Однак найскладнішим завданням тут є встановлення правильного реактивного опору. Якщо він занадто малий, струми короткого замикання DG впливатимуть на головну систему, а якщо він занадто великий, він пригнічуватиме

струми до такої міри, що захисне реле не зможе точно спрацювати при потрібному замиканні.

Пристрої накопичення енергії. Як згадувалося раніше, струм короткого замикання в ізольованому режимі за наявності джерел розподіленого струму, підключених до інвертора, обмежений приблизно вдвічі більшим за номінальний струм через теплові обмеження інвертора. Можливим рішенням було б використання пристроїв накопичення енергії, таких як великі батареї, маховики та суперконденсатори, для забезпечення достатнього струму для роботи реле. Однак використання цих пристроїв спричинить значні витрати; і, що найважливіше, цей метод значною мірою спиратиметься на технологію виявлення ізольованого режиму.

Адаптивний захист. Для роботи зі змінними режимами роботи активної розподільчої мережі дуже корисним є адаптивний захист. Коли відбувається зміна топології системи, реле автоматично оновлюють свої значення з бази даних збережених значень.

Розумний захист. Інтелектуальний захист базується на тому факті, що джерело розподіленої енергії, інтегроване з основною мережею, повинно мати власну схему захисту на РСС для передачі електроенергії. Застосування ізоляції місця несправності та відновлення електропостачання (FLISR) є значним кроком в інтелектуальному захисті, оскільки воно дозволяє розподіленим комунальним підприємствам розробляти передові методи захисту.

Швидкість зміни напруги. Виявлення втрати напруги в мережі можливе через швидкість зміни напруги. Якщо система розподілу переходить в режим ізольованого підключення, швидкість зміни напруги значно більша, ніж під час роботи від мережі. Таким чином, швидкість зміни напруги може бути використана для виявлення її замикання. Недоліком цього методу є його чутливість до мережевих перешкод, окрім LOM.

### **3.2. Розв'язання задачі розподілу розподіленої генерації за допомогою нового методу**

Сучасна система електропостачання є однією з найскладніших систем в історії людства. Електростанції класичної генерації централізовані, контролюються, будуються далеко від людських міст і передаються на тисячі кілометрів до необхідних електричних навантажень. В останні десятиліття система електроенергії страждала від різних відключень через різні причини, які вплинули на мільйони споживачів у всьому світі. Щоб подолати деякі проблеми сучасної електромережі, включаючи, але не обмежуючись, втрати електроенергії, збої, відключення електроенергії, стрибки напруги, гармоніки, ефективність, нестабільність напруги та витрати, джерела розподіленої генерації використовуються поблизу клієнтів, підключених або ізольованих від основної електричної мережі, що забезпечує ще одне рішення для використання менш забруднених джерел електроенергії, оскільки більшість технологій DG є поновлюваними екологічно чистими джерелами, такими як фотоелектричні системи та вітрові турбіни. Іншою причиною залучення технологій DG у деяких країнах є диверсифікація компаній, що постачають електроенергію, таким чином створюючи конкурентний ринок електроенергії, де клієнт отримує вигоду від різних категорій і цін на рахунки за електроенергію. Переваги розміщення та встановлення блоків розподіленої генерації у радіальній розподільчій мережі, окрім економічних та екологічних переваг, включають покращення профілю напруги, зменшення загальної втрати потужності в системі, покращення якості електроенергії, посилення надійності системи, захисту, підвищення стабільності системи, покращення продуктивності системи та керування потоком електроенергії.

Ресурси DG можна класифікувати на чотири типи:

- DG типу I: здатний видавати активну потужність у кВт і працює з одиничним коефіцієнтом потужності. Прикладами цього типу є фотоелектричні, паливні елементи та мікротурбіни;

- DG типу II: здатний видавати реактивну потужність у кВАР. До цього типу належать компенсатори реактивної потужності, конденсатори та синхронні компенсатори;
- DG типу III: здатний подавати як активну, так і реактивну потужність у кВт і кВАР відповідно. Ресурси DG залежно від синхронної машини, як когенерація, є частиною цього типу розподіленої генерації;
- DG типу IV: здатний одночасно подавати активну потужність у кВт і споживати реактивну потужність у кВАР. Яскравим прикладом такого типу ДГ є індукційні генератори, що використовуються на ВЕС.

Було зроблено багато спроб із застосуванням методів, заснованих на штучному інтелекті (AI), щоб оптимально визначити розмір і розташувати джерела розподіленої генерації (DG) у системах розподілу. Алгоритм оптимізації кита та його модифікації належать до методів ройового інтелекту, які входять до складу методів на основі AI. Більшість методів ройового інтелекту надихають істот і види в природі.

Застосування алгоритму оптимізації мурашиних левів для оптимального розподілу та розміру відновлюваних технологій РГ (вітрогенераторів і фотоелектричних систем), де коефіцієнти чутливості до втрат використовуються для визначення необхідних шин-кандидатів для підключення блоків DG.

Метою оптимального розміщення та визначення розмірів блоків DG у системі радіального розподілу є покращення профілю напруги системи та зменшення реальних втрат потужності в кВт за умови, що не порушуються попередньо визначені системні обмеження. Оптимальним рішенням є мінімізація реальних втрат потужності, які можна сформулювати як:

$$\text{Minimize } F = \min(P_{\text{загальні втрати}}), \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{загальні втрати}}$  – це загальні реальні втрати потужності розподільної мережі відповідно до наступних обмежень:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, \quad (3.2)$$

де  $V_{\min}$  – мінімальна межа напруги шини,

$V_{max}$  – максимальна межа напруги шини.

$$P_{loss} + P_d = P_{slack} + \sum_{k=1}^N P_{DG}, \quad (3.3)$$

де  $P_{slack}$  – це справжня потужність шини Slack,

$P_{loss}$  — втрата потужності системи в кВт,

$P_d$  — навантаження системи в кВт,

$P_{DG}$  — потужність одиниці DG.

Етапи алгоритму:

а) Використовуючи метод Ньютона-Рафсона, вирішити задачу потоку навантаження для даного тестового фідера та визначити загальну втрату потужності системи.

б) Ініціалізувати випадкову кількість агентів, встановити лічильник ітерацій на «1», встановити значення для мінімального та максимального розміру кожної одиниці DG, вказати кількість використовуваних одиниць DG.

в) Визначити реальні втрати потужності для генерованого обсягу шляхом виконання розрахунків потоку навантаження.

г) Вибрати значення DG з найменшими втратами потужності як найкраще поточне рішення.

г) Якщо  $p < 0,5$  і  $A \geq 1$ , оновити положення агентів.

д) Повторити крок «с».

е) Замінити поточне найкраще рішення оновленими значеннями, якщо отримані результати нижчі, ніж поточне найкраще рішення. В іншому випадку перейти до кроку h.

є) Якщо  $p < 0,5$  і  $A < 1$ , оновити положення агентів.

ж) Повторити крок с.

з) Замінити поточне найкраще рішення оновленими значеннями, якщо отримані результати нижчі, ніж поточне найкраще рішення. В іншому випадку перейдіть до кроку k

и) Якщо  $p \geq 0,5$ , оновити положення агентів.

і) Повторіть крок с.

і) Замінити поточне найкраще рішення оновленими значеннями, якщо отримані результати нижчі, ніж поточне найкраще рішення. В іншому випадку перейдіть до кроку п.

й) Почати другу ітерацію.

к) Повторювати доки не буде виконано максимальну кількість ітерацій.

Оптимальний розподіл та визначення розмірів розподіленої генерації, виконаний на тестових системах з шинами IEEE 33, був проведений з урахуванням шин 7, 10, 13, 26, 31 та 33 як придатних для розподілу РГ. Це міркування ґрунтується на тому факті, що в реальних системах розподілу не всі шини мережі мають право на розподіл РГ через обмеження, пов'язані з доступністю ресурсів, а також обмеженнями землекористування. Також було враховано обмеження, що максимальний коефіцієнт проникнення РГ у цій системі становить 30%, тобто загальна генерація не може перевищувати 30% активного навантаження мережі. Таким чином, для цієї системи максимальна генерація, що підлягає розподілу, становить 1114,5 кВт.

Обсяги потужності, виділеної кожній з шин, представлені в таблиці 3.1. Для перевірки результатів алгоритму SOS було проведено аналіз конвергенції з використанням результатів 10 оптимізаційних симуляцій з використанням метрики порівняння середньої точки. У таблиці 3.2 представлені результати цих симуляцій. Зауважте, що всі вони призвели до подібних значень, що свідчить про конвергенцію алгоритму.

Таблиця 3.1 - Активна потужність розподіленого генератора (DG), що розподіляється на шину алгоритмом SOS у тестовій мережі з 33-шинним протоколом IEEE

Активна потужність мережі							
Шина	7	10	13	26	31	33	Загальна
Порівняння середніх точок	0	0	528.2	0	304.8	281.3	1114.4

Продовження таблиці 3.1.

Оцінювання за допомогою функції інтервального вимірювання	0	145.6	410.47	0	527.3	30.63	1114.3
---	---	-------	--------	---	-------	-------	--------

Таблиця 3.2 - Аналіз конвергенції алгоритму SOS на тестовій мережі з шиною IEEE 33

SOS		
Моделювання	Нижня межа втрат (кВт)	Верхня межа втрат (кВт)
1	72.95	77.88
2	72.91	77.84
3	71.15	76.88
4	73.2	77.73
5	72.96	77.69
6	73.08	78.01
7	72.83	77.86
8	74	78.83
9	72.93	77.76
10	72.91	77.93

Запропонована методологія враховує лише результати, які відповідають обмеженням напруги. Рисунок 3.5 дозволяє перевірити цей критерій. У цьому випадку змінні  $V_{inf\_m1}$  і  $V1$  – це відповідно нижня та верхня межі величини інтервальних напруг на кожній з шин у розв'язку, отриманому алгоритмом SOS з використанням метрики порівняння середніх точок. З іншого боку,  $V_{inf\_m2}$  і  $V_{sup\_m2}, \dots, V_{inf}$  і  $V_{sup}$  – це відповідно нижня та верхня межі величини інтервальної напруги на кожній із шин, отриманих за допомогою IPF без розподіленого генератора. Зауважте, що спостерігається суттєве покращення профілю напруги, коли розподілений генератор включено до мережі.

