

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами
Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: «Розробка принципів оптимізації мікромережі»

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на
транспорті

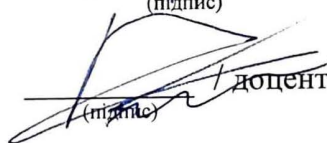
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи ЕЕ2226:


(підпис)

/Артем ГАЙДУК/

Керівник:


(підпис)

/доцент Андрій АНТОНОВ/

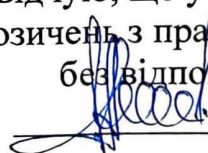
Нормоконтролер:


(підпис)

/ доцент Ірина ПОТАПЧУК/

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

Студент



Дніпро – 2024 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Energy and economic process management
Intellectual power supply systems

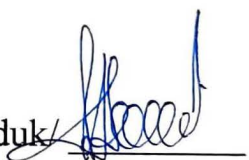
Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: «Development of microgrid optimization principles»

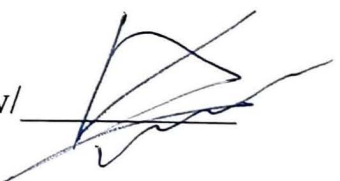
according to educational curriculum **Energy and electromechanical systems in transport**

in the Speciality: **141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics**

Done by the student of the group EE2226:

/Artem Haiduk/ 

Scientific Supervisor:

/ Ass. Prof. Andriy Antonov/ 

Normative controller:

/ Ass. Prof. Iryna Potapchuk / 

(посада) (підпис)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами

Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ICE

Дмитро БОСІЙ

Дата 18.01.23

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики,

електротехніки та електромеханіки

студенту Гайдуку Артему Сергійовичу

1. Тема роботи: Розробка принципів оптимізації мікромережі

Керівник роботи: Антонов Андрій Владиславович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

«18» 01 2023 р.

№ 55ст

2. Строк подання студентом 14.01.2024 р.

роботи:

3. Вихідні дані до роботи:

Параметри розглядуваного об'єкту

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Розглянути поняття «мікромережа» та її принцип роботи

4.2 Визначити напрямки оптимізації мікромереж та розробка принципів оптимізації їх роботи

4.3 Апробація розроблених принципів оптимізації мікромереж

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Графік споживання електричної енергії об'єктом. 2. Схемні рішення електричних мереж. 3. Аналіз отриманих результатів

6. Консультанти розділів роботи:

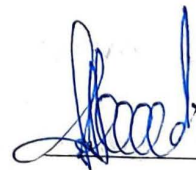
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд шляхів оптимізації роботи мікромереж	20.09.2023	
2	Напрямки оптимізації мікромереж та розробка принципів оптимізації їх роботи	10.10.2023	
3	Апробація отриманих результатів	07.11.2023	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	14.01.2024	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	17.01.2024	

Студент

Артем ГАЙДУК



Керівник роботи

Андрій АНТОНОВ



РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 50 сторінок, 16 рисунків, 3 таблиці, 39 джерел.

Об'єкт дослідження. Мікромережа - система, що складається з великої кількості вузлів, які можуть взаємодіяти між собою.

Предмет дослідження. Принципи оптимізації мікромережі.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в роботі мети і сформованих відповідно до неї завдань були використані такі методи та підходи: розрахунково – аналітичний та статистико – економічний методи, системний та комплексний підходи.

Метою дипломної роботи є дослідження методів та принципів оптимізації мікромережі.

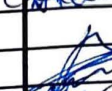
Пояснювальна записка складається зі вступу, 3 розділів, висновків та бібліографічного списку:

- у вступі описується актуальність дослідження та сучасний стан мікромережі. Складається із 2 сторінок;
- у першому розділі висвітлено поняття мікромережі, їх класифікацію та приклади впровадження. Складається із 16 сторінок;
- у другому розділі описано методи та принципи оптимізації мікромережі, досліджено алгоритм оптимізації, за допомогою динамічного програмування. Складається із 5 сторінок;
- у третьому розділі представлено впровадження описаного алгоритму для власної мікромережі СЕС. Складається із 9 сторінок.

Ключові слова: МІКРОМЕРЕЖА, ОПТИМІЗАЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ШЛЯХІВ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ МІКРОМЕРЕЖ	10
1.1 Поняття мікромережі та її складові	10
1.2 Сутність роботи мікромережі	17
1.3 Світовий досвід впровадження мікромереж	21
2 НАПРЯМКИ ОПТИМІЗАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖ ТА РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ РОБОТИ	26
2.1 Опис принципів оптимізації мікромереж	26
2.2 Методи оптимізації мікромереж	27
2.3 Вибір методів та підходів до розв'язання проблеми	30
3 АПРОБАЦІЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	36
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	46

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка принципів оптимізації мікромережі	Літ.		Арк.	Аркуші
Розроб.		Гайдук		16.01.24				6	50
Консульт.				16.01.24					
Керівник		Антонов		16.01.24		МОНУ, УДУНТ, ІСЕ група EE2226.			
Н. Контр.		Потапчук		16.01.24					
Зав.каф.		Босий		16.01.24					

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра 49 с., 16 рис., 3 табл., 39 джерел.

Об'єкт дослідження. Мікромережа - система, що складається з великої кількості вузлів, які можуть взаємодіяти між собою.

Предмет дослідження. Принципи оптимізації мікромережі.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в роботі мети і сформованих відповідно до неї завдань були використані такі методи та підходи: розрахунково – аналітичний та статистико – економічний методи, системний та комплексний підходи.

Метою дипломної роботи є дослідження методів та принципів оптимізації мікромережі.

Пояснювальна записка складається зі вступу, 3 розділів, висновків та бібліографічного списку:

- у вступі описується актуальність дослідження та сучасний стан мікромережі. Складається із 2 сторінок;
- у першому розділі висвітлено поняття мікромережі, їх класифікацію та приклади впровадження. Складається із 16 сторінок;
- у другому розділі описано методи та принципи оптимізації мікромережі, досліджено алгоритм оптимізації, за допомогою динамічного програмування. Складається із 5 сторінок;
- у третьому розділі представлено впровадження описаного алгоритму для власної мікромережі СЕС. Складається із 9 сторінок.

Ключові слова: МІКРОМЕРЕЖА, ОПТИМІЗАЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
ТА ТЕРМІНІВ

АС – Змінний струм

В – Енергія вітру

ДС – Постійний струм

PV – Сонячна енергія

ВДЕ – Відновлювані джерела енергії

ЄС – Європейський Союз

ККД – Коефіцієнт корисної дії

СНЕ – Система накопичення енергії

США – Сполучені Штати Америки

СЕС – Сонячна електростанція

ТЕЦ – Теплоелектроцентраль

ШІ – Штучний інтелект

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Як новий спосіб передачі енергії та полегшення доступу до енергетичної системи було запропоновано концепцію мікромережі [1]. Вона є актуальним напрямком у сфері енергетичних систем і відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного та стійкого енергопостачання для різноманітних об'єктів. Адже зі старінням традиційної структури енергосистеми та зростаючим попитом користувачів на якість електроенергії, розвиток і використання відновлюваної енергії (включаючи енергію вітру, сонячну енергію, енергію води, енергію біомаси, геотермальну енергію та іншу) поступово може стати єдиним способом забезпечення соціального сталого розвитку з точки зору енергетичних проблем.

Мікромережі мають величезний потенціал для задоволення вимог споживачів щодо якості та надійності електроенергії. Адже, вони можуть працювати як в мережевому, так і в острівному режимі, тобто незалежно від головної енергосистеми [2]. При цьому через періодичність і випадковість відновлюваної енергії та безперервну зміну навантаження робота мікромереж потребує певної оптимізації

Через це оптимізація роботи мікромереж стала важливою галуззю досліджень. З безперервним розвитком технологій мікромереж і підтримкою урядів країн, у майбутньому буде ширший спектр їх застосувань, тому дослідження з оптимізації роботи мікромереж мають певну теоретичну цінність і значення. За допомогою розрахунку оптимізації роботи можна сформулювати розумну схему роботи для підвищення економічності роботи мікромережі.

Метою роботи є дослідження методів та принципів оптимізації мікромережі.

Відповідно до мети були поставлені такі завдання:

- дослідити теоретичні основи та складові мікромереж;
- проаналізувати сучасні тенденції розвитку мікромереж;

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- провести аналіз шляхів та принципів оптимізації роботи мікромереж;
- розглянути алгоритм оптимізації, що базується на параметрах навантаження;
- дослідити метод оптимізації на прикладі власної мікромережі.

Об’єкт дослідження. Мікромережа – система, що складається з великої кількості вузлів, які можуть взаємодіяти між собою.

Предмет дослідження. Принципи оптимізації мікромережі.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої в роботі мети і сформованих відповідно до неї завдань були використані такі методи: порівняння, аналізу, системного та комплексного підходів, теоретичний аналіз літератури.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні важливості використання акумуляторів для оптимізації параметрів навантаження встановленої СЕС, що дає можливість підвищити ефективності енергозабезпечення об’єкта.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що встановлення та експлуатація акумуляторів разом в структурі мікромережі СЕС дозволяє оптимізувати роботу мікромережі, працюючи в більш ефективному діапазоні потужностей, зменшити пікові навантаження, таким чином, що потреба в потужності навантаження задовольняється в будь-який момент часу.

Апробація результатів робота представлена на IV Всеукраїнської студентській науковій конференції «Науковий простір: аналіз, сучасний стан, тренди та перспективи». Публікація. Гайдук О. С. Розробка принципів оптимізації мікромережі. м. Івано-Франківськ; дата проведення: 15 грудня 2023.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД МІКРОМЕРЕЖ

1.1 Поняття мікромережі та її складові

Через глобальну енергетичну кризу занепокоєння щодо вичерпання палива, дефіциту електроенергії та глобального потепління стають дедалі гострішими. В останні роки в умовах різкого зростання глобального попиту на енергію традиційні не відновлювані енергетичні ресурси, представлені нафтою, вугіллям і природним газом, споживаються у великих кількостях [2]. Крім того, ці ресурси мають шкідливий вплив на навколишнє середовище.

У цьому контексті, оскільки традиційна структура електромереж застаріває, а попит споживачів на електроенергію кращої якості все більше зростає, розвиток і використання відновлюваних джерел енергії (чистих джерел енергії, включаючи енергію вітру, сонця, води, геотермальну енергію та інші невикопні види енергії) поступово стає єдиним способом забезпечити сталий соціальний розвиток в енергетичному секторі [1, 3]. Щоб реалізувати стале використання енергії, багато країн вживають заходів для підвищення ефективності використання енергії та активно розвивають відновлювані джерела енергії.

Щоб об'єднати переваги різних розподілених джерел енергії та зменшити негативний вплив розподіленої генерації на велику енергосистему, Консорціум технологічних рішень для електричної надійності (CERTS) запропонував концепцію мікромереж [4]. Ідея цього типу мережі полягає в тому, що це група менших систем генерації, зберігання та керування навантаженням, які або пов'язані з основною електромережею, або відокремлені від неї.

В останні роки було опубліковано досить багато оглядів, пов'язаних з роботою мікромереж. Наприклад, у своєму огляді Каньяно А. представив основні конструктивні особливості існуючих мікромереж [5].

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Akinyele D. та ін. розглянули технології паливних елементів і застосування стійких мікромережевих систем [6]. Villalon A. та ін. представив комплексний огляд літератури для аналізу останніх тенденцій у дослідженнях і розробках щодо застосування прогностичного керування в мікромережах [7]. Al-Ismail, F. S опублікував огляд, в якому задокументовано розробки в плануванні, експлуатації та контролі мікромереж постійного струму [8]. Сучасні дослідження в галузі мікромереж зосереджені на інтеграції їх технології на рівні навантаження.

Сьогодні у світі існує багато визначень мікромереж. Представники національних установ у розвинутих країнах, які беруть участь у формуванні національної політики в енергетичному секторі, а також робочі групи національних і приватних дослідницьких установ і міжнародних організацій, що займаються питаннями електроенергетики, мають свої визначення мікромереж.

