

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.311.1

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

« _____ » _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Розроблення математичної моделі розпізнавання локальних станів енергоспоживання в Microgrid»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Осипенко В.В.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Рудаков В.Ю.
(ПІБ)

КИЇВ – 2024

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Рудаков Василь Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Розроблення математичної моделі розпізнавання локальних станів енергоспоживання в Microgrid» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 26.09.2024р. № 1666

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2024.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: характеристики архітектури Microgrid, типи накопичувачів енергії, джерела генерації, режими роботи системи, профілі енергоспоживання, дані про генерацію та погодні умови, а також економічні показники впровадження, правила технічної експлуатації.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: дослідження впливу архітектури Microgrid на ефективність, моделювання систем накопичення енергії, методів розпізнавання локальних станів споживання, алгоритмів енергоменеджменту в умовах невизначеності, економічної й екологічної оцінки систем, а також оптимізації інтегрованих методів управління.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «26» вересня 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____

(підпис)

Осипенко В.В. _____

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Рудаков В.Ю. _____

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 64 стор., 7 табл., 5 рис., 24 формул, 31 літературних джерел.

У роботі розглядаються сучасні системи MicroGrid, які є інноваційними рішеннями для децентралізованого управління енергетичними ресурсами. Основна увага приділяється типам навантажень у MicroGrid, таким як житлові, комерційні, промислові об'єкти та зарядні станції для електромобілів, а також їх областям застосування. Аналізується використання технологій Інтернету речей (IoT) для автоматизації управління локальними мережами електропостачання, збору даних та створення систем класифікації станів мереж.

Значну увагу приділено розробці моделі енергетичного балансу, що базується на регресійних методах прогнозування та штучних нейронних мережах, включаючи LSTM.

Дослідження індуктивного моделювання складних систем зосереджується на застосуванні передових підходів до аналізу та прогнозування характеристик динамічних систем, таких як MicroGrid. Індуктивне моделювання дозволяє виявляти приховані закономірності у великих масивах даних, що особливо важливо для кластеризації локальних станів енергетичних систем. У рамках цього підходу виконано класифікацію станів мікромереж за різними параметрами, такими як рівень споживання енергії, навантаження, генерація відновлюваної енергії та поточний енергетичний баланс.

Завдання кластеризації включає формування груп локальних станів системи, що мають схожі характеристики, для розробки ефективних стратегій енергоменеджменту. Індуктивний підхід забезпечує адаптивність кластеризації до змінних умов та дозволяє виявляти нові класи станів у реальному часі. Особливу увагу приділено визначенню критеріїв якості кластерного аналізу. Зокрема, враховано такі критерії, як щільність кластерів, відстань між центрами

кластерів, а також зв'язок з цільовими ознаками, такими як мінімізація втрат енергії або оптимізація економічних показників.

Динамічний енергоменеджмент у мікромережах ґрунтується на аналізі кластерів та прогнозуванні змін станів. Використання індуктивних моделей у цій сфері дозволяє розробляти сценарії управління, що враховують як поточні, так і прогнозовані умови. Це включає вибір оптимального режиму роботи генераторів, балансування між виробництвом та споживанням, а також інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Наведено методики моделювання сценаріїв локальної полігенерації та розрахунку економічних показників, таких як LCOE (собівартість електроенергії). Отримані результати спрямовані на підвищення ефективності управління мікромережами, оптимізацію ресурсів та забезпечення сталого розвитку енергетики.

Ключові слова: Мікрогрід, енергоефективність, економічні показники, LCOE, управління енергією, відновлювані джерела енергії, системи накопичення енергії, архітектура мікрогрід, скорочення викидів, сонячна енергетика.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНІВ У MICROGRID	11
1.1. Системи MICROGRID.....	11
1.2. Основні типи навантажень сучасних MICROGRID	13
1.3. Області застосування MicroGrid	16
1.4. Використання IoT технологій для управління локальними мережами електропостачання	18
Висновки до розділу 1.....	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У MICROGRID.....	22
2.1. Збір даних та створення системи класифікації локальних станів.....	22
2.2. Модель енергетичного балансу	23
2.3. Використання регресійних методів прогнозування	25
2.4. Моделювання на основі нейронних мереж та LSTM	27
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ МІКРОМЕРЕЖ ЛОКАЛЬНОЇ ПОЛІГЕНЕРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ТА ІНДУКТИВНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ	32
3.1. Індуктивне моделювання складних систем.....	32
3.2. Критерії якості в індуктивному кластер-аналізі з цільовою ознакою	33

3.3. Моделювання сценаріїв динамічного енергоменеджменту з використання мікромереж локальної полігенерації.	37
3.4. Індуктивне моделювання при розв’язанні задачі кластеризації	42
Висновки до розділу 3.....	47
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІКРОГРІД.	49
4.1. Енергетичні показники мікрогрід.....	49
4.2. Зниження викидів і їх грошова оцінка	51
4.3. Основні економічні показники: LCOE	52
Висновки до розділу 4.....	52
РОЗДІЛ 5. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	54
5.1. Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж.....	54
5.2. Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі.....	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ	–	Відновлювальні джерела енергії
МГ	–	Мікромережа
РЕС	–	Розподілення енергетичних ресурсів
СНЕ	–	Система накопичення енергії
ММГ	–	Мережа МГ
ПЕС	–	Повністю електричні судна
МММГ	–	Мульти-мікроенергетичні МГ
МСНЕ	–	Мобільні СНЕ
СГ	–	Синхронний генератор
ВСГ	–	Віртуальний синхронний генератор
ВТМП	–	Відстеження точки максимальної потужності
ОСМ	–	Обмежувач струму замикання
ТТ	–	Твердотільний трансформатор
НТУ	–	Наньянський технологічний університет
МПЖ	–	Мікро-парк живлення
ЕТЗ	–	Електрифіковані транспортні засоби
МТВКП	–	Мікротурбінні та вентиляційні кондиціонування повітря
РГ	–	Розподілені генератори
СПЕ	–	Системи перетворення енергії
ДБЖ	–	Джерело безперебійного живлення
ККД	–	Коефіцієнт корисної дії
ОВПБ	–	Окислювально-відновна проточна батарея
ПЕ	–	Паливний елемент
СК	–	Супер-конденсатори
ДРЧП	–	Диференціальне рівняння з частинними похідними

ГР	–	Глибина розряду
ГЗ	–	Глибина заряду
ЗДР	–	Звичайне диференціальне рівняння
АДП	–	Адаптивне динамічне програмування
ГНП	–	Глибоке навчання з підкріпленням
ФРЙ	–	Функція розподілу ймовірності
ПСЗВ	–	Приблизне середнє значення вибірки
ЗЦ-КПДП	–	Змішано-ціле конічне програмування другого порядку
СУЖ	–	Система управління живленням
СЕС	–	Сонячна електростанція

ВСТУП

Сучасні енергетичні системи перебувають у стані трансформації через зростаючий попит на екологічно чисті та економічно вигідні джерела енергії. У цьому контексті концепція MicroGrid (мікромережі) набуває все більшого значення. MicroGrid є локальною енергетичною системою, яка може працювати як у складі централізованої мережі, так і автономно, забезпечуючи високу гнучкість у виробництві, розподілі та споживанні енергії. Завдяки використанню відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, мікромережі сприяють зниженню викидів парникових газів, що відповідає глобальним цілям сталого розвитку.

Основні типи навантажень у сучасних MicroGrid включають житлові, комерційні, промислові об'єкти, а також зарядні станції для електромобілів. Використання технологій Інтернету речей (IoT) в управлінні такими мережами дозволяє створювати інтелектуальні системи, які автоматизують процеси збору даних, моніторингу станів, прогнозування енергоспоживання та балансування попиту та пропозиції.