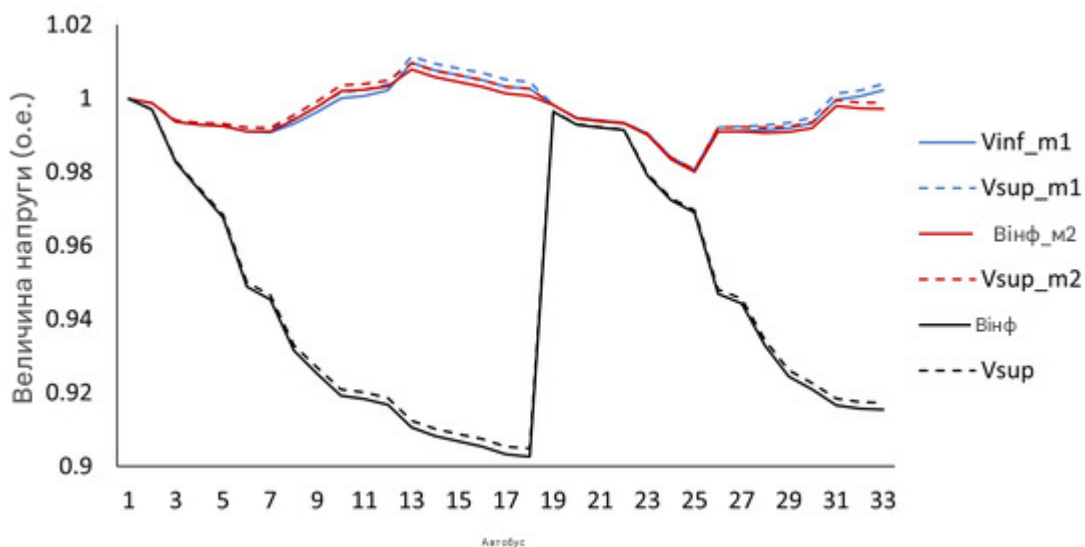


Рисунок 3.5 - Профіль напруги тестової системи шини IEEE 33 — SOS

У таблиці 3.3 представлено значення інтервальних втрат, отримані за допомогою алгоритму SOS для двох використаних метрик. На рисунках 3.6 та 3.7 показано збіжність середніх точок інтервальних втрат та їх діаметрів для двох метрик.

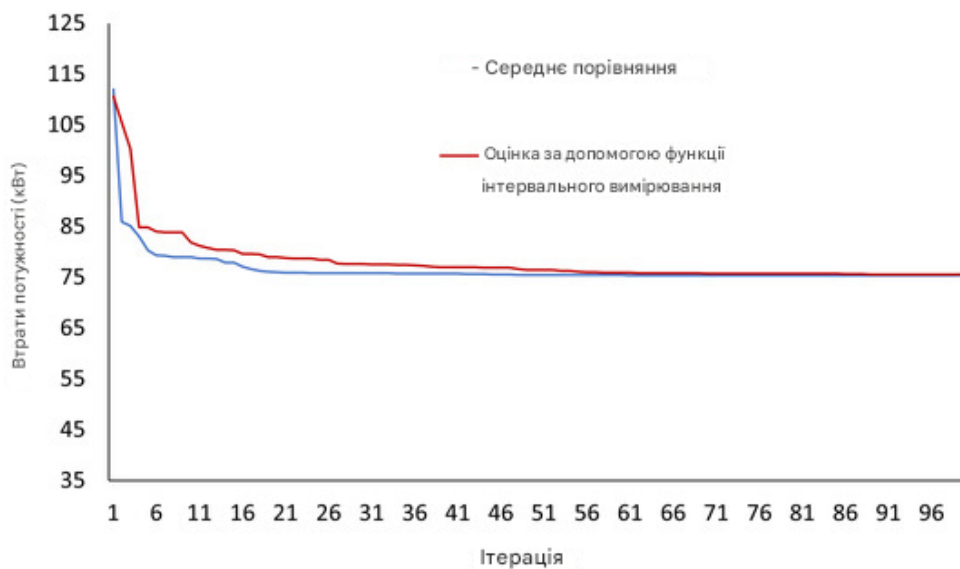


Рисунок 3.6 - Збіжність алгоритму SOS для тестової системи IEEE 33-bus — середні точки



Рисунок 3.7 - Збіжність алгоритму SOS для тестової системи IEEE 33-bus — діаметри

Таблиця 3.3 - Інтервальні втрати, отримані за допомогою алгоритму SOS для мережі з шиною IEEE 33

Метрика	Нижня межа втрат (кВт)	Верхня межа втрат (кВт)
Порівняння середніх точок	72.95	77.88
Оцінювання за допомогою функції інтервального вимірювання	73.14	77.91

Отже, згідно з отриманими результатами, можна зробити висновок, що алгоритм SOS є надійним та ефективним у вирішенні проблеми розподілу та визначення розміру DG, якщо враховувати обидві метрики.

### Висновки до розділу 3

У цьому дослідженні розглянуто деякі основні проблеми та можливі рішення для активних розподільчих мереж. До проблем належать помилкове спрацьовування, засліплення захисту, координація запобіжників та повторних вмикачів, зміни імпедансу короткого замикання, несинхронізоване повторне вмикання, зворотний потік потужності, втрата мережі, вибір захисного пристрою, селективність пристроїв, заземлення, однофазні з'єднання та коливання рівнів струму короткого замикання. Можливі рішення включають використання інвертора вищого номінального значення, каналів зв'язку, пристроїв накопичення енергії, адаптивного захисту, інтелектуального захисту, обмежувача струму короткого замикання, централізованого захисту, методів штучного інтелекту, блоків вимірювання фазорів, пілотного захисту на основі імпедансу, відключення джерел розподіленого живлення, збалансованої комбінації численних джерел розподіленого живлення та центрального автономного контролера управління. З параметрами та моделюванням, що використовувалися в цій роботі, метаевристика SOS отримала кращі результати у всіх симуляціях. Одна з переваг SOS над PSO полягає в тому, що SOS не вимагає конфігурації або точного налаштування параметрів. Впроваджені методології були оцінені за допомогою двох різних метрик: порівняння середніх точок та функції інтервальної оцінки. З отриманих результатів видно, що обидві метрики представляють еквівалентні результати; однак результати функції інтервальної оцінки показують менший діаметр.

## 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Щоб розробити стратегії, які застосовуються до реальної системи, необхідно визначити певну кількість правил та обмежень.

Оптимізація за допомогою лінійного програмування (LP) — це метод математичної оптимізації, що дозволяє максимізувати або мінімізувати лінійну функцію, яка складається з кількох змінних, як це описано у бібліографічній частині. Оптимізація LP враховує обмеження для всіх параметрів. Оскільки мікромережа може купувати або продавати енергію в мережу, оптимізація спрямована на мінімізацію економічного балансу обмінів із мережею. Лінійна функція, що задає експлуатаційні витрати для оптимізації, виглядає так:

$$Cout_{tot} = \sum_{t=1}^N [Pr_c(t) \times Cout_{ach}(t) - (Pp_r(t) + Pb_r(t)) \times Cout_{ven}(t)] dt, \quad (4.1)$$

де  $Pr_c$  - потужність, яку мережа подає на навантаження,

$Pp_r$  - потужність PV, подана в мережу,

$Pb_r$  - потужність батареї, подана в мережу,

$Cout_{ach}$  - вартість купівлі електроенергії у мережі,

$Cout_{ven}$  - вартість продажу електроенергії у мережу.

Негативна вартість означає «прибуток» для системи (без урахування амортизації установки, технічного обслуговування чи експлуатаційних витрат).

### 4.1 Стратегії керування локальними електроенергетичними системами на основі правил

Стратегії, засновані на правилах (RBC), – це стратегії енергоменеджменту системи, які приймають рішення, спираючись на набір попередньо визначених правил, як це детально описано у бібліографічній частині. Ця оптимізація дотримується вищезазначених обмежень і лімітів.

Було розглянуто кілька стратегій RBC. Кожна з цих стратегій надає пріоритет фотоелектричній станції для живлення навантаження. Важливий параметр— це різниця  $\Delta$  між потужністю, виробленою PV, та споживаною навантаженням, яка обчислюється так:

$$\Delta = P_p - P_c \quad (4.2)$$

Далі розподіл потужностей у мікромережі здійснюється по-різному залежно від стратегії.

1. Стратегія RBC1 представляє часткове самоспоживання. Самоспоживання називається частковим, якщо існує з'єднання з основною мережею для продажу надлишкової енергії та купівлі відсутньої енергії. Метою цієї стратегії RBC є максимізація самоспоживання системи. Така максимізація досягається за рахунок використання енергії, виробленої системою, для живлення електричних навантажень у пріоритетному порядку, перш ніж звертатись до мережі. Ця базова стратегія працює так:

а. Якщо  $\Delta \geq 0$  (виробництво > споживання): навантаження живиться від фотоелектричної системи. Після задоволення потреб навантаження надлишок використовується для зарядки батареї до її максимального рівня заряду (SOC, тобто 100%). Коли батарея повністю заряджена, надлишок продається в мережу, за умови що потужність для передачі не перевищує дозволу, інакше частина виробленої енергії втрачається.

б. Якщо  $\Delta$  дорівнює нулю, PV живить лише навантаження, батарея та мережа не використовуються.