Почнемо із визначення мікромереж наданого Міністерством Енергетики США (The U.S. Department of Energy (DOE)). Експерти міністерства визначають мікромережу як [9]:

«групу взаємопов'язаних навантажень та розподілених енергетичних ресурсів (PER) із чітко визначеним електричними межами, що діє як єдина контрольована структура, відносно мережі та може приєднуватись та від'єднуватись від мережі (зовнішньої розподільчої мережі, зазвичай мережі регіональної розподільчої компанії - прим. перекл.) з метою можливості її роботи як у режимі приєднання до мережі, так і в острівному режимі».

Ще одне визначення від Департаменту Оборони США (U.S. Department of Defense) [10]: «Мікромережа, встановлена Департаментом Оборони, є інтегрованою енергетичною системою, що складається із взаємопов'язаних навантажень та енергетичних ресурсів, які, як інтегрована система, можуть переходити у острівний режим стосовно місцевої електромережі та функціонувати як відокремлена система».

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Міжнародний Конгрес Великих Електричних Систем (CIGRE) наводить наступне визначення [11]: «Мікромережі є системами розподілу, що включають у себе навантаження та розподілені енергетичні ресурси (такі як розподілені генератори, накопичувальні пристрої або контрольовані навантаження), що можуть працювати у контрольований, координований спосіб як під час з'єднання із головною мережею живлення, так і у острівному режимі».

Відома аналітична компанія, що спеціалізується на електроенергетиці Navigant Research пропонує таке визначення: «Мікромережа є розподільчою мережею, що включає різноманіття можливих розподілених енергетичних ресурсів, що можуть бути оптимізовані та зібрані у єдину мережу, яка може містити або не містити засоби накопичення енергії та здатна до переходу у острівний режим безвідносно до наявності підключення до традиційної електромережі»

Наведені вище визначення дають змогу виокремити спільне у визначеннях мікромережі. На думку дослідників, необхідними ознаками мікромережі є здатність працювати у острівному режимі та наявність власної генерації. Отже, мікромережа — це локальна енергетична система, здатна виробляти (потенційно зберігати) і розподіляти енергію між об'єктами в мережі, що працює як керована структура основної мережі та обмежена чітко визначеними електричними кордонами.

На сьогодні ринок мікромереж все ще формується та вважається специфічним. Але мікромережі виникли не просто так. Протягом 20-го століття власні мікромережі активно будували військові та спецслужби, особливо - для секретних об'єктів часів холодної війни. Високі вимоги до стійкості таких об'єктів до зовнішніх впливів вимагають їх роботи в повністю відокремленому режимі або можливості переходу в цей режим при вимкненому зовнішньому джерелі живлення [12].

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Активний розвиток сучасного ринку мікромереж почався після 2011-2012 років. Велику роль відіграли землетрус та цунамі в Японії та ураган Сенді. Мікромережі, що існували на час природних негод (здебільшого створені для експериментів), показали свою стійкість та здатність функціонувати, коли існуюча регіональна електромереж перестала працювати [12].

Нині більшість мікромереж знаходяться в Північній Америці та Азіатсько-Тихоокеанському регіоні [13]. Відповідно до звіту Navigant Research за 2019 рік, Азіатсько-Тихоокеанський регіон має найбільшу у світі потужність мікромережі, потім розташовуються Північна Америка, Близький Схід [14]. У найближчі роки очікується значне зростання мікромереж у всьому світі, очікується, що щорічне встановлення потужностей і витрати зростуть приблизно в п'ять разів з 2024 по 2027 рік (рис. 1.1, 1.2)

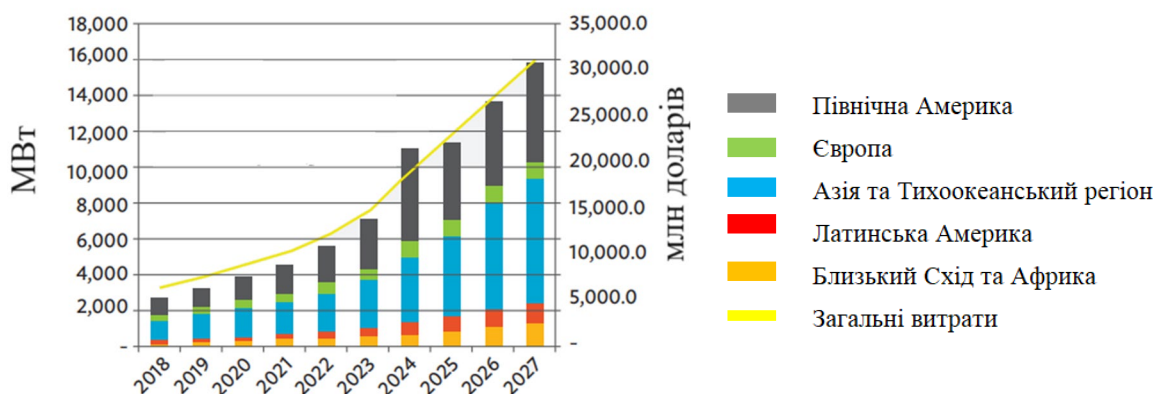


Рисунок 1.1 – Річна потужність мікромережі та витрати, базовий сценарій 2024–2027 рр. [13]

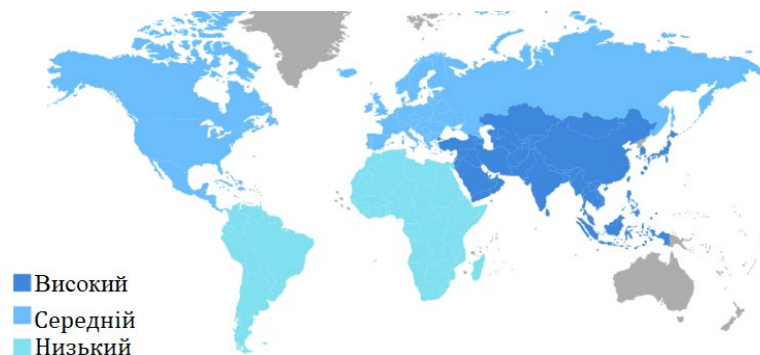


Рисунок 1.2 – Темпи зростання ринку мікромереж за регіонами, 2022-2027 [14].

У загальному вигляді мікромережа складається з декількох джерел електроенергії (сонячні фотоелектричні установки, вітрові турбіни або генератори електроенергії), пристроїв її акумулювання, систем накопичення енергії, інтелектуального керування та програмного забезпечення для управління (рис. 1.3). Вона також включає інші важливі компоненти, такі як електричні кабелі, автоматичні вимикачі, трансформатори тощо. Вони підключають генеруючі ресурси до споживачів і дозволяють системі керування мікромережею змінювати її стан. У більш складних мікромережах містяться вимірювальні прилади, складні програмні платформи та канали зв'язку, призначені для оптимізації в реальному часі та контролю генераторів, накопичувачів енергії та навантажень.

При цьому існує можливість оперативного підключення споживачів до загальної електромережі у випадку перевантаження та коливань напруги, що суттєво підвищує надійність електрозабезпечення. Для побудови функціонуючої мікромережі, підключеної до загальної електромережі, необхідні п'ять категорій компонентів: локальна генерація, накопичення енергії, навантаження кінцевих споживачів, взаємозв'язок мереж і система керування мікромережею [13].

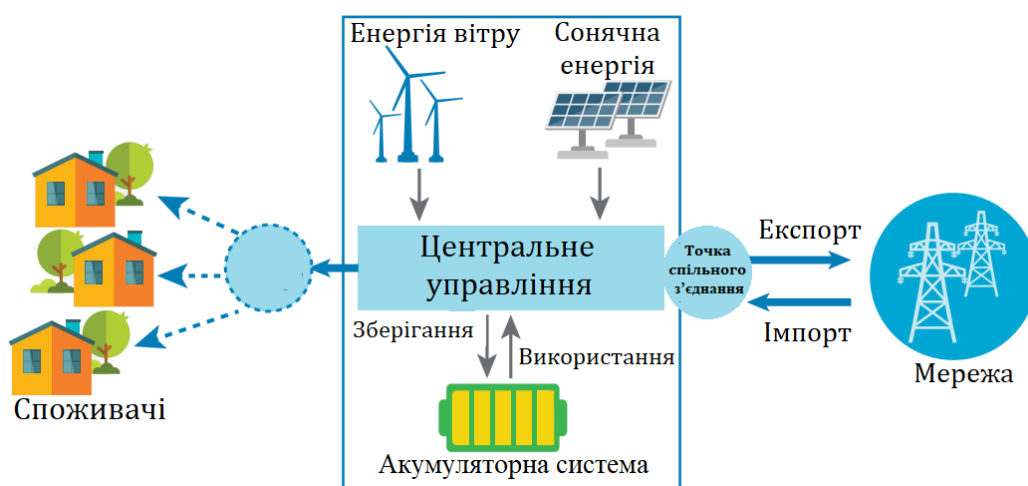


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд мікромережі [13].

Тип пристроїв кінцевих споживачів визначає електричні навантаження, які мікромережа має бути здатна обробляти, що, у свою чергу, впливає на потужність виробництва електроенергії та вимоги до зберігання.

Велика кількість різних варіантів визначення мікромереж призвела до того, що мікромережі класифікуються та групуються за різними ознаками та критеріями. Є декілька основних способів класифікації мікромереж [15]. Мікромережі можна класифікувати за типом живлення, режимом роботи, топологією та іншими способами.

Перший спосіб - за функціональним призначенням. Мікромережі мають різні призначення, оскільки будь-яка структура чи спільнота може створити власну мікромережу для потреб, що відповідають її завданням.

Відповідно до мети створення:

- комерційні;
- військові;
- кампусеві;
- мікромережі житлових комплексів;
- мікромережі критично важливих служб;
- місцевої громади;
- промислові.

Така класифікація не є повною, однак дає змогу уявити для чого потрібні мікромережі на сьогодні.

Другий спосіб – топологія мікромережі. При розгляді на основі того, як мікромережа розподіляє електроенергію, виникають три різні моделі: радіальна, сітчаста та мережева [15]. Найскладнішою з них є мережева система. Радіальні та сітчасті системи частіше досліджуються та впроваджуються в усьому світі. Однак, завдяки поточній експлуатації мережі та стратегіям захисту, радіальна система розподілу була визначена як така, що має найменший негативний вплив.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Третій спосіб – тип струму. Є три конфігурації, які використовуються для підключення мікромереж до електричної інфраструктури: змінного струму, постійного струму та гібридна форма змінного/постійного струму.

Четвертий спосіб – режим. Мікромережі існують у двох різних режимах. Перший режим підключений до загальної мережі, що дозволяє краще справитися зі стабільністю та витратами електроенергії. Другий режим поза мережею, забезпечує навантаження в аварійному або автономному режимі, такі мережі зазвичай знаходяться у віддалених районах, де немає електричної мережі.

Мікромережі мають ряд переваг для навколишнього середовища, операторів комунальних послуг і споживачів, а саме [16, 17]:

1. Мікромережі пропонують можливість розгорнути більше джерел електроенергії з нульовим рівнем викидів, тим самим зменшуючи викиди парникових газів.

2. Мікромережі можуть використовувати енергію на місці, яка інакше була б втрачена через лінії електропередачі, і тепло в атмосферу. Коли електроенергія подається на великі відстані (наприклад, від централізованої електростанції), виникають втрати в лінії, що вимагає додаткової генерації, щоб забезпечити задоволення попиту на великій відстані. Оскільки електроенергія виробляється в мікромережах, розташованих близько до точки споживання, втрати в лініях зводяться до мінімуму. Коли електроенергія виробляється з певних концентрованих джерел енергії (наприклад, викопного палива), також виробляється велика кількість тепла, яке зазвичай викидається в атмосферу - невикористаним. Коли електроенергія виробляється поблизу кінцевого споживача, економічно доцільно використовувати цю теплову енергію продуктивно, наприклад, для нагрівання води або приміщень у прилеглих будинках і підприємствах, таким чином зменшуючи викиди парникових газів [18].

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Використовуючи складне програмне забезпечення, оператори можуть оптимізувати енергоспоживання на основі попиту, цін на комунальні послуги та інших факторів.

4. Вони витривалі. Вони накопичують і використовують відновлювану енергію. Оскільки мікромережі не залежать від традиційної мережі, їх стабільність у погану погоду важлива для критично важливих структур, таких як лікарні та військові бази.