Одним із ключових завдань є розробка моделей енергетичного балансу, які включають регресійні методи прогнозування та інструменти штучного інтелекту, такі як нейронні мережі та моделі довготривалої пам'яті (LSTM). Ці підходи дозволяють підвищити точність прогнозів і ефективність управління енергетичними ресурсами. Крім того, індуктивне моделювання складних систем, зокрема кластеризація локальних станів, забезпечує розуміння динамічних характеристик MicroGrid та їх адаптацію до змінних умов.

Оцінка енергетичних показників, таких як зниження викидів CO₂ та економічна ефективність (зокрема показник LCOE — собівартість електроенергії), є важливим кроком у плануванні та впровадженні мікромереж. Крім того, моделювання сценаріїв динамічного енергоменеджменту з

використанням локальної полігенерації сприяє оптимізації ресурсів і підтримці надійності енергопостачання.

У даній роботі розглядаються основні аспекти функціонування мікромереж, їх області застосування, використання сучасних технологій для управління, а також інструменти аналізу та прогнозування, що дозволяють вирішувати ключові задачі динамічного енергоменеджменту.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНІВ У MICROGRID

1.1. Системи MICROGRID

Система MicroGrid призначена, для легкого та надійного забезпечення зв'язку з усіма розподіленими енергетичними ресурсами (РЕР), моніторингу та управління обладнанням. Зв'язок підтримується як через дротові так і бездротові лінії зв'язку. MicroGrid являє собою масштабоване рішення, яке може використовуватись за декількома сценаріями, від окремих будівель до цілих громад. Вона може оснащатися гнучкими засобами зв'язку, які дозволяють контролювати і управляти всіма РЕР даної системи.

Система MicroGrid об'єднує альтернативні джерела енергії (фотогенератори, вітроустановки), акумуляторні батареї, традиційні джерела енергії (дизельні генератори, паливні елементи) та керовані навантаження для забезпечення енергетичних потреб споживачів.

Важливими задачами системи є забезпечення економії енергії, в тому числі і роботу всієї системи в автономному режимі.

Для оптимізації та контролю в системі використовуються алгоритми динамічного управління, які контролюють ресурси. Кожен РЕР контролюється і керується локально, але його робота координується через центральну систему керування. Алгоритми керування працюють в режимі реального часу для оптимізації навантаження мережі та забезпечення надійного енергопостачання енергії [30,31].

Головні принципи побудови системи MicroGrid наступні:

1. Використання теорії фракталів.

Фрактали є складними системами, створені шляхом повторення простих моделей, подібних до неї самої, на всіх рівнях. MicroGrid побудовано на базі поняття фракталів з вузлів і з'єднань, де кожен вузол включає в себе локально оптимізовані РЕР і навантаження. Кожен вузол незалежний і здатний працювати як автономно, так і в координації з макро-системами. Ця концепція спрощує побудову системи, так як електрична мережа складається з комбінації стабільних і оптимізованих блоків, які працюють в координації. Така архітектура може бути розширена окремими компонентами, які утворюватимуть все більш і більш складні і більші системи.

2. Розподілена ієрархія

Масштабованість системи забезпечується програмним забезпеченням на кожному із рівнів мережі. Кожен вузол включає в себе логіку, і здатен працювати автономно або ж за допомогою сигналів централізованого управління. Вихід за межі традиційної командно-контрольної архітектури існуючої електричної мережі, дозволяє вирішувати все складніші проблеми контролю та оптимізації. Розподілені системи забезпечують інтеграцію і координацію значно більшої кількості РЕР, що важко реалізувати через централізовані системи.

Одним з найпоширеніших застосування MicroGrid є реалізація розумних будинків та будівель. Кожен розумний будинок містить різноманітний набір керованих енергетичних ресурсів, в тому числі сонячні панелі, акумуляторні батареї та регульовані навантаження. MicroGrid системи можуть використовувати власний комунікаційний протокол, заснований на методі публікації-підписки в системі обміну повідомленнями. Для забезпечення зв'язку, центральний координатор і кожен РЕР додаються в якості учасників в системі. Кожен учасник використовує систему, щоб опублікувати свій статус і підписатися на повідомлення від інших учасників, які потім можуть бути

використані. Це створює слабо зв'язану і масштабовану систему, де РЕР можуть бути додані або вилучені без істотного впливу на інші частини системи [3].

1.2 Основні типи навантажень сучасних MICROGRID

Завдяки технологічному прогресу та зростанню використання електроенергії, споживачі електроенергії стають дедалі різноманітнішими як за рівнем потужності, так і за характером роботи. Зокрема, збільшується кількість електроприймачів, які відрізняються тривалістю роботи: вони можуть функціонувати в короткочасному, повторно-короткочасному, тривалому або переривчасто-тривалому режимах [23,24].

Microgrid, що включають різні типи ЕТК-Smart, зазвичай працюють у умовах обмеженої потужності вхідного джерела та з "непередбачуваним" характером навантажень. Такі навантаження можуть випадково змінюватися за активною потужністю та типом – бути одно- або трифазними, збалансованими або незбалансованими, лінійними або нелінійними. Несиметрія та гармонічні спотворення напруги можуть створювати серйозні проблеми для обладнання, як-от вібрація, перенапруження чи перегрів.

Типи навантажень ЕТК-Smart класифікуються згідно з наявними підходами до класифікації електроприймачів. Під класифікацією зазвичай розуміють поділ електроспоживачів за певними ознаками або їх комбінаціями (наприклад, потужність, напруга, функціональне призначення). Через широке застосування електроенергії нині відсутня універсально прийнята класифікація електроприймачів.

Характеристики електроприймачів можна розглядати як функціональну залежність між двома або більше параметрами системи. Для традиційних споживачів електроенергії за тривалістю роботи виділяють такі режими: короткочасний, повторно-короткочасний, тривалий і переривчасто-тривалий. У

короткочасному режимі періоди роботи з незмінним навантаженням (t_p) чергуються з паузами у роботі (t_0).

Типи індивідуальних найбільш поширених графіків навантажень наведено на рис. 1.1

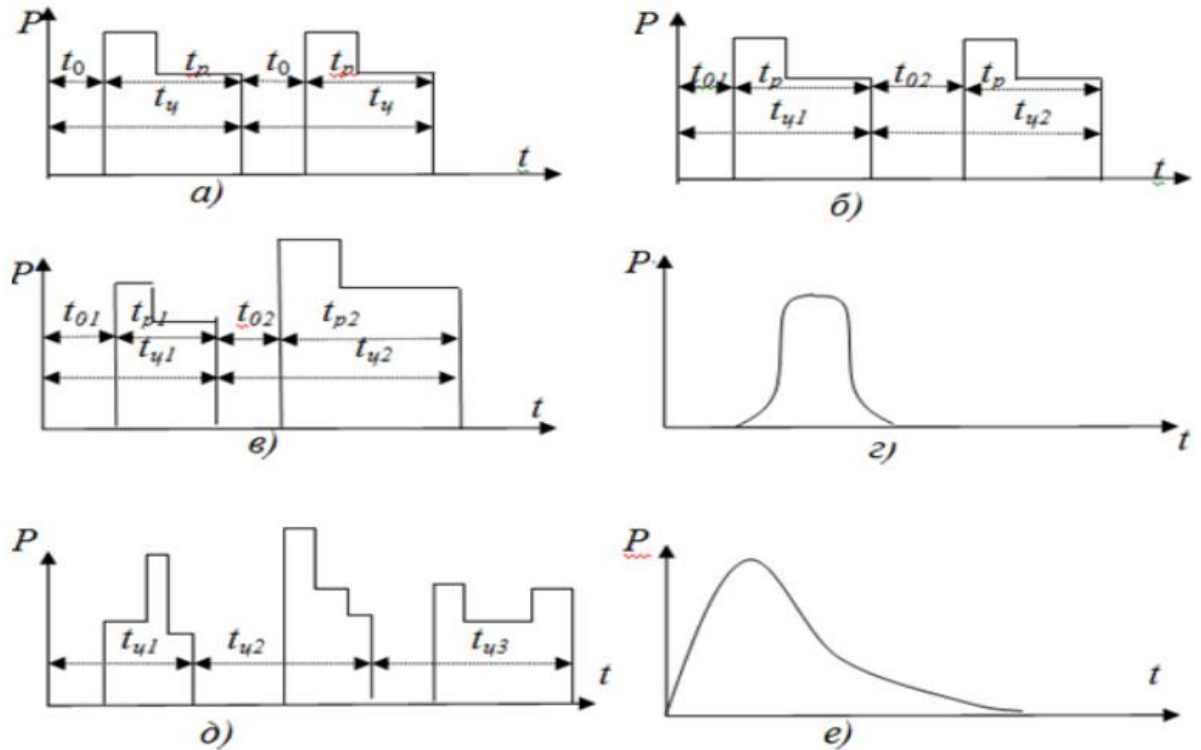


Рисунок 1.4 – Індивідуальні графіки навантажень: а – періодичний; б – циклічний; в – нециклічний; г – аперіодичний; д – нерегулярний; е – імпульсний.