в. Якщо  $\Delta < 0$ : потужності PV недостатньо для покриття навантаження. У межах можливого, нестача покривається розрядкою батареї. Якщо потужності батареї недостатньо, для живлення навантаження залучається мережа. Якщо запитана потужність у мережі перевищує дозволу, виникає відмова системи.

Перевагою такої стратегії є сприяння використанню відновлюваної енергії в мікромережі та зниження залежності мікромережі від основної мережі.

2. Стратегія RBC2 — це стратегія економічної оптимізації. Вона була розроблена з урахуванням переважно вартості електроенергії з основної мережі. Завдяки цьому елементу мікромережа оптимізує свою роботу, надаючи перевагу використанню основної мережі, коли ціна купівлі електроенергії низька порівняно з ціною продажу, і батареї – коли ціна купівлі електроенергії висока порівняно з ціною продажу.

Ця стратегія додає умову, яка дозволяє уникнути надто швидкого заряду батареї без урахування можливого майбутнього надлишку виробництва від PV, який би тоді було втрачено. Стратегія RBC2 працює наступним чином:

а. Якщо  $0 \leq \Delta < Pr_e^{max}$ : PV живить усе навантаження, а надлишок виробництва знаходиться між 0 та максимальною потужністю, яку можна подати в мережу. За цих умов надлишок виробництва передусім використовується для заряду батареї. Коли батарея повністю заряджена, надлишок продається в основну мережу. Якщо  $\Delta$  дорівнює нулю, PV живить лише навантаження.

б. Якщо  $\Delta \geq Pr_e^{max}$ : надлишок PV перевищує максимальну потужність, яку можна подати в основну мережу. Якщо дати перевагу заряду батареї, батарея може швидко стати повністю зарядженою, і тоді не зможе зберігати майбутні надлишки PV. Оскільки і мережа має обмеження, ця енергія буде втрачена. Відтак, після забезпечення навантаження, ми спочатку продаємо надлишок у мережу в межах максимально допустимої потужності, а вже потім заряджаємо батарею. Це дозволяє зберігати батарею для більших надлишків PV, які можуть з'явитися в майбутньому.

в. Якщо  $\Delta \leq 0$  та  $Cout_{ach} < Cout_{ven}$ : PV недостатньо для покриття всього споживання, а ціна купівлі електроенергії з мережі низька порівняно з ціною продажу електроенергії, виробленої мікромережею. У таких умовах навантаження живиться спочатку від мережі, а потім від батареї, коли мережа досягає свого ліміту. З економічної точки зору вигідніше використовувати мережу в цей період.

г. Якщо  $\Delta \leq 0$  та  $Cout_{ach} \geq Cout_{ven}$ : потужності, виробленої PV, недостатньо для повного живлення навантаження. Решта потужності спочатку

подається від батареї, а потім з мережі. Порівнюючи ціни купівлі і продажу електроенергії, вигідніше використовувати енергію батареї, коли ціна купівлі електроенергії висока.

д. Якщо  $t \in [4:00 - 5:00]$  та  $SOC \geq 1/2$ : зранку, перед початком виробництва PV, батарея розряджається, поки рівень її заряду не досягне 50 %, щоб жити навантаження продавати енергію в мережу у разі необхідності. Це дозволяє батареї звільнити трохи місця для накопичення більшої кількості PV протягом дня. Оскільки невідомо, яка кількість PV буде вироблена протягом дня, ранкову розрядку обмежують до 50 %, щоб уникнути нестачі енергії у випадку похмурої погоди.

е.  $t \in [4:00 - 5:00]$  та  $(SOC < 1/2)$ : якщо рівень заряду батареї низький на початку дня, вона використовується лише для живлення навантаження у випадку, якщо ціна електроенергії з мережі буде високою.

Ця стратегія дозволяє скористатися зміною ціни на електроенергію, а отже, покращити економічний баланс обмінів з мережею.

### 3. Стратегія RBC3

Стратегія RBC3 також є стратегією економічної оптимізації. Вона досить схожа на стратегію RBC2, але, окрім ціни електроенергії, використовує ще один новий індикатор для прийняття рішень. Йдеться про прогнозування сонячного освітлення, яке дозволяє передбачати виробництво PV.

Прогнозування сонячного освітлення здійснюється з кроком 0,1 години на горизонті прогнозу 6 годин. Кожні 0,1 години ми прогнозуємо рівень освітленості на +6 годин. Дані такого прогнозу можна використовувати двома різними способами: використовуючи середнє значення або визначаючи індикатор, що дозволяє оцінити інтенсивність прогнозованого виробництва. Вибір зроблено на користь використання середнього значення, оскільки цей метод простіший у реалізації.

Далі, завдяки даним про прогнозовану сонячну радіацію, ми розраховуємо середнє значення виробництва PV на виході з інвертора протягом наступних шести

годин ( $P_{pm,6h}$ ). Це середнє розраховується на кожному кроці часу шляхом підсумовування потужностей PV, передбачених на наступні шість годин. Сума потім ділиться на кількість точок, що відповідають кроку часу.

Використання прогнозування застосовується у наступних частинах стратегії:

а. Якщо  $0 \leq \Delta < Pr_e^{max}$  і  $Pp_{m,6h} \geq Pr_e^{max}$ : навантаження живиться лише від PV. Прогноз дозволяє дізнатися, що потужність PV, яка буде вироблена мікромережею у наступні шість годин, перевищить максимальну потужність, яку можна подати в мережу. За цих умов доцільно не заряджати батарею занадто швидко, щоб, коли настане час, можна було накопичити надлишок виробництва PV. Надлишок виробництва у цьому випадку подається в мережу.

б. Якщо  $0 \leq \Delta < Pr_e^{max}$  і  $Pp_{m,6h} < Pr_e^{max}$ : навантаження живиться лише від PV. Завдяки прогнозу можна дізнатися, що середня потужність PV у наступні шість годин буде меншою за максимальну потужність, яку може поглинути мережа. У такому разі приймається рішення надавати пріоритет зарядці батареї. Коли батарея повністю розряджена, надлишок подається в мережу.

#### 4.2 Стратегія оптимального керування режимами

На основі розглянутих стратегій сформовану стратегію на основі правил для системи яка має у складі фотоелектричну систему та декілька елементів системи зберігання розрахованих на різну потужності, і різною вартістю її заряду та розряду.

$$\Delta = Pp - Pc \quad (4.3)$$

1. Якщо  $\Delta \geq 0$  (виробництво > споживання) та  $\Delta \leq Pr_e^{max}$ : надлишок PV не перевищує максимальну потужність, яку можна подати в основну мережу) навантаження живиться від фотоелектричної системи. Після задоволення потреб навантаження надлишок використовується для зарядки батареї:

- спочатку заряджається та батарея В1 яка має меншу вартість та заряджена менше до 90% від максимального рівня заряду.

- Коли батарея В1 повністю заряджена, а надлишок ще  $\epsilon$ , то заряджається батарея В2 з більше високою вартістю.

Надлишок продається в мережу, за умови що потужність для передачі не перевищує дозволена для продажу від мережу.

2. Якщо  $\Delta \geq 0$  (виробництво > споживання) та  $\Delta \geq Pr_e^{max}$  (надлишок PV перевищує максимальну потужність, яку можна подати в основну мережу) навантаження живиться від фотоелектричної системи. Після задоволення потреб навантаження надлишок використовується спочатку для продажу в мережу в межах максимально допустимого продажу далі заряджаються батареї

- спочатку заряджається та батарея В1 яка має меншу вартість та заряджена менше до 90% від максимального рівня заряду.

- коли батарея В1 повністю заряджена, а надлишок ще  $\epsilon$ , то заряджається батарея В2 з більше високою вартістю.

3. Якщо  $\Delta$  дорівнює нулю, PV живить лише навантаження, батареї та мережа не використовуються.

4. Якщо  $\Delta < 0$  (потужності PV недостатньо для покриття навантаження) та  $Cout_{ach} < Cout_{ven}$  (PV недостатньо для покриття всього споживання, а ціна купівлі електроенергії з мережі  $Cout_{ach}$  низька порівняно з ціною продажу електроенергії  $Cout_{ven}$ , виробленої мікромережею.

– навантаження живиться спочатку від мережі, а потім від батареї В1 та батареї В2, коли мережа досягає свого ліміту.

5. Якщо  $\Delta < 0$  та  $Cout_{ach} \geq Cout_{ven}$  (потужності, виробленої PV, недостатньо для повного живлення навантаження, ціна купівлі електроенергії з мережі  $Cout_{ach}$  висока порівняно з ціною продажу електроенергії  $Cout_{ven}$ , виробленої мікромережею або дорівнює їй).

– потужності спочатку подається від батареї, по пріоритету спочатку В1 потім В2,

– якщо потужності батареї недостатньо, докупаємо енергію з мережі.

Розроблений алгоритм має наступні переваги:

- максимальне використання відновлюваних джерел енергії.
- наявність декількох батарей на різну ємність, з різною вартістю продажу енергії за 1кВ, дозволяє ефективніше використовувати акумуляторні батареї, зменшуючи цикли розряду-заряду.
- мікромережа оптимізує свою роботу, надаючи перевагу використанню централізованої мережі, коли ціна купівлі електроенергії низька порівняно з ціною продажу, і батареї – коли ціна купівлі електроенергії висока порівняно з ціною продажу.