5. Також вони мають переваги порівняно з централізованими системами електропостачання, оскільки відсутня необхідність будівництва нових генеруючих потужностей, протяжних ліній електропередач та розподільних мереж, що, в свою чергу, потребує значних капіталовкладень [18].

1) Мікромережі також стикаються з деякими проблемами. По-перше, їх прискореному розгортанню заважають фінансові та правові перепони. Загалом, що стосується юридичних питань, мікромережі стикаються з трьома типами правових перешкод:

2) закони, які забороняють або обмежують певну діяльність;

3) закони, які збільшують витрати на ведення бізнесу;

4) невизначеність, включаючи ризик запровадження нового законодавства для регулювання мікромереж і накладення обмежень або витрат, які не були передбачені під час розробки або будівництва [16]

5) Мікромережі, як правило, інтегрують численні енергетичні технології в один проект, що робить його складним для інвесторів. Кожен проект може включати різні типи та розміри генерації електроенергії, розташовуватися в унікальній географічній місцевості та на ринку, а також підпорядковуватися мінливості погоди.

Незважаючи на певні недоліки такий крок у розвитку енергосистеми дає змогу забезпечити регіональну енергонезалежність, що значно зменшує проблеми енергопостачання у віддалених та ізольованих регіонах, які отримують енергію однією досить протяжною віткою.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Принцип роботи мікромережі

Система електропостачання в мікромережі організована шляхом інтегрування малопотужних джерел енергії та максимальної їх адаптації до режимів електроспоживання. Створення таких систем дозволяє радикально змінити відношення споживачів до управління процесами генерації та розподілу електроенергії [19]. Мікромережа поєднує виробництво та споживання електроенергії (рисунок 1.4).

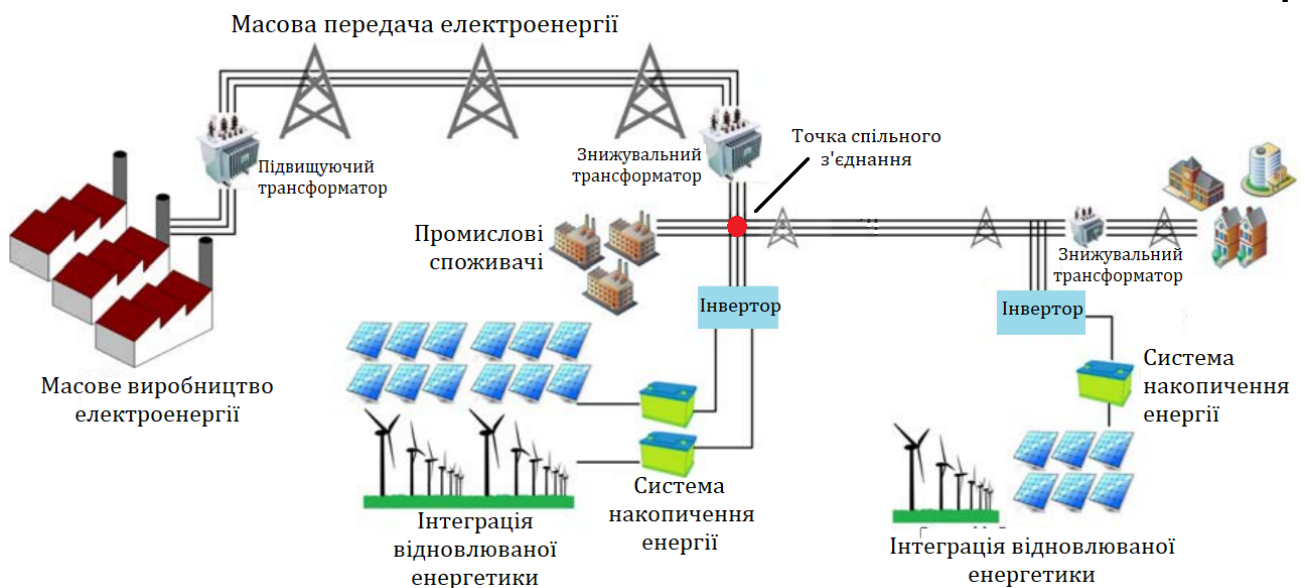


Рисунок 1.4 – Типова схема мікромережі [19].

Коли мікромережа працює незалежно від мережі в автономному режимі, вона є самопідтримуваною незалежною енергетичною системою. До мережі вона підключена через точку спільного з'єднання, що дозволяє імпортувати або експортувати електроенергію відповідно до переважаючих комерційних або технічних умов.

Режим підключення до мережі поділяється на два режими роботи: робота з неузгодженою потужністю та робота з узгодженою потужністю відповідно до обміну електроенергією між мікромережею та енергосистемою [20].

У режимі неузгодженої потужності активна потужність ($\Delta P \neq 0$) і реактивна потужність ($\Delta Q \neq 0$) не дорівнюють нулю і струм протікає між мікромережею та енергосистемою. Якщо $\Delta P > 0$, енергія надходить від

мережі до мікромережі, щоб задовольнити попит на навантаження, оскільки виробництво електроенергії з ВДЕ є недостатнім, а якщо $\Delta P < 0$, енергія надходить з мікромережі в мережу після задоволення попиту на навантаження, оскільки виробництво електроенергії з ВДЕ є надлишковим.

У режимі погодженої потужності активна ($\Delta P = 0$) і реактивна ($\Delta Q = 0$) потужність є збалансованими, що означає, що електроенергія, вироблена з ВДЕ, задовольняє попит на навантаження, і не відбувається обміну електроенергією між мікромережею та мережею. Аналогічно, реактивна потужність є надмірною, якщо $\Delta Q < 0$, і недостатньою, якщо $\Delta Q > 0$, ця зміна реактивної потужності класифікується як невідповідність потужності.

У автономному режимі роботи мікромережа відключається від мережі через її несправності або планове відключення.

Джерела генерації поділяються на дві великі групи – джерела теплової енергії (наприклад, генератори природного газу або біогазу або мікроелектроенергії) та джерела відновлюваної енергії (наприклад, вітрові турбіни та сонячна енергія). Вибір джерела енергії залежить від вимог до мікромережі, таких як бажана генеруюча потужність, необхідний рівень стійкості, швидкість наростання, цільові показники відновлюваної енергії та доступність палива (та вимоги до зберігання палива). Загальні джерела генерації мікромережі наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики деяких джерел генерації мікромережі

Характеристики	Джерела генерації			
	Сонце	Вітер	Дизель-генераторна установка	ТЕЦ
Доступність	Залежить від географічного положення	Залежить від географічного положення	Доступно завжди	Залежить від джерела
Вихідна потужність	DC	AC	AC	AC
Контроль	неконтрольована	неконтрольована	контрольована	Залежить від джерела

Серед доступних комбінацій гібридних систем є комбінація сонячної енергії (PV) та енергії вітру (В). Типова гібридна вітро-сонячна мікромережа може складатися з PV-В, PV-В-Дизель, PV-В-СНЕ та комбінація, PV-В-Дизель-СНЕ з системою накопичення енергії (СНЕ) та без неї [21].

Дискретний характер ВДЕ може привести до надлишку енергії протягом короткого проміжку часу в секундному або хвилинному масштабі, а в деяких випадках і годинному. Системи накопичення енергії дозволяють вирішити це питання. Мікромережі можуть використовувати акумуляторні системи для зберігання електроенергії та її використання під час відключення електроенергії або коли мережа потребує викиду напруги. Завдяки накопиченню мікромережа може поглинати та зберігати енергію, вироблену в моменти, коли пропозиція перевищує попит, і згодом повертати її в періоди, коли попит перевищує пропозицію. Також використання комбінації сонячної енергії та енергії вітру може зменшити дискретний характер цих джерел і тим самим підвищити надійність гібридної системи.

Регулювання напруги та частоти, контроль реальної та реактивної потужності, прогнозування навантаження та планування, моніторинг, захист і аварійний запуск – усе це частина контролю мікромережі.

Системи моніторингу та керування мікромережею (Microgrid monitoring and control systems) об'єднують усі компоненти мікромережі разом і підтримують баланс генерації та навантаження в реальному часі. Система керування мікромережею зазвичай включає кілька регуляторів і датчиків, розподілених по її території.

Центральна система контролю та управління є основним регулятором у мікромережі та розглядається як її мозок. Центральна система виконує всі команди для експлуатації, управління та контролю мікромережі через регулятор відновлюваної енергії та інші. Основними функціями такої системи є [20]:

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- підтримка номінальної напруги та частоти в усіх точках навантаження за допомогою регулювання частоти та напруги;
- підтримка балансу потужності в мікромережі;
- оптимізоване виробництво енергії та розподіл навантаження;
- управління навантаженням через звільнення від навантаження;
- моніторинг і зберігання даних;
- наглядовий контроль.

Центральна система контролю та управління здебільшого розроблена для автономної роботи, але її можна переключити на ручне керування, коли це потрібно.

Для збору даних і розповсюдження порядку дій також потрібна система диспетчерського контролю та збору даних (Supervisory Control And Data Acquisition – SCADA). Функція SCADA варіюється від кількох завдань, таких як збір даних, дистанційне перемикання, індикація тривоги, обробка даних до керування в надзвичайних ситуаціях, управління вимогами, інтерфейс людина-машина тощо. Багато систем контролю можуть відстежувати енергетичні потреби об'єкта та визначати, як постачати необхідну енергію. Ці системи враховують і оцінюють такі фактори, як вартість, постачання палива, погода та енергетичне навантаження, необхідні для прийняття рішення про те, які використовувати. Це комп'ютерне управління спрямоване на підтримку рівноваги мікромереж і використання енергії якомога ефективніше та рентабельніше. Таким чином, ефективне управління ВДЕ в мікромережі приводить до покращення продуктивності системи.

Однак успішна робота мікромереж потребує належного планування, і існують серйозні проблеми, пов'язані з експлуатацією, контролем та захистом мікромереж, які необхідно вирішити для успішного розгортання мікромереж.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Світовий досвід впровадження мікромереж

У більшості країн, що розвиваються, таких як Пакистан, Чилі, Таїланд, старіння та перевантаження ліній електропередач є однією з головних проблем енергетичної системи. Стара інфраструктура електромережі не здатна компенсувати підвищений попит на електроенергію [3]. Тому мікромережі виділяються як потенційне рішення цих проблем.

Також принцип розподіленої енергогенерації та максимальне використання відновлюваних джерел енергії закладено в основу трансформаційних процесів енергетики ЄС. Енергосистеми майбутнього орієнтуються на функціонування великої кількості мікромереж, які здатні автономно забезпечувати себе енергією, уникаючи проблем пов'язаних з перебоями енергопостачання [2].

В даний час формат мікромереж (інтелектуальні мережі з малим числом точок моніторингу та керування) розвивається переважно в Північній Америці. Їх переваги перед централізованим масовим електропостачанням полягає у дивовижній гнучкості пропонованих послуг, що підтверджується низкою прикладом впроваджень [22].

У 2008 році острів Ейг став першою у світі громадою, яка встановила систему не підключену до основної мережі. З моменту повного запуску мікромережі електрична енергія доступна 24 години на добу, 95 % її надходить з відновлювальних джерел енергії [12].

Зусилля політики США сприяють дослідженням і розробкам мікромереж, спрямованих на забезпечення більш надійних, гнучких, ефективних, стійких, доступних та безпечних систем живлення. За останнє десятиліття Міністерство фінансувало безліч програм із проектування мікромережі та інструментів економічного аналізу, тестування системи та демонстрації програми, багато з яких здійснюються спільно з Міністерством оборони США [23].

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Острів Алькатрас є домом для однієї з найбільших мікромереж країни. Острів оснащений гібридною сонячно-дизельною енергетичною системою. Його сонячні батареї потужністю 305 кіловат (кВт) розташовані на головній будівлі в'язниці та приховані від очей громадськості, щоб зберегти свою історичну цілісність. Сонячні батареї підключаються до акумуляторної батареї та інверторів, які допомагають жити острові замість того, щоб покладатися виключно на дизельні генератори (рис. 1.5). Цей проект вартістю 7,1 мільйона доларів США, який спочатку фінансувався через Закон США про відновлення та реінвестування, дозволив скоротити споживання палива на острові на 45 % після його встановлення в 2012 році [24].