Споживачів навантажень, що використовують різні види нелінійних навантажень, можна умовно поділити на три групи

Перша група включає промислових споживачів, основними нелінійними навантаженнями яких є трифазні асинхронні двигуни з регульованою швидкістю обертання за допомогою пристроїв електронної енергетики (ПЕЕ), установки для дугового зварювання та люмінесцентні лампи [1, 2].

До другої групи належать споживачі, основне нелінійне навантаження яких становлять однофазні джерела живлення та системи електроосвітлення з використанням люмінесцентних ламп високого й низького тиску. Це офісні будівлі, навчальні заклади та підприємства агропромислового комплексу (АПК), які активно застосовують електроосвітлення як невід'ємну частину виробничого процесу. У таких споживачів частка нелінійних навантажень часто перевищує лінійні складові, що призводить до значних спотворень форми споживаного струму. Істотну частину цих спотворень створюють гармоніки третього порядку, які, завдяки ідентичності у всіх фазах, підсумовуються в нейтральному проводі. Це може викликати перегрів нейтральних проводів ліній живлення. Через такі особливості споживачі цієї групи називають офісними або комерційними.

Третя група охоплює житловий сектор. Їхня головна особливість полягає у переважно однофазному нелінійному навантаженні з малою потужністю, яке розосереджене по мережі. Таке навантаження генерує струми з різко несинусоїдною формою, що спричиняє погіршення якості електроенергії. Зростання нелінійного навантаження у житловому секторі створює значні технічні виклики для впровадження фільтрокомпенсуючих пристроїв через їхній розподілений характер і потребу в значних капіталовкладеннях. Найбільш ефективним рішенням для покращення якості електроенергії в цьому випадку є використання гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв, що поєднують активні й пасивні гармонічні фільтри.

Окремий тип навантажень для ЕТК-Smart становлять системи на постійному струмі. Сучасні локальні мережі постійної напруги мають низку переваг. Інтелектуальні мережі такого типу здатні запропонувати постачальникам і споживачам електроенергії широкий спектр функцій. Особливу увагу приділяють створенню потужних знижувальних DC/DC перетворювачів і переходу до повністю постійних систем електроживлення

(англ. Total DC system), що усуває потребу в проміжному перетворенні DC/AC і AC/DC.

Системи постійного струму найбільш затребувані в застосуваннях, де важливими є компактність і ефективність обладнання. Зокрема, фотоелектричні сонячні станції стають популярним вибором для домовласників, які прагнуть зменшити залежність від централізованих електромереж [6].

Зростає інтерес до впровадження мікромереж постійної напруги всередині окремих будівель, кількох споруд або на локальних територіях з метою підвищення енергоефективності. Серед переваг сучасних локальних мереж з ЕТК-Smart постійної напруги виділяють наступне:

- a) загальне перетворення змінної напруги на постійну для всіх навантажень зменшує втрати на 10–20%;
- b) ефективна інтеграція джерел постійної напруги (сонячних батарей, малих вітротурбін, паливних елементів тощо);
- c) простота узгодження джерел постійної напруги, що не потребують синхронізації;
- d) оптимізоване управління навантаженням, включаючи накопичення енергії в періоди надлишкової генерації та її використання під час дефіциту;
- e) підвищена електробезпека мереж постійного струму.

1.3 Области застосування MicroGrid

Системи MicroGrid знаходять застосування в багатьох сферах, де необхідне надійне, автономне та ефективне енергопостачання. Основні області використання включають:

Критично важливі об'єкти до яких відносяться: лікарні, поліцейські відділення, пожежні станції, притулки та інші установи, що забезпечують безпеку і життєдіяльність у кризових ситуаціях [5].

Регіони з несприятливими кліматичними умовами: місцевості, схильні до ураганів, землетрусів, паводків або інших природних катаклізмів, які можуть пошкодити централізовані електромережі. Військові бази та стратегічні об'єкти: забезпечення безперервного енергопостачання на територіях військових частин, заводах оборонного комплексу тощо.

Корпоративні та університетські містечка: організація енергопостачання для кампусів, де потрібно забезпечити надійну роботу освітніх і дослідницьких закладів.

Промислові зони та виробництва: використання у виробничих кластерах, які мають високі вимоги до стабільності та якості електропостачання.

Житловий сектор і міська інфраструктура: автономні мікромережі для житлових районів, що зменшують залежність від центральних мереж і покращують якість енергопостачання.

Об'єкти відновлюваної енергетики: інтеграція сонячних електростанцій, вітротурбін, паливних елементів та інших джерел відновлюваної енергії.

Транспортна інфраструктура: електропостачання портів, залізничних станцій, аеропортів та зарядних станцій для електромобілів.

Офісні та комерційні будівлі: мікромережі для бізнес-центрів і торгових комплексів, що дозволяють знизити витрати на електроенергію і підвищити енергоефективність.

MicroGrid забезпечують гнучкість, надійність і стійкість енергопостачання, що робить їх незамінними у сучасних умовах зростання потреб і ризиків в енергетичній сфері [7].

1.4 Використання IoT технологій для управління локальними мережами електропостачання

У роботі [8] запропоновано комплексну систему управління вітровими мікромережами, засновану на технологіях Інтернету речей (IoT). Система збирає дані в реальному часі за допомогою датчиків, що вимірюють такі параметри, як швидкість вітру, вихідна потужність, температура, вологість і стан батарей. Зібрані дані передаються на хмарну платформу, де вони зберігаються та аналізуються. Це забезпечує ефективне управління великими обсягами інформації та масштабованість системи.

Аналіз даних виконується з використанням передових алгоритмів управління та прогнозувальної аналітики, що дозволяє точно прогнозувати попит і пропозицію енергії. Робота мікромережі коригується в реальному часі для досягнення балансу між виробництвом і споживанням енергії, що сприяє оптимізації управління ресурсами та сталому використанню енергії. Прогнозна аналітика також допомагає передбачати зміни попиту, дозволяючи проактивно регулювати роботу мікромережі.

Система гарантує надійність і безпеку, забезпечуючи виявлення та діагностику несправностей у реальному часі. Завдяки методам машинного навчання та штучного інтелекту вона може аналізувати дані для виявлення потенційних помилок і своєчасного впровадження коригувальних заходів. У разі несправностей система надсилає сповіщення операторам, дозволяючи швидко реагувати та ефективно управляти мікромережею.

Робота [10] пропонує інтелектуальну систему управління енергією для вітрових мікромереж на основі IoT. Вона використовує датчики для збору інформації про швидкість вітру, потужність, температуру, вологість і стан акумуляторів. Зібрані дані передаються на хмарну платформу для подальшого аналізу за допомогою методів машинного навчання та статистичного аналізу.

Це дозволяє прогнозувати попит і пропозицію енергії та оптимізувати управління мікромережею.

Особливістю системи є використання бездротової сенсорної мережі (WSN), яка забезпечує моніторинг стану та продуктивності вітрових турбін у реальному часі. Це сприяє ранньому виявленню несправностей, а у разі їх виникнення система оперативно надсилає сповіщення, дозволяючи швидко вживати заходів для їх усунення.