### 4.3 Дослідження режимів роботи.

Різне обладнання, що складає мікромережу, підлягає технічним обмеженням у рамках цього дослідження:

1. Акумуляторна батарея: потужність батареї ( $P_b$ ) у кожен момент часу  $t$  – це потужність, яка розряджається або накопичується в батареї. Ця потужність відрізняється від потужності заряду (вхідної) і розряду (вихідної) батареї в кожен момент часу  $t$  ( $P_{b_{char}}$  і  $P_{b_{disch}}$ ), оскільки батарея має коефіцієнти корисної дії заряду ( $\eta_{char}$ ) і розряду ( $\eta_{disch}$ ). Наведена формула дозволяє розрахувати потужність що накопичується та розряджається батареєю  $P_b$ :

$$\begin{cases} n_{char} \times P_{b_{char}}, En \ mode \ charge \\ \frac{P_{b_{disch}}}{\eta_{disch}}, En \ mode \ discharge \end{cases} \quad (4.4)$$

Для нашого дослідження ми припускаємо, що  $n_{char} = \eta_{disch} = 0,9$ .

Під час заряджання батареї допустима потужність повинна бути меншою або рівною максимально допустимій потужності, яку може поглинути накопичувач, і відповідати мінімальному рівню SOC. Ці умови також мають дотримуватися для допустимої потужності розряду батареї.

2. Фотоелектричне поле: у нашому дослідженні ми не враховуємо ККД інвертора. Вироблена генератором PV потужність обмежується максимальною потужністю інвертора PV:

$$0 \leq Pp(t) \leq P_{ond}^{max}() \quad (4.5)$$

3. Мережа: потужність, яку можна передавати або споживати з основної мережі, залежить від контракту з EDF. Наведене рівняння додає обмеження на рівні меж потужності, яку можна обмінювати в мережі:

$$0 \leq Pp(t) \leq P_{ond}^{max} \quad (4.6)$$

4. Обмеження оптимізації – це умови, які повинні виконуватися для вирішення задачі оптимізації. Обмеження цієї оптимізації є такими:
- а. У будь-який момент рівень заряду батареї (SOC) має знаходитися між  $SOC_{min}$  та  $SOC_{max}$ .

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (4.7)$$

- б. Сума потужностей, що подаються на навантаження з боку генератора PV, накопичувача енергії та мережі, повинна відповідати споживанню. Якщо поданої потужності недостатньо, додається відсутня потужність ( $Pm$ ), що відповідає відмові системи:

$$Pp_c(t) + Pb_c(t) + Pr_c(t) + Pm(t) = Pc(t). \quad (4.8)$$

- в. Потужність генератора PV може бути розподілена між навантаженням ( $Pp_c$ ), акумулятором ( $Pb_b$ ) або мережею ( $Pp_r$ ). Вона також може бути втрачена ( $Pd$ ).

$$Pp_c(t) + Pb_b(t) + Pr_r(t) + Pm(t) = Pp(t). \quad (4.9)$$

г. Відсутня потужність ( $P_m$ ) і втрачена потужність ( $P_d$ ) повинні бути більшими або рівними нулю.

$$0 \leq P_d(t) \quad (4.10)$$

$$0 \leq P_m(t) \quad (4.11)$$

Усі ці обмеження й ліміти враховуються у стратегіях оптимізації для забезпечення належного функціонування системи.

Основні значення параметрів, використані при дослідженні, наведені у таблиці:

Таблиця 4.1 – Значення параметрів

Параметри	Значення	Опис
$P_{ond}^{max}$ [kW]	50	Максимальна потужність інвертора PV-мережі (AC)
$P_{r_s}^{max}$ [kW]	20	Максимальна потужність, що може бути взята з мережі (AC)
$P_{r_e}^{max}$ [kW]	20	Максимальна потужність, що може бути подана в мережу (AC)
$Q_U$ [kWh]	20	Корисна ємність батареї B1(DC)
$Q_U$ [kWh]	50	Корисна ємність батареї B2(DC)
$\eta_{char}$ [–]	0,9	ККД заряду батареї
$\eta_{disch}$ [–]	0,9	ККД розряду батареї

Була розроблена програма, яка реалізує розроблений алгоритм.

Проведено згідно розробленого алгоритму розподіл потужностей по генераторах (рис. 4.1 - 4.4). Для графіка потужності та трьох варіантів генерації джерелом сонячної енергії, що впливає на режими роботи локальної системи.

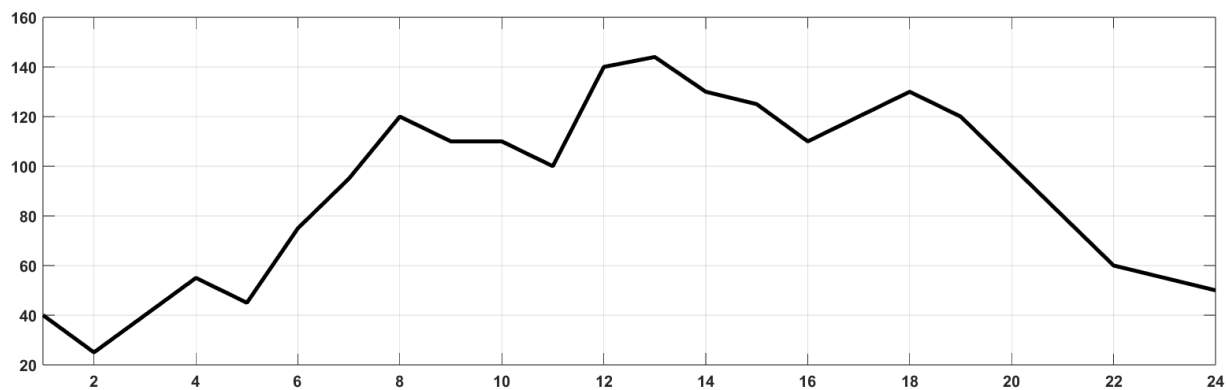


Рисунок 4.1 - Графік потужності навантаження

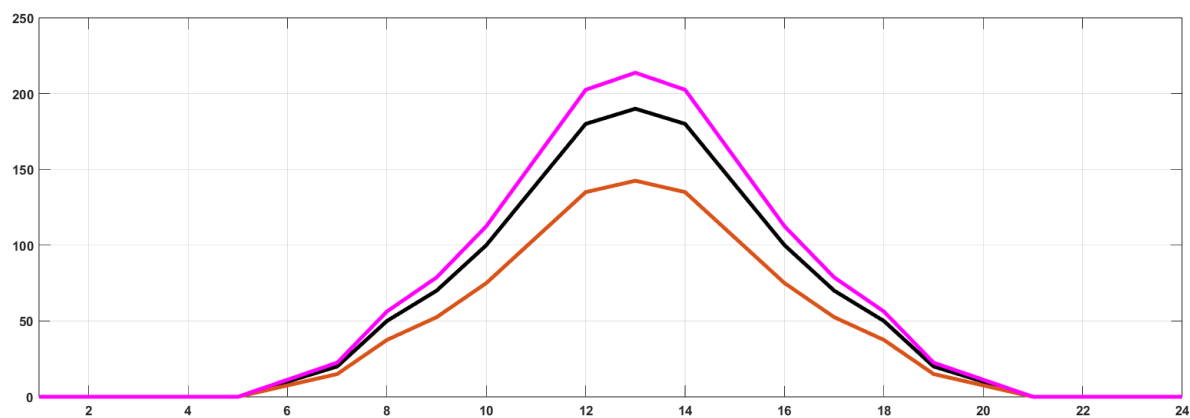


Рисунок 4.2 - Графіки потужностей сонячного генератора

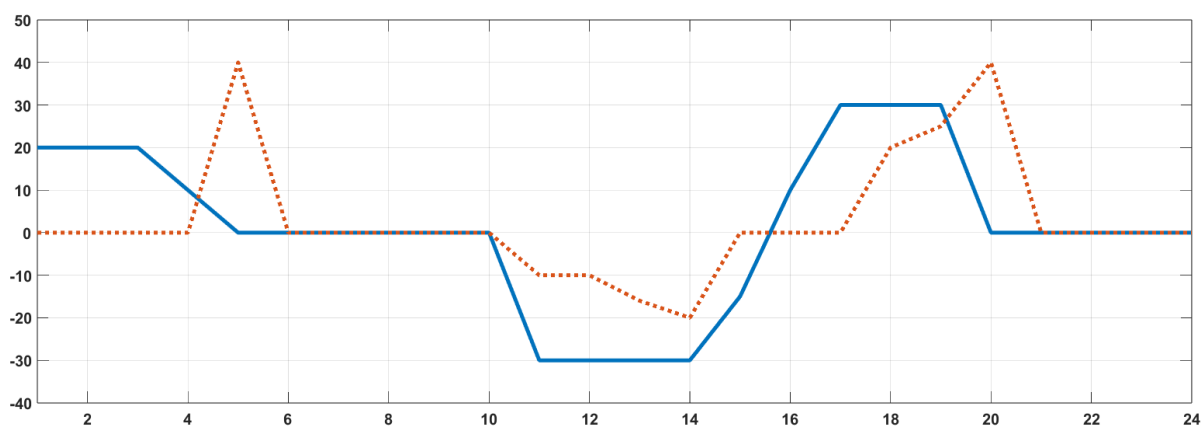


Рисунок 4.3 - Графік потужностей акумуляторних батарей ( червона лінія – В2, синя лінія – В1)

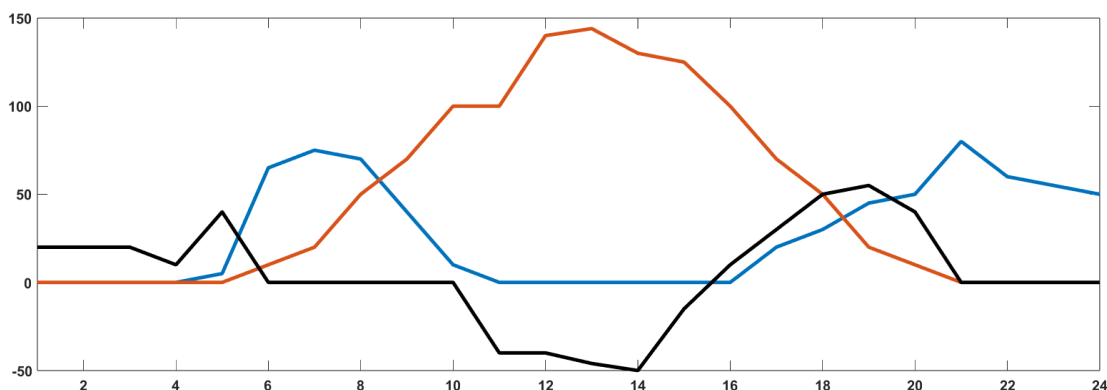


Рисунок 4.4 - Графік розподілу потужностей (чорна лінія – система зберігання B1+B2, червона лінія – потужність від сонячного генератора, синя лінія – мережа)

Аналогічні дослідження при такому ж графіку навантажень були проведені при зниженні на 25% сонячної генерації (рис. 4.5 – рис. 4.6). Акумуляторна батарея не задіяна на заряд.