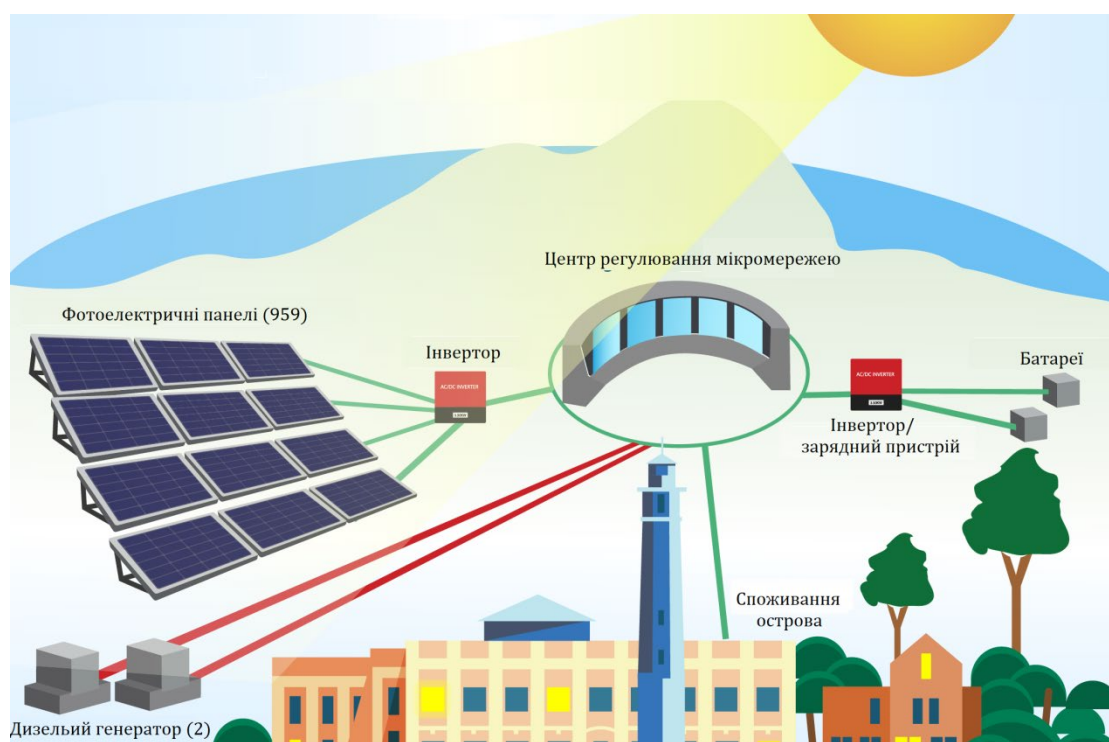


Рисунок 1.5 – Схема мікромережі острову Алькатрас [24]

Проект у Нідерландах, де близько 25 домогосподарств об'єднані між собою за допомогою місцевого енергетичного ринку, що складається з різних установок для виробництва енергії, таких як мікрокогенераційні ¹установки,

¹ мікрокогенераційна установка - когенераційна установка з максимальною електричною потужністю до 50 кВт.

гібридні теплові насоси, сонячні фотоелектричні установки, вітрові електростанції тощо [25].

У Каліфорнії в'язниця Санта – Ріта, яка містить до 4000 ув'язнених, має власну мікромережу, що працює на відновлюваних джерелах енергії, включаючи вітряні турбіни, сонячні панелі та паливні елементи, які використовують відпрацьоване тепло для забезпечення гарячою водою. В'язниця почала розвивати свою мікромережу після енергетичної кризи в Каліфорнії 2001 року, коли ціни на електроенергію різко зросли, а дефіцит постачання призвів до відключень електроенергії [26].

Багато енергетичних компаній беруть участь у розробці проектів мікромережових технологій. З них можна виділити наступні.

У квітні 2021 року компанії NIP, Perso та Emera Technologies отримали грант на енергопостачання житлового проєкту в місті Фермонт-Хайтс, штат Меріленд, США. Проєкт отримав близько 200 тис. доларів США. Він є частиною флагманської програми штату «Resilient Maryland Program», яка спрямована на розвиток мережі сонячних електростанцій для домогосподарств із середнім рівнем доходу [14].

У листопаді 2021 року Сполучене Королівство присудила ще один проєкт мікромережі для житлової та ділової забудови в районі Гроув – Парк у Льюїшемі, Великобританія. Проєкт складається з системи відновлюваної енергетики потужністю 500 кВт та системи зберігання енергії, підключеної до інтелектуального контролера управління мережею. Він буде розроблений SNRG та енергетичною компанією Centrica. Очікується, що проєкт буде завершено до 2025 року [14].

У 2021 року Департамент транспорту Лос-Анджелеса запланував новий проєкт мікромережі для електрифікації електромобілів. Очікується, що зарядною станцією для автопарку стане мікромережа з системою живлення від сонячних батарей і накопичувачів. Проєкт, який розроблятиме Proterra Energy, отримав грант у розмірі 6 мільйонів доларів США від

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Каліфорнійської енергетичної комісії. Очікується, що він вироблятиме близько 7,5 МВт вихідної потужності.

У червні 2020 року Sri Lanka Electricity Company Ltd (LECO) підписала контракт з DHYBRID GmbH на будівництво першої в історії Шрі-Ланки національної мікромережі на основі відновлюваної енергії в Університеті Моратува. Проект фінансується Азіатським банком розвитку [14].

Вартість встановлення мікромережі коливається від кількох сотень доларів для малих проектів до мільйонів для великих мікромереж, які обслуговують фабрики, кампуси чи цілі громади. Компанії в усьому світі роблять значні кроки в інноваціях, розробці та розширенні технологій мікромережі, що робить можливими проекти будь-якого розміру.

Лідерами ринку мікромереж є:

1. Siemens AG.
2. General Electric Company.
3. Eaton Corporation PLC.
4. Schneider Electric SE.
5. Hitachi Energy Ltd.

Провідні компанії зосереджуються на стратегічних придбаннях і партнерствах у напрямку розробки передових та інноваційних рішень для енергетики, а саме напрямку мікромереж. Крім того, зростаючий акцент на розвитку електричної інфраструктури щодо модернізації мережі сприятиме перспективам бізнесу.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖ

2.1 Опис принципів оптимізації мікромереж

Стратегія оптимізації може бути визначена як спроба знайти найкращу відповідь з усіх можливостей. Дослідження в цій області розпочав Роберт Х. Лассетер, професор електротехніки Вісконтського університету в Медісоні (США), якого вважають засновником терміну «Microgrid» [19].

У загальному значенні оптимізація - це процес вдосконалення чогось, зазвичай з метою досягнення максимальної ефективності чи оптимальних результатів [27].

Оптимізація складається в основному з чотирьох основних концепцій:

1. Цільова функція: вона визначає мету оптимізації.
2. Контрольні змінні – це важелі, які можна використовувати для досягнення своєї мети.
3. Обмеження, що стосуються законів фізики, таких як потужність генерації не може бути за межами робочого діапазону генеруючої установки.
4. Модель. Оптимізація працює на моделі, де модель визначає кількість об'єктів, що беруть участь у оптимізації [28].

Нижче наведено деякі основні принципи оптимізації параметрів навантаження мікромережі [29, 30]:

- 1) Швидкість роботи. Управління навантаженням і, зокрема, розвантаження має бути реалізовано в дуже короткий термін.
- 2) Забезпечення ефективного використання енергії в мікромережі, що охоплює підвищення ефективності генерації, передачі та споживання енергії.
- 3) Розробка математичної моделі, яка відображає поведінку мікромережі, враховуючи джерела енергії, варіанти зберігання та вимоги до навантаження.
- 4) Застосування автоматизованих систем керування, які використовують сучасні технології, щоб оптимізувати роботу компонентів мікромережі.

5) Ефективне управління розподілом та використанням різних джерел енергії, включаючи відновлювальні джерела та системи зберігання енергії.

6) Гнучкість та адаптивність. Розробка гнучких систем, які можуть швидко адаптуватися до змінних умов, включаючи збільшення чи зменшення навантаження.

7) Безпека. Якщо структура недостатньо захищена, вся система буде вразливою як до фізичних, так і до кібератак.

Через стохастичний характер параметри навантаження та постачання можуть бути невизначеними в мікромережах, а отже потрібно враховувати можливі неконтрольовані зміни споживаної потужності.

2.2 Методи оптимізації мікромереж

Дослідники розробили різні техніки та методи для оптимальної роботи мікромереж.

У [31] робиться спроба оптимізувати якість електроенергії та надійність загальної енергосистеми, до якої підключена мікромережа, шляхом проектування пристрою FACTS (Flexible Alternate Current Transmission Systems) гнучкої системи розподілу змінного струму для максимального підвищення надійності шляхом мінімізації ризику виникнення в них аварійної ситуації.

У [32] запропоновано 3-ступеневу ієрархічну архітектуру системи керування. Три рівні контролю:

- локальні мікроконтролери джерел (МС) і контролери навантаження (LC);
- центральний контролер мікромережі (MGCC);
- система управління розподілом (DMS).

Коли мікромережа підключена до електромережі, локальні МС виконують локальну оптимізацію відповідно до вимог центрального

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролера. Локальна оптимізація включає контроль активної та реактивної потужності, відстеження та керування навантаженням.

Наведемо найбільш практичні методи оптимізації щодо застосування в мікромережах [18, 29, 33, 34,]:

1) Математичне програмування та лінійна оптимізація: прості оптимізаційні методи, в яких цільова функція і область пошуку визначаються лінійними залежностями.

2) Метаевристичні методи включають наступні алгоритми: генетичний (Genetic Algorithm, GA), оптимізація рою частинок (PSO), оптимізація мурашиних колоній (ACO), інші алгоритми (імітації відпалу, оптимізація полум'я молі тощо), використовуються для вирішення складних задач оптимізації мікромереж, які можуть не мати простого аналітичного рішення.

3) Динамічне програмування, використовується для задач оптимізації мікромереж з послідовною природою прийняття рішень і дискретним простором станів.

4) Багатоцільова оптимізація, яка включає декілька цілей. Включає методи [35]:

- оптимізація за Парето;
- метод ϵ -обмежень;
- метод Монте-Карло (MCS) – є найточнішим методом моделювання невизначеності, але це трудомісткий підхід та загалом потребує значних обчислень.

5) Балансування навантаження зменшує ризик перевантаження певних частин мережі, що призводить до підвищення стабільності та надійності системи.

6) Системи енергоменеджменту (Energy Management System – EMS) – програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати централізований моніторинг та контроль енергоресурсів мікромережі [36]. Одним із методів EMS є використання систем енергоменеджменту будинку (HEMS) –

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поєднання апаратного забезпечення (розміщеного у домі) та програмного забезпечення, яке відстежує та показує споживання енергії, як правило, через програму для смартфона або веб-сайт. HEMS має на меті зменшити пікове споживання електроенергії в житловому секторі шляхом впровадження певних заходів, таких як планування навантажень у години пік, автоматичне відключення менш значних навантажень, заборона вмикання певних енергоємних приладів у години пік, тощо (рисунок 2.1).

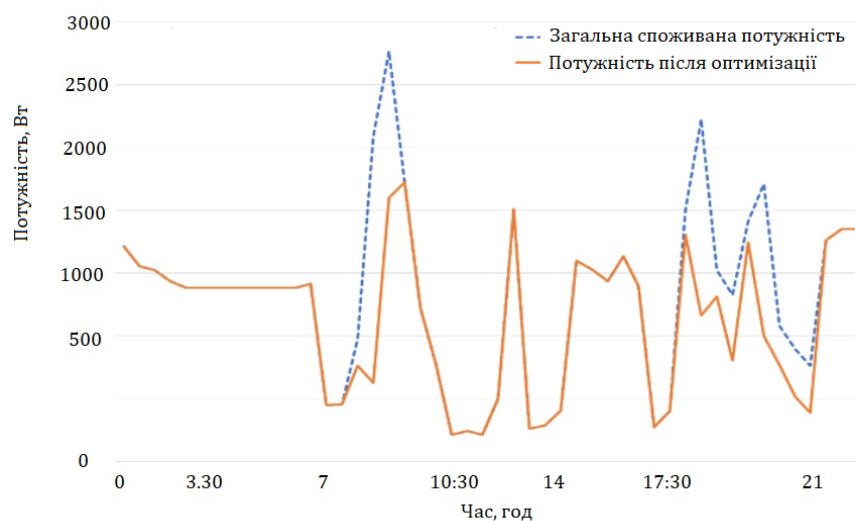


Рисунок 2.1 – Зниження щоденного пікового навантаження після оптимізації HEMS [27].