Крім того, система має інтерфейс користувача, що забезпечує віддалений контроль і моніторинг роботи мікромережі. Інтерфейс відображає інформацію про виробництво та споживання енергії, стан турбін і акумуляторів у режимі реального часу. Очікується, що впровадження цієї системи покращить продуктивність і продовжить термін служби вітрових мікромереж, зводячи до мінімуму час простою та максимізуючи виробництво енергії.

У роботі [15] запропоновано систему управління енергією для мікромереж вітрових електростанцій з використанням технологій Інтернету речей (IoT). Основний акцент зроблено на виявленні та діагностиці несправностей у реальному часі, а також на застосуванні хмарних обчислень для зберігання та обробки даних. Зібрані сенсорами дані передаються на хмарну платформу, де вони аналізуються за допомогою алгоритмів машинного навчання та розширеної аналітики. Це дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз і управління мікромережею в реальному часі, забезпечуючи ефективніше управління енергією.

Однією з ключових особливостей є використання гібридної системи управління енергією, яка поєднує вітрову турбіну з акумуляторними батареями. Батареї забезпечують резервне живлення при низькій швидкості вітру та слугують сховищем для надлишкової енергії, виробленої під час високих вітрових навантажень. Система включає стратегію управління, яка підтримує рівень заряду акумуляторів у визначених межах і водночас задовольняє

енергетичні потреби мікромережі. Таке поєднання підвищує надійність і стабільність системи, а також зменшує загальні витрати на енергетичне управління.

У роботі [20] розроблено інтелектуальну систему управління вітровою енергією для мікромереж на основі IoT. Вона складається з трьох основних компонентів: датчиків, хмарної платформи та алгоритмів керування. Датчики збирають інформацію про швидкість вітру, потужність, температуру та вологість, передаючи її на хмарну платформу. Хмарна платформа забезпечує зберігання даних, аналіз у реальному часі та можливості прогнозованого обслуговування.

Інновація цієї системи полягає у використанні алгоритмів керування, заснованих на машинному навчанні, які дозволяють прогнозувати попит і пропозицію енергії, адаптуючи роботу мікромережі до зовнішніх умов. Алгоритми навчаються на історичних даних мікромережі, враховуючи погодні умови та інші фактори. Другим важливим аспектом є застосування аналітики великих даних, що дозволяє оптимізувати управління енергією. Система здатна аналізувати великі обсяги даних, зокрема історію споживання та генерації енергії, погодні показники та іншу релевантну інформацію, для підвищення ефективності роботи мікромережі.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено огляд сучасних архітектур мікрогрід, які є важливими компонентами енергетичних систем майбутнього. Системи MicroGrid демонструють високу ефективність у забезпеченні надійного енергопостачання навіть у складних умовах. Їхня гнучка архітектура дозволяє інтегрувати різні джерела енергії, включаючи відновлювані (сонячні батареї, вітротурбіни), традиційні (дизельні генератори) та накопичувальні системи

(акумулятори), для стабільного забезпечення енергетичних потреб. MicroGrid знайшли застосування у критично важливих об'єктах (лікарнях, пожежних станціях), регіонах з несприятливим кліматом, промислових зонах, житлових секторах та навіть у транспортній інфраструктурі. Їхня універсальність робить ці системи актуальними для різних умов і сценаріїв.

Інтеграція IoT-технологій дозволяє збирати та аналізувати дані в реальному часі, що сприяє оптимальному управлінню енергоресурсами. Використання хмарних обчислень, машинного навчання та прогнозної аналітики забезпечує баланс між попитом і пропозицією енергії, підвищуючи енергоефективність системи.

Концепція фрактальної побудови системи забезпечує легке розширення MicroGrid, що дозволяє додавати нові вузли без втрати стабільності чи ефективності. Розподілена ієрархія підвищує адаптивність системи та спрощує її управління навіть у великих мережах.

Використання гібридних систем керування та фільтрокомпенсуючих пристроїв допомагає вирішувати проблеми, пов'язані з нелінійними навантаженнями, гармонічними спотвореннями та асиметрією струму. Це особливо актуально для офісних, промислових і житлових споживачів.

Завдяки інтеграції відновлюваних джерел енергії MicroGrid сприяють зменшенню залежності від викопного палива, що знижує викиди парникових газів і відповідає принципам сталого розвитку.

Використання великих даних та прогнозної аналітики створює нові можливості для вдосконалення системи управління. Розробка інтелектуальних алгоритмів керування та інтеграція новітніх технологій (наприклад, штучного інтелекту) відкриває перспективи для ще більшої ефективності MicroGrid у майбутньому.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У MICROGRID

2.1 Збір даних та створення системи класифікації локальних станів

Збір даних у системах мікрогрід є важливим етапом для моніторингу, аналізу та оптимізації роботи таких енергетичних мереж. Мікрогрід — це автономна або інтегрована з основною мережею енергетична система, що включає різноманітні джерела відновлювальної енергії (сонячні панелі, вітрогенератори), акумулятори, споживачів та пристрої для управління енергоспоживанням [25, 26, 27].

Зазвичай у мікрогрід збираються такі дані: Генерація енергії: Потужність, інтенсивність сонячного випромінювання, напруга та струм на виході сонячних панелей, швидкість вітру, обертання турбін, витрати палива та емісії від генераторів. Акумулятори: Статус заряду та розряду акумуляторів, температура батарей, швидкість заряджання та розряджання. Споживання енергії: Потужність у реальному часі, графіки навантаження та споживання різних пристроїв (освітлення, опалення, кондиціонування). Система управління мікрогрід: Інформація про роботу контролерів, інверторів, автоматичних вимикачів. З'єднання з основною мережею: Статус підключення (автономний чи з'єднаний режим), напруга, частота, потік енергії на вході та виході з мікрогрід.

Для збору цих даних використовуються різні технології: Датчики для вимірювання напруги, струму, температури, вологості, потужності, а також метеорологічні датчики для вимірювання вітру та сонячної радіації. SCADA-системи для автоматизації збору даних і збереження їх для подальшого аналізу.

Інвертори та контролери, які моніторять ефективність перетворення енергії та управління акумуляторами. Модулі комунікацій для передачі даних до центрального сервера або хмарної платформи для аналізу.

Типи зібраних даних можуть бути: Виробництво енергії, споживання, заряд акумуляторів, стан підключення до мережі. Графіки енергоспоживання та виробництва, ефективність системи, аварії. Прогнозування виробництва енергії та навантаження споживачів [11, 13].

Методи збору та обробки даних включають: Безпроводні технології, які забезпечують гнучкий моніторинг та передачу даних. Інтеграція з іншими енергетичними системами для покращення планування та оптимізації. Прогнозування та оптимізація для визначення стратегій енергоспоживання, наприклад, коли заряджати акумулятори чи підключатися до основної мережі. Після збору даних їх можна використовувати для моніторингу та виявлення несправностей в реальному часі, прогнозування виробництва енергії на основі погодних умов, оптимізації роботи системи для максимального використання відновлювальних джерел енергії, оцінки ефективності та покращення роботи мікрогрід.

2.2 Модель енергетичного балансу

Модель енергетичного балансу для мікрогрід — це математичне представлення того, як енергія виробляється, зберігається та споживається в рамках автономної енергетичної системи. Метою моделей є забезпечення оптимального використання енергії та підтримка балансу між виробництвом, зберіганням і споживанням [14].

Енергетичний баланс в мікрогрід можна представити рівнянням, яке включає виробництво, споживання та зберігання енергії:

$$E_{\text{prod}}(t) + E_{\text{grid}}(t) = E_{\text{cons}}(t) + E_{\text{storage}}(t) \quad (2.1)$$

Де, $E_{\text{prod}}(t)$ – енергія, вироблена відновлювальними джерелами (наприклад, сонячними панелями, вітрогенераторами);

$E_{\text{grid}}(t)$ – енергія, що постачається з основної енергетичної мережі (якщо мікрогрід підключений);

$E_{\text{cons}}(t)$ – енергія, спожита споживачами на даний момент часу;

$E_{\text{storage}}(t)$ – енергія, що зберігається або віддається акумуляторами.