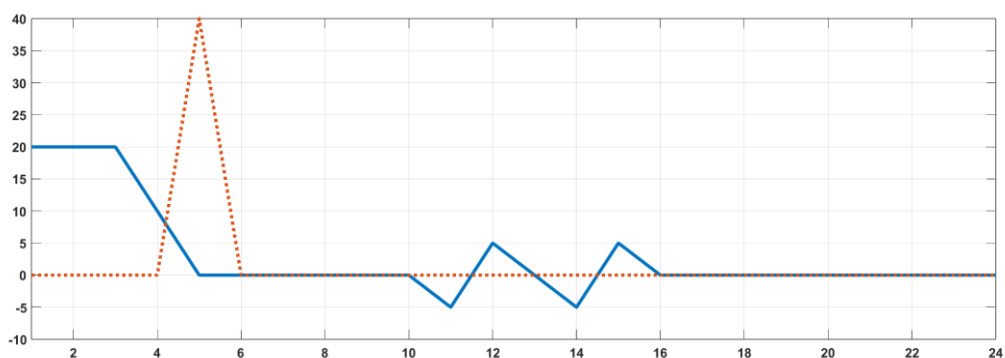


Рисунок 4.5 - Графік потужностей акумуляторних батарей (червона лінія – B2, синя лінія – B1)

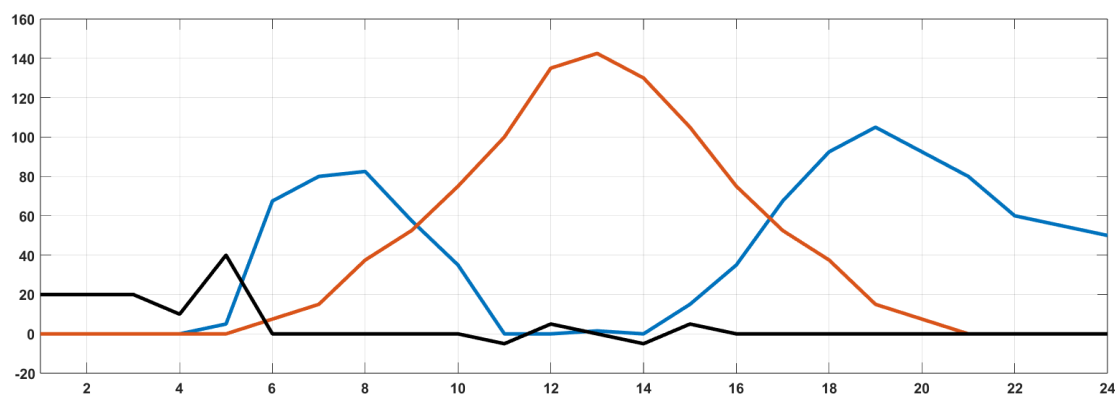


Рисунок 4.6 - Графік розподілу потужностей (чорна лінія – система зберігання B1+B2, червона лінія – потужність від сонячного генератора, синя лінія – мережа)

Аналогічні дослідження при такому ж графіку навантажень були проведені при збільшенні на 15% сонячної генерації. При цьому на 14 інтервалі відбувається продаж залишку енергії в мережу.

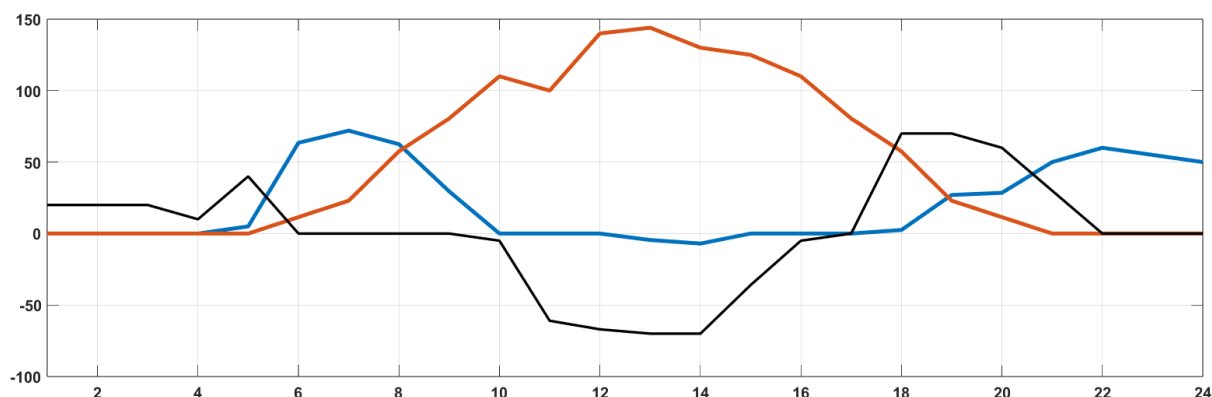


Рисунок 4.7 - Графік розподілу потужностей (чорна лінія – система зберігання В1+В2, червона лінія – потужність від сонячного генератора, синя лінія – мережа)

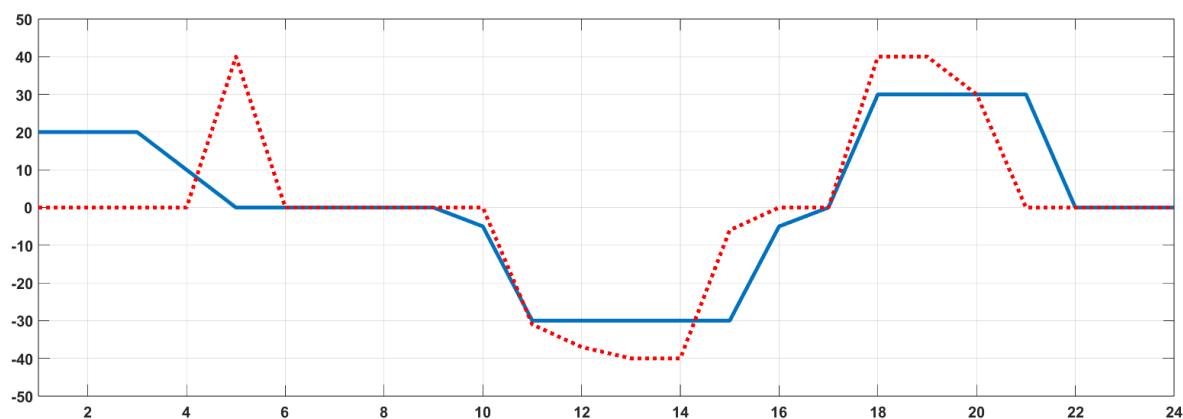


Рисунок 4.8 - Графік потужностей акумуляторних батарей (червона лінія – В2, синя лінія – В1)

Дослідження підтверджують працездатність запропонованої стратегії керування в локальній системі

#### **4.4 Математичне моделювання та розробка алгоритму керування двонаправленим потоком потужності**

Оскільки попит на ефективні та гнучкі системи розподілу електроенергії зростає, особливо зокрема в сільській місцевості, потреба в передових рішеннях,

таких як конденсаторний зв'язок. Традиційним мережам розподілу електроенергії часто важко відповідати складні вимоги сучасних енергетичних систем, особливо з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та потреба в надійній електрифікації недостатньо забезпечені регіони. У цьому контексті підстанція з конденсаторним зв'язком із керуючим. Мережевий трансформатор (CCS-CNT) є багатообіцяючим рішенням. Це інноваційна система використовує двонаправлені можливості контрольованої мережі робочий трансформатор (CNT) для регулювання та оптимізації потоку електроенергії між високовольтними вік (ВЛ) ЛЕП і локальних розподільних мереж. CCS-CNT система розроблена для вирішення завдань традиційних розподільних трансформувачі, які зазвичай є односпрямованими та не мають гнучкості для ефективною роботи керувати потоком енергії в обох напрямках. Ця здатність особливо важлива в сучасні мережі, де електроенергія може надходити від розподілених джерел генерації, таких як мікромережі та установки відновлюваної енергії, назад до основної мережі. Система CCS-CNT інтегрує підстанцію з конденсаторним зв'язком (CCS), яка забезпечує додаткові переваги, такі як регулювання напруги, компенсація реактивної потужності.

У цьому дослідженні розглядається математичне представлення потоку електроенергії в системі CCS-CNT, надаючи детальний аналіз взаємодії між CCS, CNT і підключеною електромережею. Математична модель має важливе значення для розуміння поведінки системи в різних робочих умовах і для розробки стратегій керування, які забезпечують оптимальну продуктивність. Крім того, пропонується алгоритм керування, спрямований на динамічне керування потоком електроенергії для балансування попиту на навантаження, мінімізації втрат і підтримки стабільності напруги в мережі. Алгоритм розроблений, щоб реагувати на зміни в умовах мережі в режимі реального часу, використовуючи контрольовані аспекти CNT для досягнення більш стійкої та адаптивної системи розподілу електроенергії.