З рис. 2.1 бачимо, що пікові навантаження були значно зменшені після того, як запустили метод оптимізації.

6. Реагування на попит. Впровадження стратегій реагування на попит, які дозволяють мікромережі регулювати навантаження на основі змін цін на електроенергію, стану мережі або інших факторів. Програми реагування на попит можуть включати скидання та перерозподіл навантаження або обмеження навантаження в періоди пікового попиту (рисунок 2.2).

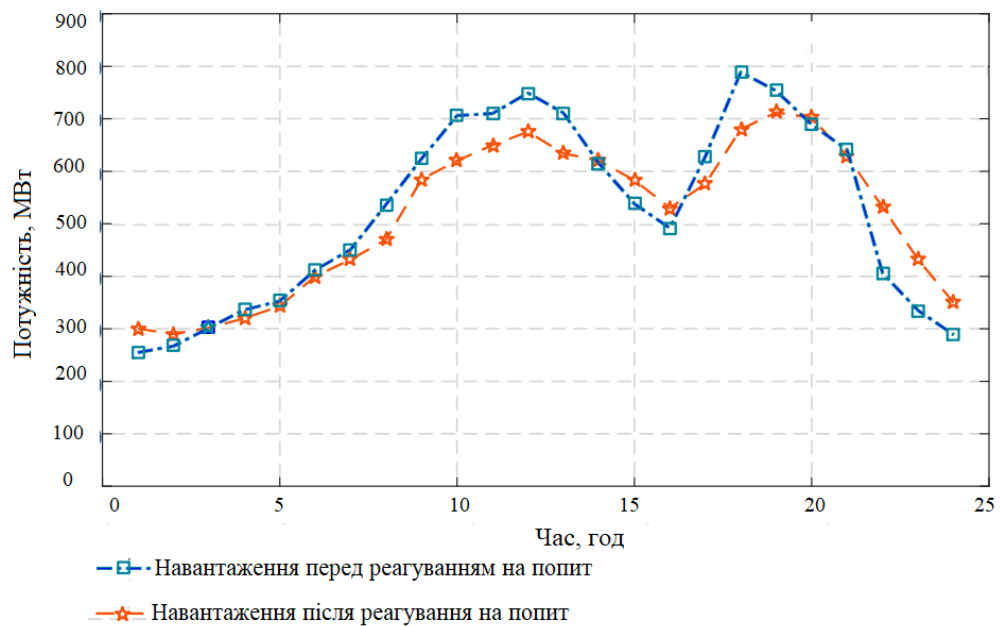


Рисунок 2.2 – Крива навантаження системи до і після реагування на попит [37].

На графіку представлено зниження навантаження, досягнуте завдяки заходам з реагування на попит. На ньому порівнюються профілі навантаження до та після заходів з реагування на попит, що ілюструє ефективність цього методу у зниженні пікового попиту.

Вибір методу оптимізації залежить від конкретних цілей, обмежень і складності системи мікромереж.

2.3 Вибір методів та підходів до розв’язання проблеми

Принцип оптимізації мікромережі полягає в знаходженні найкращого варіанта розподілу енергії між джерелами та споживачами, що мінімізує витрати та забезпечує надійність та стабільність мікромережі. Для цього можна застосовувати різні методи оптимізації, які були описані в підрозділі 2.2.

Для вирішення проблеми оптимізації використовуємо наступний алгоритм (блок – схема наведена на рис. 2.3):

1. Аналіз вихідних даних.

Необхідно зібрати інформацію, що може включати наступне:

- 1) існуючі дані про споживання електроенергії;
- 2) прогнозна величина погодинного навантаження;
- 3) ціна на електроенергію;
- 4) величина генерації для ВДЕ;
- 5) визначення пікових навантажень та періодів споживання.

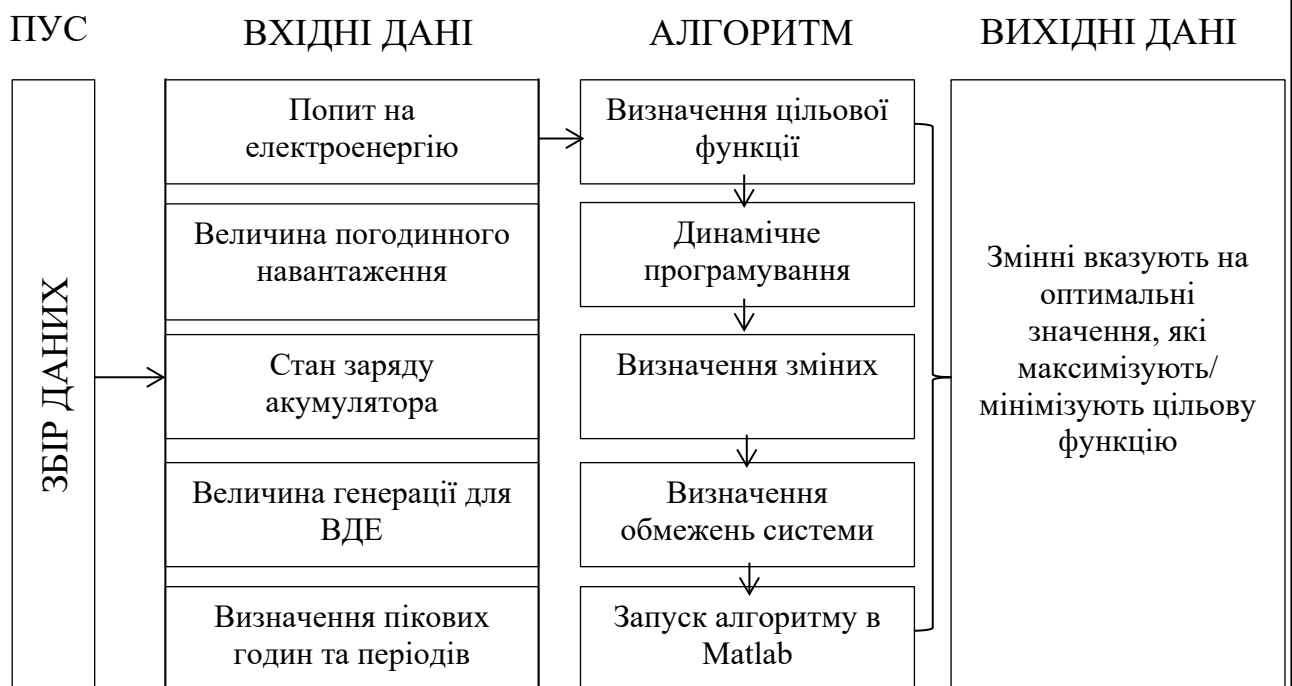


Рисунок 2.3 – Огляд побудови блок – схеми оптимізаційної моделі для мікромережі. Джерело: розроблено автором.

2. Визначення цільової функції оптимізації:

Встановлення конкретних цілей оптимізації. Це може бути мінімізація витрат, максимізація прибутку, підвищення ефективності мережі тощо.

3. Вибір технологій та обладнання:

- вибір оптимальних схем та типів обладнання для мікромережі;
- інтеграція розподілених енергетичних ресурсів.

4. Визначення оптимального режиму роботи:

Використання алгоритму динамічного програмування для знаходження оптимальних параметрів роботи системи.

Динамічне програмування (DP) — це метод формулювання найкращого набору рішень для визначення оптимального маршруту до пункту призначення, розбиваючи його на послідовність кроків у часі. Динамічне керування враховує зміни у вхідних умовах (таких як сонячна активність, споживання енергії тощо) та намагається оптимізувати режим роботи системи в реальному часі.

Щоб виконати оптимізацію необхідно зробити наступні кроки:

Крок 1: Визначити деякі ключові параметри та змінні.

- $P_{PV}(t)$ – потужність, вироблена сонячними елементами;
- $P_{Load}(t)$ – потужність, спожита в мережі в годину t ;
- D – години, протягом яких сонячні панелі генерують електроенергію;
- $B(t)$ – рівень заряду акумулятора в годину t ;
- B_{min} – мінімально допустимий рівень заряду акумулятора;
- B_{max} – максимально допустимий рівень заряду акумулятора.

Крок 2: Визначити виробництво сонячної енергії.

Потужність, яку виробить сонячна панель за певний період часу:

$$P_{PV} = \rho \times \eta_{PV} \times S_{PV} \quad (1)$$

де ρ , η_{PV} , і S_{PV} представляють, у свою чергу, коефіцієнт інсоляції, ККД та площу фотоелектричного модуля.

Величина інсоляції (η_{PV}) залежить від висоти Сонця над горизонтом, від географічної широти місця, від кута нахилу земної поверхні, від орієнтації земної поверхні по відношенню до сторін горизонту.

Крок 3: Визначити споживання електроенергії – P_L .

Крок 4: Визначити обмеження.

- повинен бути достатній резерв запасу електроенергії для задоволення критичних навантажень протягом певного періоду;
- стан заряду підлягає наступному обмеженню:

$$B_{min} \leq B(t) \leq B_{max} \quad (2)$$

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $B(t)$ — стан заряду в момент часу t , тобто кількість енергії, що зберігається в акумуляторі в даний момент; B_{min} — мінімальне значення стану заряду акумулятора; B_{max} — максимальне значення стану заряду акумулятора.

Крок 5: Зазначити часові точки (години) та відповідні значення виробленої та споживаної електроенергії.

Далі визначимо, коли треба заряджати або розряджати акумулятор за допомогою структури «If ... else if then», яка надає правила. Виражається наступним чином:

Визначається різниця ($\Delta_L(t)$) між потужністю, що генерується сонячною електростанцією P_{PV} та необхідним навантаженням P_L .

Якщо $\Delta_L(t) \geq 0$ тоді фотоелектрична станція може забезпечити потреби споживача.

Якщо $\Delta_L(t) < 0$ фотоелектрична станція не забезпечує потреби споживача, потрібне додаткове живлення від батареї, починається розрядження батареї.

Якщо $\Delta_L(t) < 0$, а $B(t) < B_{min}$ потрібне живлення від загальної мережі.

Повторюємо цей процес для кожної часової точки, оновлюючи рівень заряду акумулятора, і визначаємо, коли слід заряджати або розряджати акумулятор. Даний алгоритм схематично зображений на рис. 2.4.

Крок 6: Знаходження оптимального розподілу електроенергії:

6.1 Ініціалізація (початковий стан):

$$B(0) = (\text{початковий стан акумулятора}), \text{кВт} \quad (3)$$

6.2 Формула для кожної години t :

$$B(t) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max) \quad (4)$$

де t - година, починаючи з 01:00.

6.3 Обчислення для годин t в діапазоні від 1 до 24.

$$B(1) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max)$$

$$B(2) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max)$$

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B (...) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max)$$

$$B(24) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max)$$

Знайдено оптимальний розподіл енергії. Виведення графіків.