Рівняння можна уточнити, додавши різні параметри, які визначають, як енергія переходить між компонентами системи. Виробництво енергії

$$E_{\text{prod}}(t) = P * k \quad (2.2)$$

де P – потужність генеруючої установки,

k – кількість генеруючих установок.

Зберігання енергії, якщо акумулятори заряджаються, енергія надходить від джерела або з основної мережі:

$$E_{\text{charge}}(t) = \min(E_{\text{prod}}(t) - E_{\text{cons}}(t), E_{\text{max storage}} - E_{\text{current storage}}(t)) \quad (2.3)$$

Де, $E_{\text{charge}}(t)$ енергія, що заряджає акумулятор,

$E_{\text{max storage}}$ максимальний рівень заряду

$E_{\text{current storage}}$ поточний рівень заряду акумулятора

Якщо акумулятори розряджаються, енергія передається споживачам або в мережу:

$$E_{\text{discharge}}(t) = \min(E_{\text{storage}}(t), E_{\text{cons}}(t)) \quad (2.4)$$

Мікрогрід може мати динамічні графіки споживання, залежно від потреб споживачів:

$$E_{\text{cons}}(t) = E_{\text{households}}(t) + E_{\text{industry}}(t) \quad (3.4)$$

Де, $E_{\text{households}}(t)$ енергоспоживання в домогосподарствах

$E_{\text{industry}}(t)$ енергоспоживання в промислових об'єктах

2.3 Використання регресійних методів прогнозування

Регресійні методи прогнозування є важливим інструментом для аналізу та прогнозування енергетичних процесів у мікрогрід. Ці методи дозволяють спрогнозувати різноманітні показники, зокрема виробництво енергії від відновлювальних джерел, споживання енергії, стан акумуляторів і багато інших факторів, що допомагає в оптимізації роботи мікрогрід. Основні завдання, де можуть бути застосовані регресійні методи, включають прогнозування виробництва енергії на основі погодних умов, прогнозування навантаження споживачів та оцінку ефективності системи [16, 18].

Лінійна регресія є найбільш базовим і широко використовуваним методом прогнозування, який передбачає залежність між незалежними змінними (наприклад, інтенсивність сонячного випромінювання, швидкість вітру) та залежною змінною (наприклад, виробництво енергії).

Формула лінійної регресії:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3.5)$$

Де, Y — прогнозоване значення (наприклад, потужність, що виробляється сонячними панелями),

X_1, X_2, \dots, X_n — незалежні змінні (погодні фактори, історичні дані про виробництво тощо),

β_0 — вільний коефіцієнт,

β_1, \dots, β_n — коефіцієнти для кожної з незалежних змінних,

ε — похибка

Лінійна регресія дозволяє простими засобами моделювати залежності між змінними, що особливо корисно для простих моделей прогнозування.

Множинна лінійна регресія: Якщо є кілька факторів, що впливають на прогнозовану змінну, застосовується множинна лінійна регресія. Наприклад, для прогнозування потужності, що генерується сонячними панелями, можна використовувати різні параметри: інтенсивність сонячного випромінювання, температура, час доби та інші.

Якщо залежність між змінними не є лінійною, можна використовувати поліноміальну регресію для моделювання складних нелінійних зв'язків. Це може бути корисно, наприклад, для прогнозування енергоспоживання в залежності від погодних умов, де ефекти не завжди лінійно змінюються з часом.

Ridge-регресія (регуляризація): У випадках, коли є велика кількість факторів, які можуть взаємно корелювати, ridge-регресія допомагає уникнути перенавчання (overfitting) шляхом додавання штрафу за великий розмір коефіцієнтів. Це корисно при використанні множинних змінних (наприклад, метеорологічних факторів).

Логістична регресія використовується, коли прогнозована змінна є категоріальною (наприклад, клас "високий попит" чи "низький попит"). Вона може бути корисною для передбачення ймовірності того, чи буде мікрогрід потребувати підключення до основної мережі для покриття пикових навантажень.

Застосування регресійних методів у мікрогрід. Метеорологічні дані, такі як інтенсивність сонячного випромінювання та швидкість вітру, можуть бути

використані для прогнозування виробництва енергії сонячними панелями та вітрогенераторами. Множинна лінійна регресія дозволяє побудувати модель, яка враховує вплив різних погодних факторів на потужність.

Споживання енергії може бути залежним від часу доби, погодних умов, рівня заряджання акумуляторів та інших факторів. Регресія допомагає передбачити споживання енергії в різні періоди часу, що дозволяє оптимізувати управління споживанням та виробництвом енергії.

Використовуючи історичні дані про заряд акумуляторів, можна побудувати регресійну модель для прогнозування їхнього стану (заряд/розряд) в майбутньому, що допомагає оптимізувати використання енергії та продовжити термін служби акумуляторів.

Коли енергетичні запаси в мікрогрід виснажуються (особливо вночі або в періоди низької виробничої потужності), модель прогнозування може передбачити ймовірність потреби в енергопостачанні з основної мережі. Логістична регресія може бути використана для визначення ймовірності цього на основі прогнозованого споживання.

2.4 Моделювання на основі нейронних мереж та LSTM

Моделювання мікрогрід за допомогою нейронних мереж, зокрема довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), є перспективним напрямком для прогнозування та оптимізації роботи енергетичних систем. Лінійні та регресійні моделі часто не здатні точно захоплювати складні часові залежності та взаємодії в таких системах, тоді як LSTM дозволяє ефективно обробляти дані з часовими залежностями, що дуже важливо для прогнозування в реальному часі.

LSTM (Long Short-Term Memory) — це тип рекурентної нейронної мережі (RNN), який спеціально спроектований для вирішення проблеми зникання градієнтів, характерної для традиційних RNN. LSTM зберігає інформацію на

тривалий час і дозволяє нейронним мережам вивчати та прогнозувати довгострокові залежності, що робить їх ідеальними для роботи з часовими рядами, як це часто буває у мікрогрід.

У мікрогрід дані мають сильну часову залежність: виробництво енергії від сонячних панелей та вітрогенераторів змінюється залежно від погодних умов, годин доби, сезону тощо. Споживання енергії також залежить від різних факторів: часу, навантаження пристроїв, температури, графіків роботи споживачів і багато інших [16].

LSTM дозволяє використовувати ці залежності для прогнозування майбутнього стану системи, що включає:

1) Прогнозування виробництва енергії: Прогнозування виробництва енергії від відновлювальних джерел, таких як сонячні панелі та вітрогенератори, є важливим завданням у мікрогрід. LSTM може передбачати зміни в інтенсивності сонячного випромінювання чи швидкості вітру, що дозволяє оцінювати, скільки енергії буде вироблено в майбутньому.

2) Прогнозування навантаження: Аналізуючи історичні дані про споживання енергії, нейронні мережі можуть моделювати майбутнє навантаження, враховуючи як денні, так і сезонні коливання в споживанні енергії.

3) Прогнозування стану акумуляторів: LSTM може бути використано для оцінки заряду/розряду акумуляторів в залежності від попиту та виробництва енергії, що дозволяє оптимізувати використання енергії та продовжити термін служби акумуляторів.

4) Прогнозування потреби в енергопостачанні від основної мережі: У разі, коли виробництво енергії в мікрогрід є недостатнім для покриття споживаного навантаження, LSTM може спрогнозувати ймовірність потреби в енергопостачанні з основної мережі.

Процес моделювання з LSTM для мікрогрід:

1) Збір та підготовка даних

Для тренування LSTM потрібно зібрати великий обсяг даних, що включають: Історичні дані про виробництво енергії від сонячних панелей та вітрогенераторів. Дані про швидкість вітру та інтенсивність сонячного випромінювання. Споживання енергії споживачами в різні періоди. Інформація про стан акумуляторів (заряд/розряд, напруга, температура). Дані про підключення до основної мережі. Дані мають бути представлені у вигляді часових рядів, де кожен момент часу містить вимірювання параметрів.