Це математичне представлення можна спростити на наступній блок-схемі:

- параметри початкової системи введення (VHV, кран, X8);
- розрахувати силу дії (P);

- розрахувати реактивну потужність (Q);
- оцінити напрямок потоку енергії:
  1. Якщо  $P > 0$ , потік йде від системи HV до CCS,
  2. Якщо  $P < 0$ , потік йде від CCS до системи HV,
- Контроль потоку живлення (регулювання VHV, V кран, 8);
- Повторити або завершити.

У цій системі на активну потужність  $P$ , що передається через конденсатор зв'язку, впливають величини напруги на первинній стороні HV і вторинній стороні  $V_{tap}$ , а також різниця фазових кутів між цими напругами визначається як:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_c} \sin(\delta), \quad (4.12)$$

Де  $V_1, V_2$  – напруги на первинній і вторинній сторонах конденсатора зв'язку відповідно,

$X_c$  – реактивний опір конденсатора зв'язку,

$\delta$  – різниця фазових кутів між  $V_1, V_2$ .

Реактивна потужність  $Q$  пов'язана з підтримкою рівнів напруги в системі та на неї впливає різниця величин напруги між двома сторонами конденсатора зв'язку та описується:

$$Q = \frac{V_1^2 - V_1 V_2}{X_c} \cos(\delta) \quad (4.13)$$

Це рівняння показує, що реактивна потужність управляється шляхом регулювання різниці напруг і фазового кута  $\delta$ . Ці рівняння демонструють, що шляхом керування  $V_1, V_2$  і  $\delta$  система CCS-CNT може забезпечувати або поглинати реактивну потужність, тим самим стабілізуючи рівні напруги в мережі та підвищуючи загальну якість електроенергії.

Ефективність електроенергії та можливості системи передачі електроенергії залежать від конфігурації перетворювача. Інтеграція передової технології силової електроніки в системи підстанції з конденсаторним зв'язком (CCS) і керованого мережевого трансформатора (CNT) значно підвищує ефективність виробництва електроенергії та можливості передачі електроенергії. Керування двонаправленим

потокотом потужності в системі CCS-CNT зосереджено на здатності регулювати рівні напруги та фазовий кут ( $\delta$ ) між первинною ( $V_1$ ) і вторинною ( $V_2 \approx V_{ap}$ ) сторонами 2 трансформатора. Стратегія контролю передбачає:

- Регулювання  $\delta$  та керування напрямком потоку активної потужності:
  1. Якщо  $\delta$  не позитивний, активна потужність перетікає від первинної до вторинної сторони під час відведення живлення.
  2. Якщо  $\delta$  від'ємне, активна потужність перетікає від вторинної до первинної сторони під час введення потужності.
- Регулювання  $V_1$  і  $V_2$  для контролю величини як активної, так і реактивної потужності. Шляхом точного налаштування  $V_1$  і  $V_2$  система може регулювати кількість переданої потужності та гарантувати, що вона відповідає бажаним заданим значенням як для активної, так і для реактивної потужності.

Використовуючи рівняння (4.1) і (4.2), повну потужність ( $S = P + jQ$ ), активну потужність і реактивну потужність можна змоделювати та розрахувати за допомогою MATLAB за допомогою коду:

```
% Define the variables
V1 = <value>; % Voltage on the primary side
V2 = <value>; % Voltage on the secondary side=Vtap
Xc = <value>; % Capacitive reactance
delta = <value>; % Phase angle difference in radians

% Calculate Active Power (P)
P = (V1 * V2 / Xc) * sin(delta);

% Calculate Reactive Power (Q)
Q = (V1^2 - V1 * V2 * cos(delta)) / Xc;

% Complex Power (S)
S = P + 1j * Q;

% Display the results
disp('Active Power (P):');
disp(P);
disp('Reactive Power (Q):');
disp(Q);
disp('Complex Power (S):');
disp(S);
```

Рисунок 4.9 – Лістинг програмного коду.

У цьому кодї можна замінити *<value>* фактичними числовими значеннями для  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $X$  і  $\delta$ . Код розраховує активну потужність  $P$ , реактивну потужність  $Q$  і комплексну потужність  $S$  на основі поданої формули. Напрямок потоку потужності буде визначатися значенням різниці кутів фаз.

У системі підстанції з конденсаторним зв'язком, інтегрованої з керованим мережевим трансформатором, досягнення двонаправленого потоку електроенергії має важливе значення для ефективної роботи, особливо в сценаріях, коли електроенергія повинна одночасно відводитися від лінії високої напруги (HV) і повертатися в мережу з нижчого рівня напруги. Математичне представлення двонаправленого керування потоком потужності розроблено на різних етапах. Вибираються параметри системи. Вибрані параметри:

- лінія високої напруги (HV): Працюючи на рівні напруги  $HV = 132$  кВ, ця лінія служить основним джерелом живлення.
- Відведена напруга:  $V_{tap} = 11$  кВ, що представляє рівень напруги в точці, де живлення відводиться або подається.
- Керований мережевий трансформатор: цей трансформатор забезпечує спрямований потік потужності з можливістю перемикання для керування рівнями напруги.
- Конденсаторна батарея: забезпечує компенсацію реактивної потужності та підтримує відведення напруги шляхом надання ємнісного реактивного опору.
- Навантаження:  $P_{load}$  = активна потужність, представляє потребу в активній потужності.
- Мікромережа (MG): з'єднана на рівні напруги відводу, здатна генерувати або поглинати електроенергію, тим самим сприяючи двонаправленому потоку електроенергії.
- Потік активної потужності в системі може відбуватися в двох основних режимах: режим відведення (HV до LV) і режим інжекції (LV до HV).

- Потік активної потужності від ВН до НН визначається як рівняння потоку потужності представлений як:

Потік активної потужності від ВН до НН (режим відведення):

$$P_{loss} = \frac{V_{tap}^2}{Z_{tap}} \cos(\theta_{tap}), \quad (4.14)$$

де  $V_{tap}^2$  – напруга в точці відводу,

$Z_{tap}$  – повний опір відводу трансформатора,

$\theta_{tap}$  – фазовий кут напруги відведення,

$P_{loss}$  – це втрати потужності в трансформаторі та лінії.

Потік активної потужності від НН до ВН (режим інжекції):

$$P_{inj} = P_{MG} - P_{loss}, \quad (4.15)$$

де  $P_{MG}$  – це потужність, яку генерує MG на V-відводі,

$P_{inj}$  – це потужність, що вводиться в лінію ВН.

Потік реактивної потужності в системі також може відбуватися в двох основних режимах: режим відведення (HV до LV) і режим інжекції (LV до HV).

Потік реактивної потужності (режим крана):

$$Q_{tap} = \frac{V_{tap}^2}{Z_{tap}} \sin(\theta_{tap}) + Q_{comp}, \quad (4.16)$$

де  $Q_{comp}$  – це реактивна потужність, яку забезпечує батарея конденсаторів.

Потік реактивної потужності (режим інжекції):

$$Q_{inj} = Q_{MG} + Q_{comp} - Q_{loss}, \quad (4.17)$$

де  $Q_{MG}$  – реактивна потужність, що генерується або споживається мікромережею,

$Q_{loss}$  – це втрати реактивної потужності в системі.

Контроль напруги досягається за допомогою CNT, регулюючого напругу на вузлі відводу на основі напрямку потоку потужності та навантаження або умов MG (незалежно від того, чи це потужність поглинання чи введення). Напруга на вторинній стороні CNT може бути виражена як:

$$V_{tap} = \frac{V_{HV}}{a(t)} \times \frac{1+jX_c}{1+jX_{tap}}, \quad (4.18)$$

де  $a(t)$  – змінний коефіцієнт витків CNT, скоригований з часом для контролю напруги,

$X_c$  – ємнісний реактивний опір батареї конденсаторів,

$X_{tap}$  – реактивний опір відводу.

Щоб контролювати потік потужності в обох напрямках, алгоритм керування CNT регулює коефіцієнт відведення  $a(t)$  і координує його з MG і батареєю конденсаторів. Контролер підтримує рівні напруги в бажаних межах і забезпечує стабільний двонаправлений потік електроенергії.

Алгоритм керування для керування двонаправленим потоком електроенергії в системі конденсаторної підстанції та керованого мережевого трансформатора (CCS-CNT) є критично важливим компонентом для забезпечення стабільної та ефективної роботи. Цей алгоритм спрямований на підтримку бажаних умов потоку потужності шляхом динамічного регулювання параметрів керування. Нижче наведено детальне обговорення алгоритму.

Процес керування починається з фази ініціалізації, де встановлюються ключові параметри:

Бажані задані значення активної ( $P_{set}$ ) і реактивної ( $Q_{set}$ ) потужності встановлюються на основі експлуатаційних вимог і специфікацій системи. Ці задані значення представляють цільові значення активної та реактивної потужності, яких система прагне досягти.

Початкові значення для контрольних змінних ( $V_1$ ), ( $V_2$ ) і ( $d$ ) скидаються з використанням історичних даних або початкових оцінок. Ці початкові значення забезпечують відправну точку для ефективної роботи алгоритму керування.

Використовуючи методи оцінки, можна виміряти фактичну потужність ( $P_{meas}$ ) і реактивну потужність ( $Q_{meas}$ ). Ці вимірювання забезпечують зворотний зв'язок щодо поточного стану системи та необхідні для налаштування параметрів керування.

Щоб виправити будь-які відхилення від бажаних заданих значень:

Обчисліть похибку між заданими значеннями та виміряними значеннями. Ці похибки між бажаним і фактичним потоками потужності розраховуються за допомогою:

$$e_P = P_{set} - P_{meas}, \quad (4.19)$$

$$e_Q = Q_{set} - Q_{meas}, \quad (4.20)$$

де  $e_P$  – похибка активної потужності,

$e_Q$  – похибка реактивної потужності.

Ці похибки представляють величину, на яку фактичний потік потужності відхиляється від заданих значень, і використовуються для визначення необхідних коригувань.