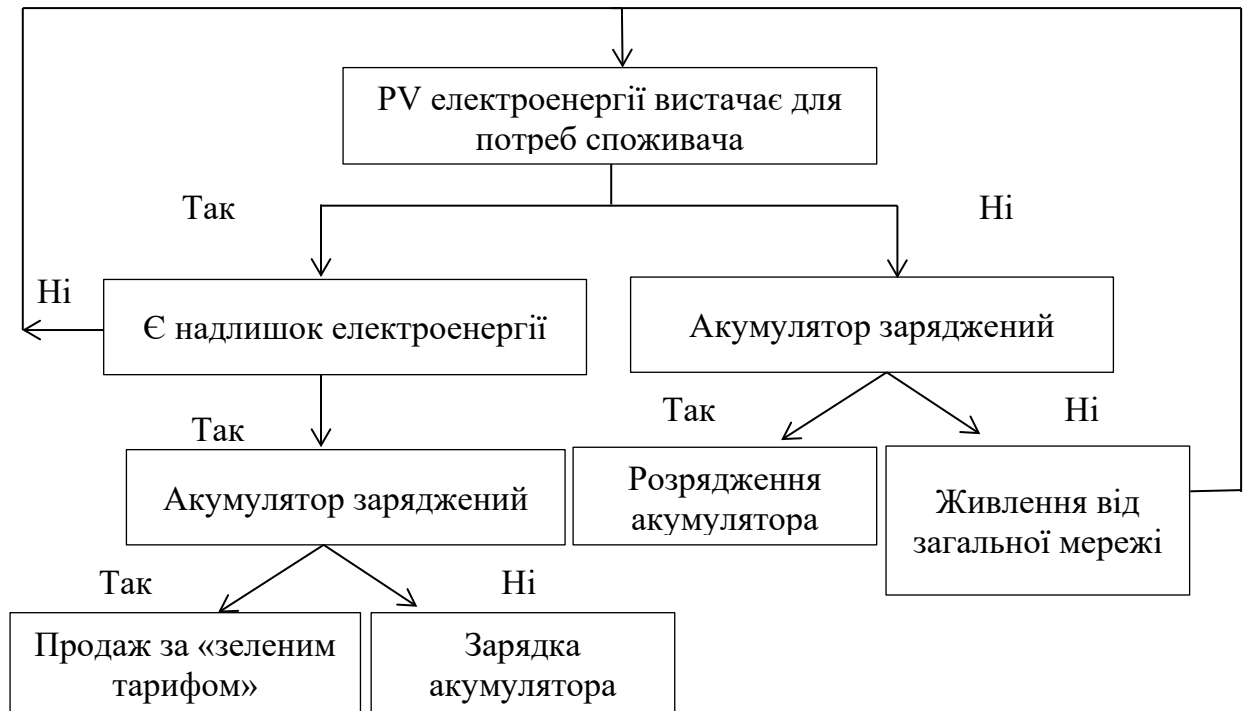


Рисунок 2.4 – Алгоритм для оптимізації роботи гібридної СЕС. Джерело: розроблено автором.

5. Реалізація DP в MATLAB.

6. Розробка системи моніторингу та керування:

- постійний моніторинг роботи системи та вчасне вирішення виниклих проблем;
- встановлення системи спостереження за реальним станом мікромережі та використання отриманих даних для постійної корекції параметрів алгоритму;
- вдосконалення оптимізаційних стратегій з урахуванням змін у споживанні енергії та технічних параметрах.

3 ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВЛАСНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ СЕС

У цьому розділі реалізовано в MATLAB метод динамічного програмування для максимізації ефективності акумулятора для задоволення всіх обмежень. Рішення проблеми можна використовувати для аналізу минулих або планування майбутніх операцій даної мікромережі на основі прогнозованих даних.

Модель мікромережі включає фотоелектричну панель (PV), систему накопичення енергії акумулятора (BESS). На рис. 3.1 показано конструкцію системи. Мікромережа підключена до основної мережі, навіть у цьому випадку вона може бути досліджена поза мережею, у разі непотрібності, несправності або збою основної мережі, з'єднання забезпечується через трансформатор і загальну точку з'єднання (PCC).

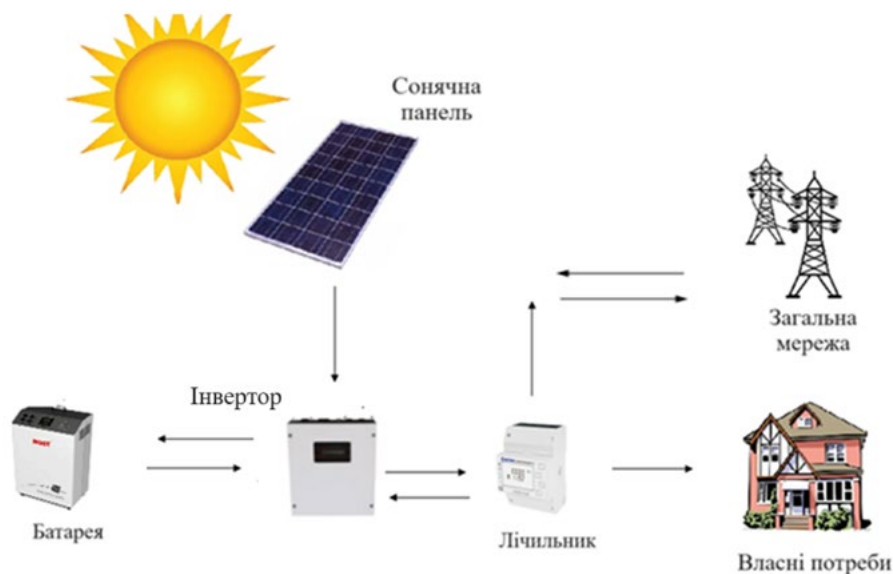


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема власної гібридної СЕС.
Розроблено автором.

Впровадження моделі оптимізації. Крок 1 – 3 об'єднано в пункт 1.

1. Аналіз вихідних даних наведено в таблицях 3.1 – 3.2, включаючи всі фізичні межі та початкові умови, які необхідні для визначення цільових функцій:

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виробництво електроенергії від сонячних панелей представлено на рисунку 3.2;

$\text{solarGeneration} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.15 \ 1.8 \ 4.2 \ 12.6 \ 16.8 \ 21 \ 22.8 \ 23.1 \ 21.6 \ 19.5 \ 12.9 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \text{ кВт.}$

- D – години, протягом яких сонячні панелі генерують електроенергію (7:00 - 18:00).

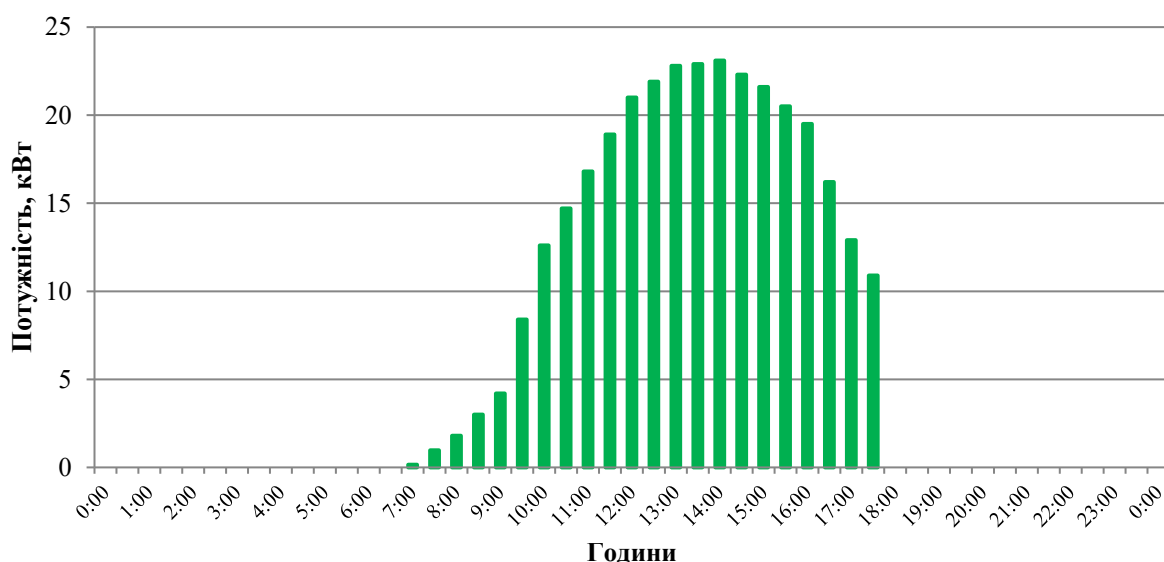


Рисунок 3.2 – Профіль потужності фотоелектричних панелей. Розроблено автором.

- на рисунку 3.3 показано добовий попит споживачів мікромережі.

$\text{consumption} = [2.5 \ 1 \ 2.5 \ 1 \ 1 \ 1.5 \ 5 \ 5 \ 1 \ 3 \ 5 \ 5 \ 6 \ 1 \ 6.2 \ 2.7 \ 2 \ 4.8 \ 4.5 \ 5 \ 5 \ 4 \ 4 \ 2.7]; \text{ кВт}$

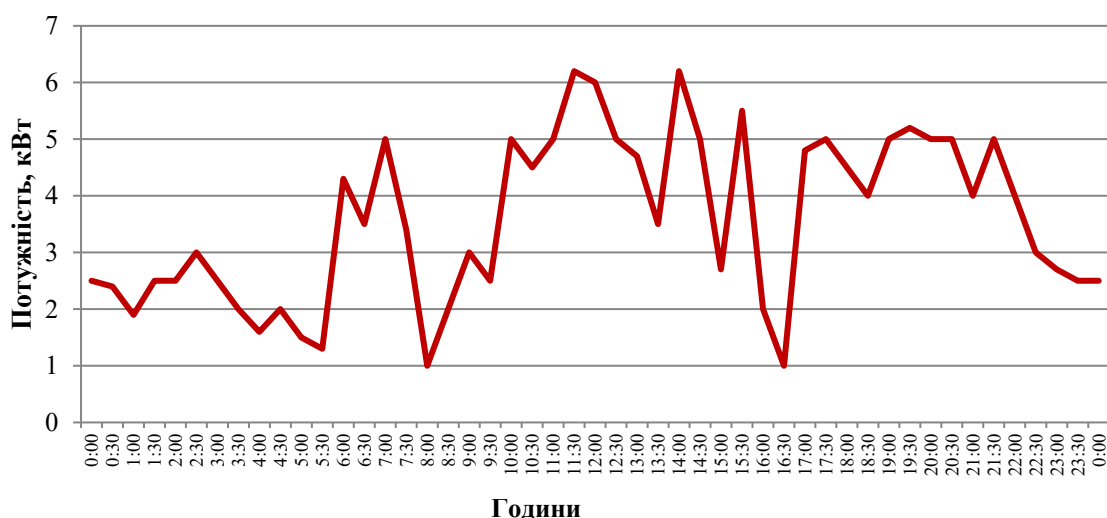


Рисунок 3.3 – Профіль навантаження. Розроблено автором.

Таблиця 3.1 – Погодинні показники виробництва електроенергії сонячними панелями та споживана потужність.

Години	Потужність фотоелектричних панелей, кВт	Споживана потужність, кВт
1:00		1
2:00		2,5
3:00		1
4:00		1
5:00		1,5
6:00		5
7:00	0,15	5
8:00	1,8	1
9:00	4,2	3
10:00	12,6	5
11:00	16,8	5
12:00	21	6
13:00	22,8	1
14:00	23,1	6,2
15:00	21,6	2,7
16:00	19,5	2
17:00	12,9	4,8
18:00	0	4,5
19:00		5
20:00		5
21:00		4
22:00		4
23:00		2,7
0:00		2,5

Таблиця 3.2 – Дані щодо акумулятора

Назва	Максимальна ємність, кВт/год	Початковий стан, кВт/год	Мінімальна ємність кВт/год
BASIC SPLIT B11-ECO ECO	47	40	14,1

2. Цільова функція. Максимізація використання сонячної енергії та мінімізація залежності від загальної мережі електропостачання, зменшення пікових навантажень зранку та ввечері.