2) Попередня обробка даних

Нормалізація: Для ефективної роботи LSTM дані зазвичай нормалізуються до діапазону $[0, 1]$ або $[-1, 1]$, що дозволяє зменшити час навчання та підвищити точність. Формування вікон: Данні повинні бути організовані в вигляді вікон часу (наприклад, 24 години або 7 днів), що дозволяє моделі навчатися на часових залежностях.

3) Побудова LSTM моделі

LSTM-модель зазвичай має кілька основних компонентів:

Вхідний шар - містить вектор вхідних параметрів (наприклад, дані про погодні умови, попереднє споживання енергії).

Кілька шарів LSTM, що дозволяють обробляти і зберігати часову інформацію.

Вихідний шар - передбачення майбутніх значень (наприклад, прогнози виробництва енергії чи споживання).

Типова структура LSTM моделі:

Вхідні дані → LSTM шари → Повнозв'язний шар → Вихід (прогноз).

4) Навчання моделі

Модель тренується на історичних даних, де основна мета — мінімізувати помилку між прогнозованими і реальними значеннями. Для цього зазвичай використовується функція втрат, така як середньоквадратична помилка (MSE).

5) Оцінка ефективності

Після тренування модель оцінюється на тестових даних, щоб перевірити її здатність до прогнозування. Використовуються метрики, такі як середнє абсолютне відхилення (MAE) та середньоквадратична помилка (RMSE) для визначення точності прогнозів.

6) Прогнозування

Після тренування модель використовується для прогнозування на нових даних. Наприклад, можна прогнозувати виробництво енергії на наступні кілька годин або днів.

Висновки до розділу 2

Розглянуті аспекти моделювання та оптимізації роботи мікрогрід за допомогою різних математичних методів, включаючи регресійні методи та нейронні мережі, показують значний потенціал для підвищення ефективності таких енергетичних систем.

Збір даних та класифікація локальних станів мікрогрід є важливою складовою для моніторингу та аналізу енергетичних процесів. Дані про виробництво енергії, стан акумуляторів, споживання та підключення до основної мережі дозволяють оптимізувати роботу мікрогрід, забезпечуючи більш ефективне використання відновлювальних джерел енергії. Модель енергетичного балансу вказує на важливість рівноваги між виробництвом, зберіганням і споживанням енергії. Розробка точних математичних моделей, що враховують різні компоненти мікрогрід, дозволяє знизити витрати енергії та забезпечити стабільність системи. Регресійні методи прогнозування є важливим інструментом для передбачення таких параметрів, як виробництво енергії та енергоспоживання. Зокрема, лінійна регресія та її розширення (множинна та поліноміальна регресія, ridge-регресія) дають змогу побудувати прості, але

ефективні моделі для прогнозування. Логістична регресія може бути застосована для класифікації сценаріїв потреби в енергопостачанні з основної мережі. Моделювання на основі нейронних мереж та LSTM дозволяє враховувати складні часові залежності, що виникають у мікрогрід. Завдяки своїй здатності зберігати довготривалі залежності, LSTM моделі є потужним інструментом для прогнозування змін у виробництві енергії, споживанні та стані акумуляторів. Використання таких моделей може істотно покращити точність прогнозів, зокрема, для розрахунку потреби в енергопостачанні з основної мережі. Процес навчання та прогнозування з LSTM підкреслює важливість збору та обробки великих обсягів даних, нормалізації та створення вікон часу для навчання моделі. Після тренування моделі на історичних даних можна здійснювати точне прогнозування для підтримки оптимального управління енергетичними потоками.

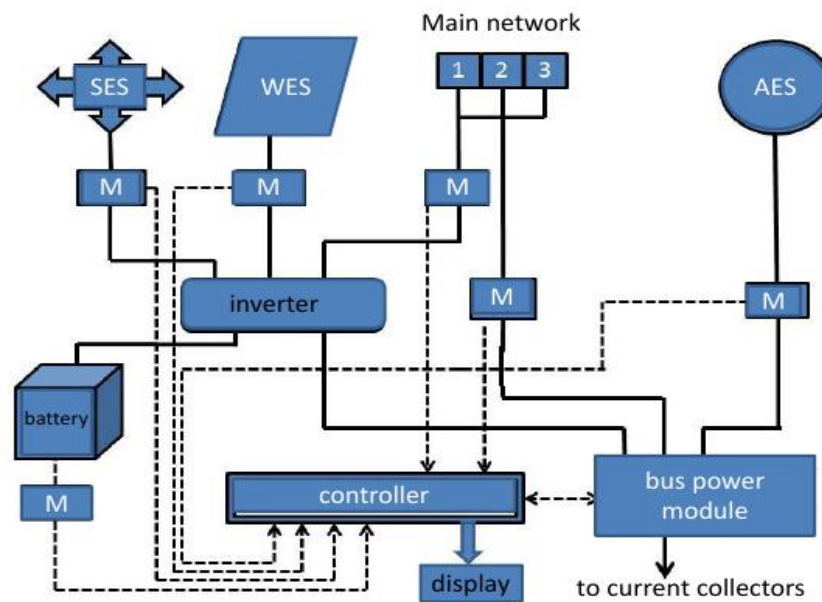
В цілому, поєднання традиційних методів регресії з потужними можливостями LSTM дає змогу не тільки підвищити точність прогнозів, але й зробити мікрогрід більш автономними та стійкими до змін навантаження і виробництва енергії. Тому в майбутньому важливо продовжити вдосконалення моделей, використовуючи нові методи машинного навчання та покращення збору даних для оптимізації енергетичних процесів.

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ МІКРОМЕРЕЖ ЛОКАЛЬНОЇ ПОЛІГЕНЕРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ТА ІНДУКТИВНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ

3.1. Індуктивне моделювання складних систем

Для управління генерацією, накопиченням і споживанням електроенергії в детермінованому добовому графіку споживання електроенергії з декількома джерелами (зовнішня енергосистема, вітрові та сонячні установки, статичні джерела з накопичувачами енергії та автономне живлення) станції з двигуном внутрішнього згоряння, див. рис. 3.1), використовувались принципи, засновані на – умовному динамічному тарифі (УДТ).



M - measuring devices

Рис.3.1 Загальна схема мікроенергетичних систем (мікромережа)

Ми маємо справу з людино-машинною системою керування локальним енергетичним об'єктом. Звідси під терміном сценарій ми будемо розуміти

процес прийняття рішення конкретним кінцевим споживачем, наприклад, відключення деяких некритичних електричних пристроїв (або навпаки), в які періоди найкраще купувати енергію з економічної точки зору, і так далі.

Необхідно також враховувати певні фактори та обмеження. Формально запишемо це:

$$S^*: \{R_m^*(P_i^*W_i^*) | (k_i \rightarrow C_i^*); CDT \rightarrow \min\} \quad (3.1)$$

де R_m^* – результати моделювання можливих прогнозів вироблення електроенергії W_i^* на заданий період роботи в ПМГ з обраною потужністю джерел P_i ;

k_i – варіант структури різних джерел у ПМГ;

C_i^* – теперішня вартість КЕС електроенергії з урахуванням можливості покриття графіка споживання електроенергії; ;

CDT – рівень економічної оцінки ситуації, що задовольняє споживача.

3.2 Критерії якості в індуктивному кластер-аналізі з цільовою ознакою.