У системі CCS-CNT враховуються наступні параметри:

- $V_{HV}$ : джерело високої напруги (132 кВ).
- $V_{lap}$ : напруга відведення (11 кВ).
- $V_{load}$ : Напруга на навантаженні.
- $I_{HV}$ : Струм на стороні високої напруги.
- $I_{tap}$ : струм на стороні крана.
- $P_{see}$ : бажане задане значення активної потужності.
- $Q_{see}$ : Бажана задана реактивна потужність.
- $\delta$ : різниця фазових кутів.

- $X_C$ : ємнісний реактивний опір конденсатора зв'язку.
- $Z_{load}$ : імпеданс навантаження.

Напрямок потоку потужності в CCS-CNT можна перевірити за допомогою кодового підходу MATLAB (лістинг наведено на рисунку 4.2) , щоб довести життєздатність твердження щодо напрямку потоку потужності.

```

% Initialize system parameters
V_HV = 132e3; % High-voltage supply in volts (132 kV)
V_tap_set = 11e3; % Desired tap voltage (11 kV)
V_tap_meas = 11e3; % Measured tap voltage
I_HV = 0; % Initialize current on the HV side
I_tap = 0; % Initialize current on the tap side
P_set = 0; % Desired active power setpoint
Q_set = 0; % Desired reactive power setpoint
delta = 0; % Phase angle difference (in radians)
X_c = 0; % Capacitive reactance of the coupling capacitor
Z_load = 0; % Load impedance

% Control gains for proportional control
Kp1 = 0.1; % Proportional gain for tap voltage control
Kp2 = 0.05; % Gain for active power control
Kp3 = 0.05; % Gain for reactive power control
Kp4 = 0.01; % Gain for phase angle control

% Step through the control loop (assuming discrete time steps for control)
for t = 1:100 % Run for 100 time steps
    % Compute the error between the desired and measured tap voltage
    e_Vtap = V_tap_set - V_tap_meas;

    % Adjust the tap voltage
    delta_Vtap = Kp1 * e_Vtap;
    V_tap_meas = V_tap_meas + delta_Vtap; % Update tap voltage

    % Compute power flow errors (P_set - actual power)
    % Assuming basic power flow equations for this calculation
    e_P = P_set - (V_HV * I_HV * cos(delta)); % Active power error
    e_Q = Q_set - (V_HV * I_HV * sin(delta)); % Reactive power error

    % Adjust control variables for power flow control
    delta_V1 = Kp2 * e_P;
    delta_V2 = Kp3 * e_Q;
    delta_delta = Kp4 * e_P;

    % Update system voltages and phase angle
    V_1_new = V_HV * (1 + delta_V1);
    V_2_new = V_tap_meas * (1 + delta_V2);
    delta_new = delta * (1 + delta_delta);

    % Calculate power flow on HV and tap sides
    P_flow_HV = V_HV * I_HV * cos(delta_new);
    P_flow_tap = V_tap_meas * I_tap * cos(delta_new);

    % Determine power flow direction
    if P_flow_HV > 0 && P_flow_tap < 0
        disp('Power is flowing from HV side to CCS');
    elseif P_flow_HV < 0 && P_flow_tap > 0
        disp('Power is flowing from CCS to HV side');
    end
end

```

Рисунок 4.10 – Лістинг програми в MATLAB

## Висновки до розділу 4

Розроблено алгоритм керування мікромежею на основі економічної оптимізації, який дозволяє максимальне використання відновлюваних джерел енергії для потреб навантаження. Наявність декількох елементів системи зберігання в мікромережі на різну ємність, з різною вартістю продажу енергії за 1кВ, дозволяє ефективніше використовувати акумуляторні батареї, зменшуючи цикли розряду-заряду. Мікромережа оптимізує свою роботу, враховуючи коливання цін електроенергії мережі.

Математичне представлення та стратегія керування двонаправленим потоком електроенергії в системі підстанції з конденсаторним зв'язком із керованим мережевим трансформатором (CCS-CNT) ефективно ілюструють здатність системи керувати як активною, так і реактивною потужністю. Шляхом точного налаштування ключових параметрів, таких як рівні напруги та різниці фазових кутів, система CCS-CNT може динамічно адаптуватися до змінних вимог до потужності, забезпечуючи стабільність і ефективність мереж розподілу електроенергії. Запропонований алгоритм керування, який систематично вирішує проблеми керування потоком електроенергії, забезпечує надійну структуру для оптимізації розподілу електроенергії, особливо в сценаріях, що включають інтеграцію відновлюваної енергії та електрифікацію сільської місцевості. Результати підкреслюють потенціал систем CCS-CNT як трансформаційного рішення для сучасних мереж розподілу електроенергії, пропонуючи покращену гнучкість і надійність у порівнянні зі звичайними методами.

## ВИСНОВКИ

Оптимізація електроенергетичних систем є багатокритеріальною задачею, що включає технічні, економічні та екологічні аспекти. Наведено класифікацію показників за якими виконується оптимізація та технології розподіленої генерації.

Аналіз досліджень свідчить про значний потенціал застосування методів оптимізації для покращення роботи мікромереж, розподільних мереж з ВДЕ, транзактивного керування та формування енергонезалежних громад. Подальші дослідження у цій сфері можуть бути спрямовані на розробку інтегрованих рішень, що поєднують математичне моделювання, алгоритми машинного навчання та реальні дані для підвищення ефективності енергетичних систем. Розширення використання оптимізаційних моделей сприятиме розвитку ЛЕС, інтеграції новітніх технологій прогнозування попиту та автоматизації процесів балансування енергосистем.

Оскільки потреба в більш ефективних і адаптованих системах розподілу електроенергії зростає, особливо в сільській місцевості, інноваційні рішення, такі як конденсаторна підстанція з керованим мережевим трансформатором (CCS-CNT), стають все більш критичними. Традиційні мережі розподілу електроенергії, часто обмежені можливостями односпрямованого потоку та негнучкістю, важко відповідають складним вимогам сучасних енергетичних систем. Система CCS-CNT пропонує трансформаційний підхід, забезпечуючи двонаправлений потік електроенергії між високовольтними лініями електропередачі та локальними розподільними мережами, особливість, яка має важливе значення для інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпечення надійної електрифікації в недостатньо забезпечених регіонах. У цьому дослідженні представлено детальне математичне представлення потоку потужності в системі CCS-CNT, наголошуючи на контролі як активної, так і реактивної потужності шляхом регулювання рівнів напруги та фазових кутів. Алгоритм керування розроблено для динамічного керування потоком електроенергії, забезпечуючи оптимальну продуктивність шляхом мінімізації втрат і підтримки стабільності напруги в мережі.

Запропонована система CCS-CNT демонструє значний потенціал у підвищенні ефективності та надійності розподілу електроенергії, що робить її особливо придатною для електрифікації сільської місцевості та інших застосувань, де традиційні методи недостатні. Результати підкреслюють здатність системи адаптуватися до різноманітних умов експлуатації, пропонуючи надійне рішення для сучасних завдань розподілу електроенергії.

Розроблено алгоритм керування мікромережею на основі економічної оптимізації, який дозволяє максимальне використання відновлюваних джерел енергії для потреб навантаження. Наявність декількох елементів системи зберігання в мікромережі на різну ємність, з різною вартістю продажу енергії за 1кВ, дозволяє ефективніше використовувати акумуляторні батареї, зменшуючи цикли розряду-заряду. Мікромережа оптимізує свою роботу, враховуючи коливання цін електроенергії мережі.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmed Elkhatat and Shaheen A. Al-Muhtaseb. Combined “Renewable Energy–Thermal Energy Storage (RE–TES)” Systems: A Review. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4471>
2. Arman Aghahosseini ID , Dmitrii Bogdanov and Christian Breyer. A Techno-Economic Study of an Entirely Renewable Energy-Based Power Supply for North America for 2030 Conditions. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1171>
3. Benghanem, M.; Mellit, A.; Almohamadi, H.; Haddad, S.; Chettibi, N.; Alanazi, A.M.; Dasalla, D.; Alzahrani, A. Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: A Review. *Energies* **2023**, *16*, 757. <https://doi.org/10.3390/en16020757>. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/757>
4. Somtochukwu Godfrey Nnabuife, Abdulhammed K. Hamzat, James Whidborne, Boyu Kuang, Karl W. Jenkins. Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924025825>
5. Faran Razi, Ibrahim Dincer. A critical evaluation of potential routes of solar hydrogen production for sustainable development. [https://www.researchgate.net/profile/Faran-Razi-2/publication/340612944\\_A\\_critical\\_evaluation\\_of\\_potential\\_routes\\_of\\_solar\\_hydrogen\\_production\\_for\\_sustainable\\_development/links/5ec4555ba6fdcc90d685d3fd/A-critical-evaluation-of-potential-routes-of-solar-hydrogen-production-for-sustainable-development.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Faran-Razi-2/publication/340612944_A_critical_evaluation_of_potential_routes_of_solar_hydrogen_production_for_sustainable_development/links/5ec4555ba6fdcc90d685d3fd/A-critical-evaluation-of-potential-routes-of-solar-hydrogen-production-for-sustainable-development.pdf)
6. Marcel Stolte, Francesco Demetrio Minuto, Andrea Lanzini. Optimizing green hydrogen production from wind and solar for hard-to-abate industrial sectors across multiple sites in Europe. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924027770>
7. Mohammad Zoghi, Nasser Hosseinzadeh, Saleh Gharaie, Ali Zare. Energy and exergy-economic performance comparison of wind, solar pond, and ocean thermal

energy conversion systems for green hydrogen production.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924023875>

8. Shibna Hussain, Santosh Kumar Sharma, Shiv Lal. Feasible synergy between hybrid solar PV and wind system for energy supply of a green building in Kota (India): A case study using iHOGA.