3. Обмеження щодо роботи акумулятора.

$$14,1 \leq B(t) \leq 47$$

4. Знаходження оптимального розподілу електроенергії;

4.1 Ініціалізація (початковий стан):

$$B(0) = 40, \text{ кВт/год}$$

4.2 Для кожної години t в діапазоні від 1 до 24:

$$B(1) = \min(\max(40 + 0 - 1(t), \min) \max) = \min(39) \max$$

$$B(2) = \min(\max(39 + 0 - 2,5 \min) \max) = \min(36,5) \max$$

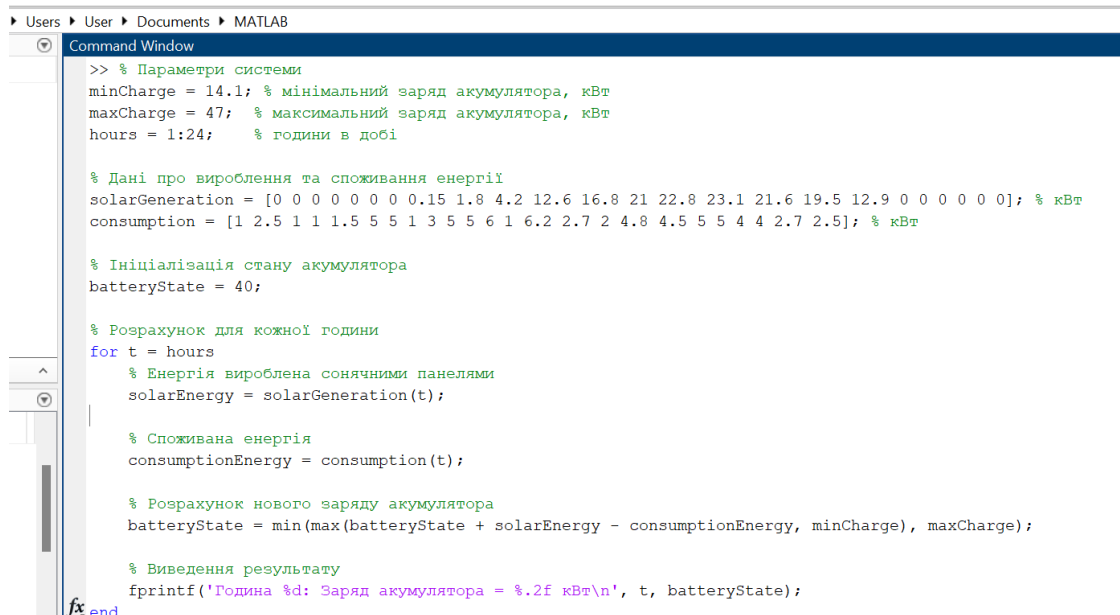
$$B(3) = \min(\max(36,5 + 0 - 1(t), \min) \max) = \min(35,5) \max$$

$$B(4) = \min(\max(35,5 + 0 - 1(t), \min) \max) = \min(34,5) \max$$

$$B(\dots) = \min(\max(B(t-1) + P_{PV}(t) - P_{Load}(t), \min) \max)$$

$$B(24) = \min(\max(26,30 + 0 - 2,7(t), \min) \max) = \min(23,8) \max$$

5. Реалізація DP в MATLAB. На рис. 3.4 представлено код динамічного програмування для MATLAB.



```
>> % Параметри системи
minCharge = 14.1; % мінімальний заряд акумулятора, кВт
maxCharge = 47; % максимальний заряд акумулятора, кВт
hours = 1:24; % години в добі

% Дані про вироблення та споживання енергії
solarGeneration = [0 0 0 0 0 0 0 0.15 1.8 4.2 12.6 16.8 21 22.8 23.1 21.6 19.5 12.9 0 0 0 0 0]; % кВт
consumption = [1 2.5 1 1 1.5 5 5 1 3 5 5 6 1 6.2 2.7 2 4.8 4.5 5 5 4 4 2.7 2.5]; % кВт

% Ініціалізація стану акумулятора
batteryState = 40;

% Розрахунок для кожної години
for t = hours
    % Енергія вироблена сонячними панелями
    solarEnergy = solarGeneration(t);

    % Споживана енергія
    consumptionEnergy = consumption(t);

    % Розрахунок нового заряду акумулятора
    batteryState = min(max(batteryState + solarEnergy - consumptionEnergy, minCharge), maxCharge);

    % Виведення результату
    fprintf('Година %d: Заряд акумулятора = %.2f кВт\n', t, batteryState);
end
```

Рисунок 3.4 – Код для розв’язання оптимізаційної задачі за допомогою динамічного програмування. Розроблено автором на основі програмного забезпечення MATLAB.

В цьому коді використовуються дані про вироблення сонячної енергії та споживання енергії для кожної години в добі. Розрахунок виконується за допомогою рекурентної формули для акумулятора. Результат виводиться для кожної години. Алгоритм, може адаптуватися до змін умов, таких як зміни в

сонячній активності, тимчасові зміни в споживанні енергії та інші непередбачені фактори.

Після обчислення для кожної години отримаємо значення $V(t)$ для всіх годин (рис. 3.5). Знайдено оптимальний розподіл енергії. Виведення графіків.

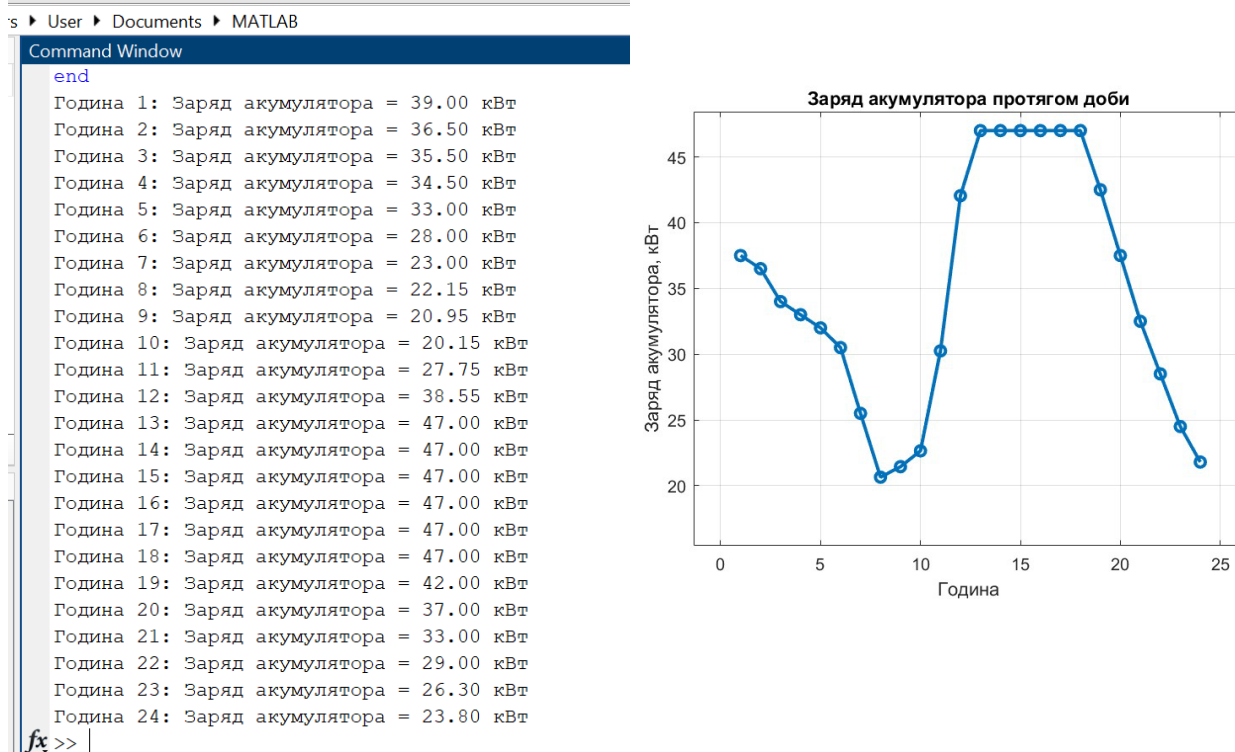


Рисунок 3.5 – Значення $V(t)$ для 24 годинного періоду. Розроблено автором на основі програмного забезпечення MATLAB.

Період 1. З 18:00 до 7:00, коли вихідна потужність з відновлюваних джерел нижча, ніж навантаження. Тому акумулятор вмикається, щоб збалансувати систему.

Період 2. З 7:00 до 18:00, коли потужність відновлюваних ресурсів перевищує навантаження. З 10:00 ранку до 13:00 надлишок енергії в основному використовується для заряджання акумулятора.

Бачимо, що у нашій системі, після задоволення навантаження споживачів та зарядки акумулятора, існує надлишок. Розглянемо реальну економічну складову продажу електроенергії за Законом 9011-д «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» [38] за 0.164 євро/кВт або 6,86 грн/кВт.

Для цього додамо в попередній код деякі змінні (рис. 3.6):

- pricePerKWh – 6,86 грн/кВт – ціна для продажу;
- surplusEnergy – змінна, яка вказує на надлишок електроенергії.
- consumptionEnergy – потужність заряду акумулятора.

```
% Дані про вироблення та споживання енергії
solarGeneration = [22.8 23.1 21.6 19.5 12.9]; % кВт
consumption = [1 6.2 2.7 2 4.8]; % кВт

% Ініціалізація стану акумулятора
batteryState = 40;
totalProfit = 0; % Загальний прибуток

% Розрахунок для кожної години
for t = hours
    % Енергія вироблена сонячними панелями
    solarEnergy = solarGeneration(mod(t-1, numel(solarGeneration)) + 1);

    % Споживана енергія
    consumptionEnergy = consumption(mod(t-1, numel(consumption)) + 1);

    % Розрахунок нового заряду акумулятора
    batteryState = min(max(batteryState + solarEnergy - consumptionEnergy, minCharge), maxCharge);

    % Порахунок надлишку електроенергії та прибутку від його продажу
    % Додавання прибутку до загального прибутку
    profit = (solarEnergy - consumptionEnergy) * pricePerKWh;
    totalProfit = totalProfit + profit;

    % Виведення результату
    fprintf('Година %d: Заряд акумулятора = %.2f кВт, Надлишок = %.2f кВт, Прибуток = %.2f грн\n', t, batteryState, surplusEnergy, profit);
end

% Виведення загального прибутку
fprintf('Загальний прибуток: %.2f грн\n', totalProfit);

Година 13: Заряд акумулятора = 47.00 кВт, Надлишок = 18.90 кВт, Прибуток = 129.65 грн
Година 14: Заряд акумулятора = 47.00 кВт, Надлишок = 17.50 кВт, Прибуток = 120.05 грн
Година 15: Заряд акумулятора = 47.00 кВт, Надлишок = 8.10 кВт, Прибуток = 55.57 грн
Година 16: Заряд акумулятора = 47.00 кВт, Надлишок = 21.80 кВт, Прибуток = 149.55 грн
Година 17: Заряд акумулятора = 47.00 кВт, Надлишок = 16.90 кВт, Прибуток = 115.93 грн
Загальний прибуток: 570.75 грн
>>
```

Рисунок 3.5 – Код для розрахунку надлишку електроенергії та прибутку від його продажу. Розроблено автором на основі програмного забезпечення MATLAB.

Результатом є продаж надлишку в періоди від 13:00 до 17:00 за «зеленим» тарифом, в результаті отримаємо прибуток 570, 75 грн.

6. Системи моніторингу та керування:

- постійний моніторинг роботи системи та вчасне вирішення виниклих проблем;

Кожен об'єкт мікромережі отримує команди від контролера мікромережі та надсилає ключові вимірювання до головного процесора (рис. 3.7).