Опишемо критерії оптимальності для вирішення задачі кластерного аналізу в широкому сенсі, які будуть використовуватися під час проведення індуктивної кластеризації. Відомо, що однією з основних характеристик k -го кластера (для зручності, без втрати загальності, будемо розглядати евклідовий простір) є його центр маси в просторі ознак X .

$$\begin{aligned} \bar{m}_k(X) &= \left\{ \left(\frac{1}{r_k} \sum_{l=1}^{r_k} x_{l1} \right), \left(\frac{1}{r_k} \sum_{l=1}^{r_k} x_{l2} \right), \dots, \left(\frac{1}{r_k} \sum_{l=1}^{r_k} x_{ln} \right) \right\} = \\ &= \left\{ \frac{1}{r_k} \sum_{l=1}^{r_k} x_{li}, i = 1, \dots, n \right\}, x_i \in X \end{aligned} \quad (3.2)$$

а середня внутрішньо-множинна відстань може бути подана як

$$\overline{d_k^2(\omega_s^k, \omega_t^k)} = \frac{1}{r_k(r_k - 1)} \sum_{s=1}^{r_k} \sum_{t=1}^{r_k} \sum_{i=1}^n (x_{is} - x_{it})^2 \quad (3.3)$$

де r_k – кількість вихідних об'єктів ω^k в k -му кластері,

n – початкова кількість ознак простору X .

Використаємо цільову ознаку як регуляризуючий елемент і обчислимо центр k -го кластера, враховуючи лише значення об'єктів, що належать цьому кластеру. Це можна інтерпретувати як проекцію центру k -го кластера з n -мірного евклідового простору X в одномірний евклідовий простір, тобто на вісь дійсних чисел. У цьому випадку вирази (3.2) і (3.3) набудуть спрощеного вигляду.

$$\bar{m}_k(x_0) = \hat{m}_k = \frac{1}{r_k} \sum_{l=1}^{r_k} x_{0l} \quad (3.4)$$

$$\overline{d_k^2(\omega_s^k, \omega_t^k)}_{x_0} = \hat{d}_k^2 = \frac{1}{r_k(r_k - 1)} \sum_{s=1}^{r_k} \sum_{t=1}^{r_k} (x_{0s} - x_{0t})^2, s \neq t \quad (3.5)$$

Відомо, що для отримання оптимальної кластеризації за допомогою методології індуктивного моделювання складних систем [4] необхідно застосовувати критерії, які володіють властивістю зовнішнього доповнення.

Для рішення задач кластеризації існує два підходи:

Перший підхід передбачає, що за допомогою заданої міри подібності має бути здійснене розбиття вибіркової множини Ω в просторі цільових та вхідних ознак таким чином, щоб подвійні області та були "близькими" згідно з обраним критерієм якості розбиття з властивістю зовнішнього доповнення. При цьому, оскільки задача є задачею розпізнавання без учителя, в початковій множині відсутні як об'єкти з індикаторами приналежності до певного кластера, так і відома кількість самих кластерів. Для цього позначимо опис зображення у просторі цільових ознак як D_1 , а в просторі вхідних вимірювань — як D_2 .

Критерій якості може бути представлений у такому вигляді:

$$\rho^2(\dot{m}) = \sum_{k=1}^K (\dot{m}_k(D_1) - \dot{m}_k(D_2))^2 \rightarrow \min \quad (3.6)$$

де $\dot{m}_k(D_1)$ – центр k -го кластера в кластеризації за першим описом D_1 ;

$\dot{m}_k(D_2)$ – центр k -го кластера в кластеризації за описом D_2 , обчислений за значеннями цільової ознаки точок k -го кластера.

На рис. 3.2 показаний принцип роботи критерію для прикладу з кількістю кластерів $K = 3$.

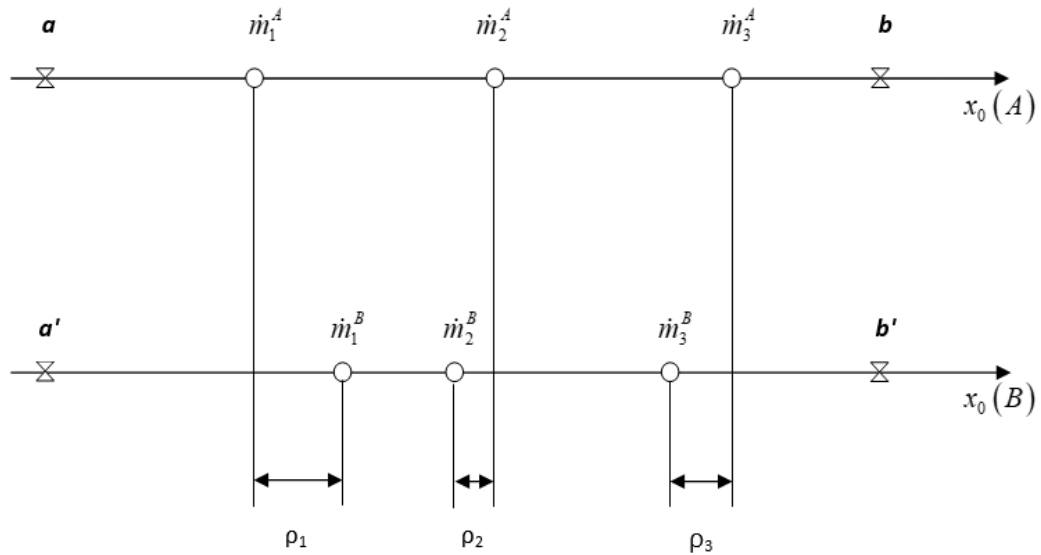


Рис. 3.2. До принципу роботи критерію найменших міжцентрових відхилень (несуперечності кластеризацій:). $\rho_{\Sigma} = |\rho_1| + |\rho_2| + |\rho_3|$.

У другому підході застосована класична схема розбиття вхідного масиву даних (1). Тобто, тут вимагається поділ вхідної множини об'єктів $\omega_k \in \Omega$, що підлягають кластеризації, не менше ніж на дві непересічні підмножини Ω^A і Ω^B , при цьому: $\Omega^A \cup \Omega^B = \Omega$, $\Omega^A \cap \Omega^B = \emptyset$.

Нехай на підмножинах Ω^A і Ω^B по одній з вибраних процедур кластер-аналізу, наприклад [4] чи [5], отримано кластеризації $s_t^A \in S^A$ і $s_t^B \in S^B$ з однаковими кількостями кластерів $k_t^A = k_t^B = K_t$ (t – номер кластеризації, що відповідає деякому підпростору ознак $X_t \subset X$, $k_t^{(\cdot)}$ – кількість кластерів в t -й кластеризації) в евклідовому підпросторі ознак $X_t \subset X$ і нехай для всіх K_t кластерів із s_t^A і s_t^B обчислені їх центри m_k^A і m_k^B , $k=1, \dots, K_t$, по осі цільової ознаки x_0 .

Отже, критерій оптимальності регуляризованої кластеризації можна виразити в найбільш простому та загальному вигляді наступним чином:

$$\rho^2(\dot{m}) = \sum_{k=1}^n (\dot{m}_k^A - \dot{m}_k^B)^2 \rightarrow \min \quad (3.7)$$

Критерій вимагає, щоб сума квадратів відхилень між центрами кластерів на осі цільового ознаки x_0 , встановлених на підмножествах Ω^A і Ω^B , була мінімальною.

Таким чином, цей критерій також називається критерієм найменших міжцентрових відхилень (НМВ), який є представником класу зовнішніх критеріїв несуперечності в методі групового врахування аргументів (МГУА). Аналогічно виразу (3.7), для того, щоб значення критерію (3.6) перебували в межах певного заданого інтервалу, наприклад $[0,1]$, його можна записати у такому вигляді:

$$\rho^2(\dot{m}) = \sum_{k=1}^K (\dot{m}_k^A - \dot{m}_k^B)^2 / \sum_{k=1}^K (\dot{m}_k^A + \dot{m}_k^B)^2 \rightarrow \min \quad (3.8)$$

3.3 Моделювання сценаріїв динамічного енергоменеджменту з використання мікромереж локальної полігенерації

Моделювання сценаріїв динамічного енергоменеджменту з використанням мікромереж локальної полігенерації спрямоване на оптимізацію виробництва, зберігання та споживання енергії в умовах змінних зовнішніх факторів і потреб користувачів. Мікрогрід, як локальна енергетична система, здатна працювати автономно або інтегруватися з основною мережею, забезпечуючи більшу гнучкість і ефективність у використанні енергії [21,22].