9. Jabraeil Ahbabi Saray, Ayat Gharehghani, Danial Hosseinzadeh. Towards sustainable energy Carriers: A solar and Wind-Based systems for green liquid hydrogen and ammonia production.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890424001560>

10. D. Pimentel. Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems.

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8654-0\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8654-0_1)

11. Bernard Chukwudi Tashie-Lewis, Somtochukwu Godfrey Nnabuife. Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821121000880>

12. Derek Vikara, Chung Yan Shih, ShangMin Lin, Allison Guinan, Timothy Grant, David Morgan and Donald Remson. U.S. DOE's Economic Approaches and Resources for Evaluating the Cost of Implementing Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS).

<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.7569/jsee.2017.629523/html>

13. Wytze van der Gaast, Katherine Begg, Alexandros Flamos. Promoting sustainable energy technology transfers to developing countries through the CDM.

14. Gauresh Batra. Renewable Energy Economics: Achieving Harmony between Environmental Protection and Economic Goals.

<https://socialsciencechronicle.com/wp-content/uploads/2023-009.pdf>

15. Nnabuife, S.G.; Darko, C.K.; Obiako, P.C.; Kuang, B.; Sun, X.; Jenkins, K. A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. Clean Technol. 2023. <https://www.mdpi.com/2571-8797/5/4/67>

16. Omar Ahmed Mohamed and Syed Hasan Masood. A brief overview of solar and wind energy in Libya: Current trends and the future development. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/377/1/012136/meta>
17. Pragya Nema, R.K. Nema, Saroj Rangnekar. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. [https://www.researchgate.net/publication/227421197\\_A\\_current\\_and\\_future\\_state\\_of\\_art\\_development\\_of\\_hybrid\\_energy\\_system\\_using\\_wind\\_and\\_PV-solar\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/227421197_A_current_and_future_state_of_art_development_of_hybrid_energy_system_using_wind_and_PV-solar_A_review)
18. Qusay Hassan, Sameer Algburi, Aws Zuhair Sameen, Hayder M. Salman, Marek Jaszczur. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300748X>
19. Gungor A. Akyuz A.O. Tuncer A.D. Şirin C. Zaman M. Gungor C. Modeling and simulation of circulating fluidized bed biomass gasifiers in view of Industry 4.0. <https://stumejournals.com/journals/i4/2019/4/150>
20. Louisa Tomas, Neus (Snowy) Evans, Tanya Doyle and Keith Skamp. Are first year students ready for a flipped classroom? A case for a flipped learning continuum. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s41239-019-0135-4.pdf>
21. Hans Böhm, Simon Moser, Stefan Puschnigg, Andreas Zauner. Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz. Power-to-hydrogen & district heating: technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials. [https://www.researchgate.net/profile/Hans-Boehm/publication/353308407\\_Power-to-hydrogen\\_district\\_heating\\_Technology-based\\_and\\_infrastructure-oriented\\_analysis\\_of\\_future\\_sector\\_coupling\\_potentials/links/61e53e8c70db8b034c9f1d20/Power-to-hydrogen-district-heating-Technology-based-and-infrastructure-oriented-analysis-of-future-sector-coupling-potentials.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hans-Boehm/publication/353308407_Power-to-hydrogen_district_heating_Technology-based_and_infrastructure-oriented_analysis_of_future_sector_coupling_potentials/links/61e53e8c70db8b034c9f1d20/Power-to-hydrogen-district-heating-Technology-based-and-infrastructure-oriented-analysis-of-future-sector-coupling-potentials.pdf)
22. United Nations. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. In Outcome Document for the United Nations Summit to Adopt the Post 2015 Development Agenda; United Nations: New York, NY, USA, 2015.

<https://www.undp.org/ukraine/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development>

23. Shaaban, M.; Scheffran, J.; Böhner, J.; Elsobki, M.S. Sustainability Assessment of Electricity Generation Technologies in Egypt Using Multi-Criteria Decision Analysis. *Energies* 2018. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1117>
24. Cîrstea, SD; Молдован-Теселиос, К.; Кірстеа, А.; Турку, АС; Darab, СР Оцінка стійкості відновлюваної енергії за композитним індексом. *Сталий розвиток* 2018. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/811>
25. Fuentes, S.; Villafafila-Robles, R.; Rull-Duran, J.; Galceran-Arellano, S. Composed Index for the Evaluation of Energy Security in Power Systems within the Frame of Energy Transitions—The Case of Latin America and the Caribbean. *Energies* 2021. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2467>
26. Ma, L.; Chong, C.; Zhang, X.; Liu, P.; Li, W.; Li, Z.; Ni, W. LMDI Decomposition of Energy-Related CO<sub>2</sub> Emissions Based on Energy and CO<sub>2</sub> Allocation Sankey Diagrams: The Method and an Application to China. *Sustainability* 2018. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/344>
27. Gómez-Camacho, C.E.; Ruggeri, B. Energy Sustainability Analysis (ESA) of Energy-Producing Processes: A Case Study on Distributed H<sub>2</sub> Production. *Sustainability* 2019. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/18/4911>
28. Roldán-Blay, C.; Miranda, V.; Carvalho, L.; Roldán-Porta, C. Optimal Generation Scheduling with Dynamic Profiles for the Sustainable Development of Electricity Grids. *Sustainability* 2019. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/24/7111>
29. Wu, D.; Yang, Z.; Wang, N.; Li, C.; Yang, Y. An Integrated Multi-Criteria Decision Making Model and AHP Weighting Uncertainty Analysis for Sustainability Assessment of Coal-Fired Power Units. *Sustainability* 2018. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/6/1700>
30. Chen, C.; Yu, L.; Zeng, X.; Huang, G.; Li, Y. Planning an Energy–Water–Environment Nexus System in Coal-Dependent Regions under Uncertainties. *Energies* 2020. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/208>

31. Al Shidhani, T.; Ioannou, A.; Falcone, G. Multi-Objective Optimisation for Power System Planning Integrating Sustainability Indicators. *Energies* 2020. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2199>
32. Junne, T.; Cao, K.-K.; Miskiw, K.K.; Hottenroth, H.; Naegler, T. Considering Life Cycle Greenhouse Gas Emissions in Power System Expansion Planning for Europe and North Africa Using Multi-Objective Optimization. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1301>
33. Wang, G.; Tan, Z.; Tan, Q.; Yang, S.; Lin, H.; Ji, X.; Gejirifu, D.; Song, X. Multi-Objective Robust Scheduling Optimization Model of Wind, Photovoltaic Power, and BESS Based on the Pareto Principle. *Sustainability* 2019. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/2/305>
34. Michael Sterner, Ingo Stadler. Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration. [https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=ApGyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&ots=XHTIvD4Nd3&sig=Xbysxhs6nTE9RAN6elrOx3\\_bPtE&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=ApGyDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&ots=XHTIvD4Nd3&sig=Xbysxhs6nTE9RAN6elrOx3_bPtE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
35. May, Geoffrey & Davidson, Alistair & Monahov, Boris. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*. 15. 145-157. 10.1016/j.est.2017.11.008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17304437>
36. T Hino, A Lejeune. Pumped Storage Hydropower Developments. <https://ru.scribd.com/document/530010382/2012-Pumped-Storage-Hydropower-Developments>
37. Muhammad Shahzad Javed, Tao Ma, Jakub Juras, Muhammad Yasir Amin. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119318592>
38. Kanzumba Kusakana. Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage.

<http://ir.cut.ac.za/bitstream/handle/11462/1259/Dr.%20Kanzumba%20Kusakana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

39. Hoppmann, Joern & Volland, Jonas & Schmidt, Tobias & Hoffmann, Volker. (2014). The Economic Viability of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems - A Review and a Simulation Model. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 39. 1101-1118. 10.1016/j.rser.2014.07.068. <https://www.researchgate.net/publication/264239770> The Economic Viability of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems - A Review and a Simulation Model

40. T TOOLKIT. The User Guide. <https://d7.westerncape.gov.za/text/2012/10/transparent-tariffs-the-user-guide.pdf>

41. Rachna Verma, Mohammad Ayaan Siddiqui. Awareness On Microgrids And Various Protection Issues To Overcome In It. <https://www.ijstr.org/final-print/may2015/Awareness-On-Microgrids-And-Various-Protection-Issues-To-Overcome-In-It.pdf>

42. Sortomme, Eric & Venkata, S.s & Mitra, Joydeep. (2010). Microgrid Protection Using Communication-Assisted Digital Relays. Power Delivery, IEEE Transactions on. 25. 2789 - 2796. 10.1109/TPWRD.2009.2035810. [https://www.egr.msu.edu/~mitraj/research/pubs/jour/sortomme-venkata-mitra\\_mg\\_prot.pdf](https://www.egr.msu.edu/~mitraj/research/pubs/jour/sortomme-venkata-mitra_mg_prot.pdf)

43. Manjula Dewadasa, Ritwik Majumder, Arindam Ghosh and Gerard Ledwich. Control and Protection of a Microgrid with Converter Interfaced Micro Sources. [https://www.matlabi.ir/wp-content/uploads/bank\\_papers/g\\_paper/g227\\_Matlabi.ir\\_Control%20and%20Protection%20of%20a%20Microgrid%20with%20Converter%20Interfaced%20Micro%20Sources%202009.pdf](https://www.matlabi.ir/wp-content/uploads/bank_papers/g_paper/g227_Matlabi.ir_Control%20and%20Protection%20of%20a%20Microgrid%20with%20Converter%20Interfaced%20Micro%20Sources%202009.pdf)

44. Pepermans, Guido & Driesen, J. & Haeseldonckx, Dries & Belmans, Ronnie & D'haeseleer, William. (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy. 787-798.

[https://www.researchgate.net/publication/222561651\\_Distributed\\_generation\\_definition\\_benefits\\_and\\_issues](https://www.researchgate.net/publication/222561651_Distributed_generation_definition_benefits_and_issues)