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

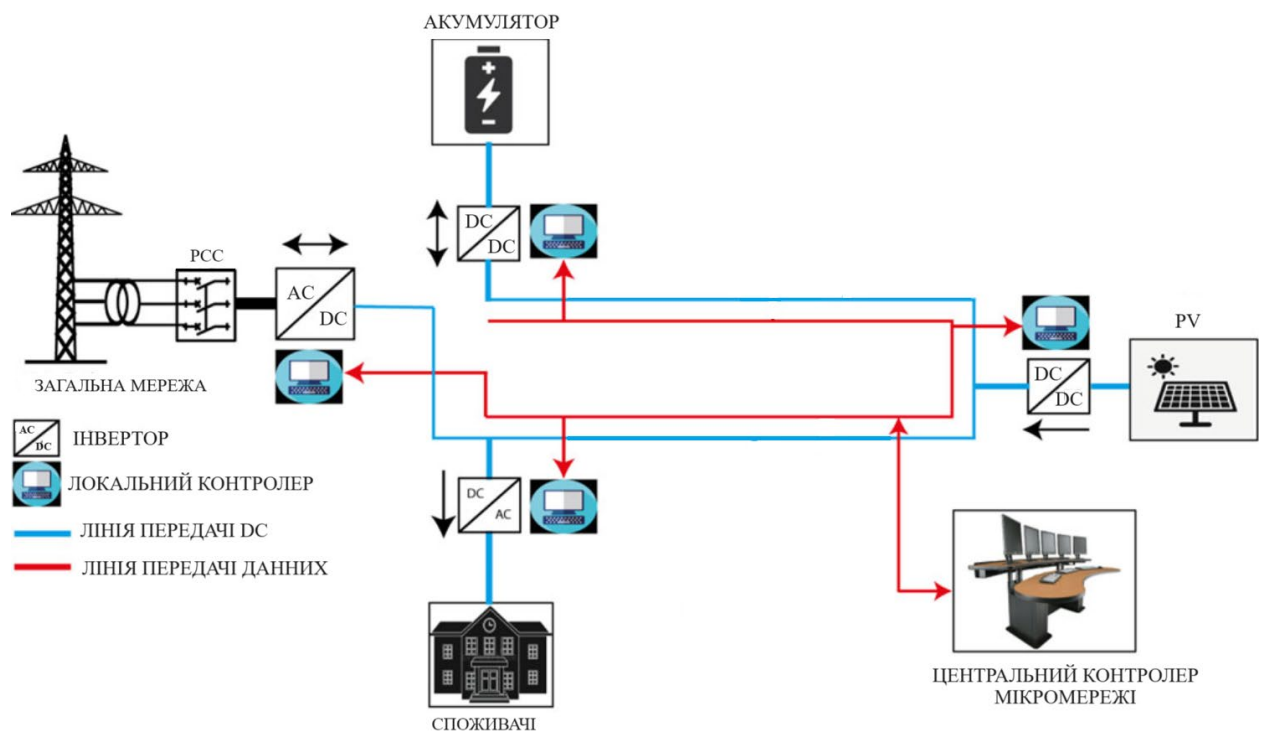


Рисунок 3.7 – Схема системи моніторингу та керування мікромережею. Джерело: розроблено автором на основі програмного забезпечення MATLAB [39].

Центральний контролер керує кожним локальним контролером і вимірюваннями. Локальні контролери в свою чергу збирають інформацію та передають дані на центральний контролер. Централізована система управління дозволяє легко створювати та контролювати систему в режимі реального часу, щоб забезпечити безпечне середовище.

- встановлення системи спостереження за реальним станом мікромережі та використання отриманих даних для постійної корекції параметрів алгоритму;

Моніторинг та контроль акумулятора у мікромережах у режимі реального часу можна забезпечити шляхом інтеграції інтелектуальних лічильників та інших пристроїв моніторингу та контролю.

- вдосконалення оптимізаційних стратегій з урахуванням змін у споживанні енергії та технічних параметрах.

Алгоритм реалізовано в MATLAB і використовується для дослідження запропонованої мікромережі з фотоелектричними панелями та батареями.

Рішення та аналіз надано для одноденного періоду зі змінним навантаженням і відновлюваною енергією.

Отже, оптимізація власної мікромережі СЕС базується на алгоритмі динамічного програмування, що дозволяє оптимізувати роботу системи в реальному часі, реагуючи на зміни в умовах навколишнього середовища та забезпечуючи оптимальне використання сонячної енергії в мікромережі.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена глибокому дослідженню методів та принципів оптимізації мікромереж. З метою досягнення поставлених завдань були ретельно проаналізовані теоретичні основи та складові мікромереж, враховані сучасні тенденції їх розвитку. Особлива увага була приділена аналізу шляхів та принципів оптимізації роботи мікромереж.

1) Мікромережа — це самодостатня енергетична система, яка обслуговує окремих споживачів на віддалених об'єктах і у сільських територіях.

Розумні мережі важливі з кількох причин:

- покращують енергоефективність, відстежуючи та контролюючи потік електроенергії, розумні мережі можуть зменшити витрати енергії та заощадити кошти споживачів;
- підвищують надійність, адже здатні виявляти проблеми та реагувати на них швидше, ніж традиційні мережі, що може допомогти запобігти збоям;
- дозволяють інтегрувати відновлювані джерела енергії, в тому числі можуть зберігати та управляти відновлюваною енергією, щоб її можна було використовувати, коли це необхідно;
- роблять мережу більш пружною, тобто здатні протистояти екстремальним погодним умовам і кібератакам, що може допомогти зберегти живлення під час надзвичайних ситуацій.

2) В даний час формат мікромереж розвивається переважно в Північній Америці. Їх переваги підтверджуються низкою прикладів впроваджень, насамперед, в американських містах на Алясці. З безперервним розвитком технологій мікроенергетичних мереж і сильною підтримкою урядів, у майбутньому буде ширший спектр застосувань; тому дослідження з оптимізації роботи мікроенергетичних мереж мають певну теоретичну цінність і значення.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) Дослідники розробили різні техніки та методи для оптимальної роботи мікромереж. Найбільш практичні методи оптимізації щодо застосування в мікромережах: математичне програмування та лінійна оптимізація; метаевристичні алгоритми; динамічне програмування; багатоцільова оптимізація; модель прогнозуючого управління; управління зберіганням енергії; моніторинг та управління в режимі реального часу.

4) Досліджено та розглянуто алгоритм оптимізації, що ґрунтується на параметрах навантаження та роботі акумуляторної системи, що є важливим кроком у вдосконаленні функціональності мікромереж. Проведений аналіз цього алгоритму в контексті мікромережі надає ключові підходи та можливості для оптимізації роботи системи.

Оптимальним варіантом є гібридна мікромережа, яка включає сонячні панелі та акумулятор. PV діє як основне джерело енергії, а батарея вважається резервним джерелом енергії. Гібридна система розроблена таким чином, що потреба в потужності навантаження задовольняється в будь-який момент часу. Завдяки системі накопичення балансуються піки та спади навантаження.

Загалом, розробка принципів оптимізації мікромереж - це безперервний процес, рушійною силою якого є технологічний прогрес, зміни в енергетичному просторі та зростаюче значення сталості та стійкості енергосистем. Постійний розвиток методів оптимізації допоможе розкрити весь потенціал мікромереж у формуванні майбутнього розподілу енергії.

Завдяки правильному проектуванню і управлінню, мікромережі можуть сприяти досягненню екологічних та соціальних цілей, сприяючи сталому розвитку та покращенню якості життя.

Важливість врахування сучасних тенденцій розвитку технологій та визначення оптимальних шляхів впровадження інновацій у функціонування мікромереж підкреслює актуальність даної роботи.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A Review of Optimization of Microgrid Operation. K. Gao et al. Energies. 2021. Vol. 14, no. 10. P. 2842. URL:<https://doi.org/10.3390/en14102842>
2. Mumtaz F., Bayram I. S. Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. Energy Procedia. 2017. Vol. 107. P. 94–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.137>
3. Microgrids: Experiences, barriers and success factors / M. Soshinskaya et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40. P. 659–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>
4. Чемерис О. А. Задачі технології блокчейн для електричних мікромереж. *Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*. № 1 (61). С. 102-106
5. Cagnano A., De Tuglie E., Mancarella P. Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. Applied Energy. 2020. Vol. 258. P. 114039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114039>.
6. Department of Energy: How Microgrids Work. June 17. URL: <https://nccleantech.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/10/Resilient-Energy-Systems-Guidance-Doc-FINAL.pdf>
7. Predictive Control for Microgrid Applications: A Review Study / A. Villalon et al. Energies. 2020. Vol. 13, no. 10. P. 2454. URL: <https://doi.org/10.3390/en13102454>
8. Al-Ismail F. S. DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 36154–36172. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3062840>
9. Pesin, Michael (2017). «U.S. Department of Energy Electricity Grid Research and Development» presentation at the American Council of Engineering Companies, Environment and Energy Committee Winter Meeting. 9 February.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. How Microgrid Control Technology Is Driving Innovation in Energy Resiliency for the Department of Defense. Siemens Government Technologies | Home Page. URL: <https://www.siemensgovt.com/insights/articles/microgrid-control-technology-dod>
11. Microgrids Engineering, Economics, & Experience. eCIGRE - Powering your expertise. eCIGRE. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/635-microgrids-1-engineering-economics-experience.html>
12. Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review / B. Arbab-Zavar et al. Energies. 2019. Vol. 12, no. 5. P. 840. URL: <https://doi.org/10.3390/en12050840>
13. Kumar A., Nageswara M. Role of Energy Storage Systems in the Micro-Grid Operation in Presence of Intermittent Renewable Energy Sources and Load Growth. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119760375.ch8>
14. Microgrid Market - Size, Report & Research Analysis. Market Research Company - Mordor Intelligence. URL : <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/micro-grid-market>
15. S. L. Chartier et al. Microgrid Emergence, Integration, and Influence on the Future Energy Generation Equilibrium—A Review. Electronics. 2022. Vol. 11, no. 5. P. 791. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11050791>
16. Microgrids. Center for Climate and Energy Solutions. URL: <https://www.c2es.org/content/microgrids/>
17. Why microgrids are the future of energy management [Електронний ресурс]. – URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:70ce64a1-78c0-4895-9c87-e86f249b713c/micgrogrid-infographic-en.pdf>
18. Каплун В. В., Кравченко О. П., Василенко В. В. та ін. Аналіз методів оптимізації мікроенергетичних систем (MicroGrid) на основі джерел розподіленої генерації. *Вісник КНУТД. Серія «Технічні науки»*. 2015. № 2, С. 5–16.

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52–67.
20. Microgrid System. Aston Research Explorer. URL: <https://research.aston.ac.uk/en/publications/microgrid-system>
21. Остапчук О. В., Шевченко І. В. Використання гібридних систем на основі відновлюваних джерел в мікромережі: огляд. *Відновлювана енергетика*. 2022. Т. 4. С. 9–25.
22. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 травня 2021р.). К.: Інтерсервіс, 2021. 1104 с.
23. A review of microgrid development in the United States – A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools / W. Feng et al. *Applied Energy*. 2018. Vol. 228. P. 1656–1668. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.096>
24. Innovative Hochvolt Energie- & Stromspeicher Systeme - xelectrix Power GmbH. URL: <https://www.xelectrix-power.com/home/>
25. The role of natural gas in smart grids.F. W. Bliet et al. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2011. Vol. 3, no. 5. P. 608–616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.07.008>
26. What are microgrids – and how can they help with power cuts? World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/what-are-microgrids-renewable-power/>
27. Rahman M. A., Rahman I., Mohammad N. Demand Side Residential Load Management System for Minimizing Energy Consumption Cost and Reducing Peak Demand in Smart Grid. 2020. Dhaka, Bangladesh. P. 376-381.
28. Al-Agtash S. et al., Microgrid Environmental Impact. 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), Gammarth, Tunisia. 2020, pp. 674-677

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. Tankard C. The security issues of the Internet of Things. Computer Fraud & Security. 2015. Vol. 2015, no. 9. P. 11–14. URL: [https://doi.org/10.1016/s1361-3723\(15\)30084-1](https://doi.org/10.1016/s1361-3723(15)30084-1)
30. Towards Optimal Management in Microgrids: An Overview / A. O. Topa Gavilema et al. Energies. 2021. Vol. 14, no. 16. P. 5202. URL: <https://doi.org/10.3390/en14165202>
31. A Flexible AC Distribution System Device for a Microgrid / K. T. Tan et al. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28, no. 3. P. 601–610. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2013.2260162>
32. Antonis G., Nikos D. Centralized control for optimizing microgrids operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. (2008). 23 (1). P. 241–248.
33. A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids / N. Salehi et al. IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 15935–15955. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3142810>
34. Suchetha C., Ramprabhakar J. Optimization Techniques for Operation and Control of Microgrids. Review. Journal of Green Engineering. 2018. Vol. 8, no. 4. P. 621–644. URL: <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.847>
35. Кузнєцов М. П., Лисенко О. В., Мельник О. А. Оптимальне регулювання локальної енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика 52 надійність та енергоефективність. 2021. № 1 (2). С 52-61.
36. Goutham B., Anoop H. A. A review on issues, challenges and various optimization techniques in microgrid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 937. P. 012029. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/937/1/012029>
37. W. Fan et al. A two-stage optimal scheduling model of integrated energy system based on CVaR theory implementing integrated demand response. Energy. 2022. P. 125783. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125783>

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

38. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України від 28.04.2023 р. № 9011-д

39. A. J. Albarakati et al Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1097858>

					02.15. EE2226.KPM.2023 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		