Сучасні можливості використання комбінованих енергетичних систем (КЕС) для локальних об'єктів встановленою потужністю до 15 кВт базуються на використанні кількох джерел (традиційних та відновлюваних з

накопиченням енергії), у тому числі магістральної мережі МН [4]. Такі технічні рішення спрямовані на підвищення надійності електропостачання, а також на оптимізацію витрат на електропостачання місцевих об'єктів. Як правило, в даний час технічно доцільно використовувати в КЕС такі джерела електроенергії: сонячні електростанції, вітрові турбіни, електрогенератори з двигунами внутрішнього згоряння, статичні джерела живлення з акумуляторами та ін. [5].

Для найбільш еластичної гармонізації генерації та попиту на споживання в мікроенергетичній системі доречно розглядати щоденні сценарії оптимізації в реальному часі. Розподільна генерація або генерація з автономного джерела — це щоденне або щотижневе планування виробництва електроенергії для досягнення оптимізації з точки зору витрат на електроенергію та, одночасно, з урахуванням різноманітних обмежень для відновлюваних джерел (доступність природної енергії) та МН (наявність добових тарифних зон, показники надійності, можливість паралельної роботи з джерелами розподіленої генерації) [6].

Однак не завжди вдається забезпечити однаковий рівень виробництва відновлюваних джерел. Тому зв'язок мікромережі з МН, з іншими традиційними джерелами (включаючи задану ємність накопичувача) є необхідною умовою для забезпечення заданого графіка споживання локального об'єкта

Для контролю виробництва та споживання електроенергії в добовому графіку споживання електроенергії з кількох джерел принципи, засновані на важливому критерії, були обґрунтовані як CDT (табл.3.1).

У таблиці 3.1 представлені цінові показники електроенергії у MICROGRID

Таблиця 3.1

Цінові показники електроенергії у MICROGRID

Time of Day ω_{ij}	Averaged cost quantity of EP ¹ from:			The cost of the energy consumed from the MN ⁵ (\$) x_4	CDT (\$) x_0
	<i>SES² capacity</i> 3 kW (\$) x_1	<i>WES³ capacity</i> 3 kW (\$) x_2	<i>APS⁴ \$ / kWh of capacity 5 kW</i> x_3		
	0:30	0	0,0161	0,006	0,42
1:00	0	0,016	0,006	0,42	0,0224
...
6:30	0,0011	0,0152	0,026	0,42	0,0421
7:00	0,0025	0	0,105	0,42	0,1074
...
11:30	0,037	0,0288	0,032	0,42	0,0976
12:00	0,0368	0,0281	0,012	0,42	0,0765
...
16:30	0,0099	0,0236	0,051	0,42	0,0848
17:00	0,0058	0,0207	0,122	0,42	0,1489
...
22:00	0	0,0067	0,121	0,42	0,1279
22:30	0	0,0138	0,048	0,42	0,0614
...
24:00	0	0,0184	0,005	0,42	0,0236

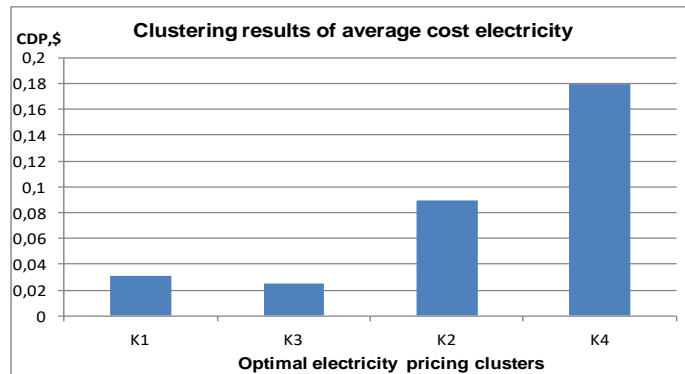
- 1) Джерела живлення (EP);
- 2) Джерела сонячної енергії (СЕС);
- 3) Вітроенергетична станція (ВЕС);
- 4) Автономна енергетична станція (АЕС);
- 5) Основна мережа (MN).

У таблиці 3.1 на цільовій осі для кожного центру кластера обчислюється, тобто значення CDT (\$) - виділено жирним курсивом.

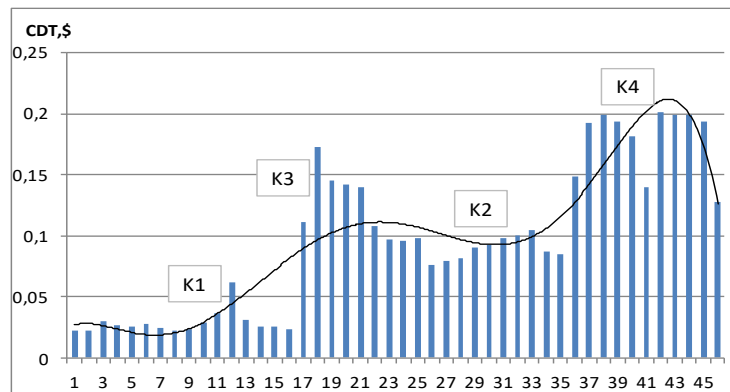
Це дає можливість для нової поточної ситуації, для якої відомі значення факторів, можна однозначно знайти вартість поточного тарифу CDT.

Результати моделювання представлено у таблиці 3.2 [29,29].

Нижче наведено графіки найбільш типових варіантів та результати кластеризації середньої вартості електроенергії, виробленої мікромережевими джерелами: оптимальними за вартістю електроенергії є кластери I, ..., IV (рис. 3.2).



(a)



(b)

Рис. 3.2. Представлено графіки найбільш типових варіантів результатів кластеризації середньої вартості електроенергії, виробленої джерелами мікромережі: оптимальними за вартістю електроенергії (а) є кластери I, ..., IV, а також те саме, але протягом годин на день (b).

Таблиця 3.2

Результати моделювання

Time of Day (clustering objects $\omega_j \in \Omega$)	Avg. Cost amount of electric power of SES, capacity 3 kW (\$)	Avg. Cost amount of electric power of WES capacity 3 kW (\$)	The cost of the energy consumed of the MN (\$)	CDT (\$)
	x_1	x_2	x_3	x_0
CLUSTER I				
1:00	0	0,016	0,006	0,0224
1:30	0	0,0157	0,007	0,0226
2:00	0	0,0294	0	0,0294
2:30	0	0,0269	0	0,0269
3:00	0	0,0259	0	0,0259
3:30	0	0,0275	0	0,0275
4:00	0	0,0144	0,01	0,0245
4:30	0	0	0,023	0,0225
5:00	0	0	0,023	0,0231
5:30	0	0,0105	0,019	0,0293
6:00	0	0,0157	0,021	0,0365
6:30	0	0,0163	0,012	0,0614
22:30	0	0,0138	0,048	0,0313
23:00	0	0,0145	0,017	0,0255
23:30	0	0,0161	0,009	0,0251
24:00:00	0	0,0184	0,005	0,0236
	0	0,0174	0,0133	0,0305
CLUSTER III				
7:30	0,004	0	0,107	0,1113
8:00	0,0094	0	0,163	0,1728
8:30	0,0147	0,013	0,117	0,1447
9:00	0,0169	0,0236	0,102	0,1423
9:30	0,0266	0,0242	0,089	0,1401
10:00	0,0314	0,0243	0,052	0,1075
10:30	0,0334	0,0237	0,04	0,0969
11:00	0,0361	0,0235	0,037	0,0963
11:30	0,037	0,0288	0,032	0,0976

Продовження таблиці 3.2				
	0,0194	0,016	0,79	0,0250
CLUSTER II				
12:00	0,0368	0,0281	0,012	0,0765
12:30	0,0368	0,0171	0,026	0,0798
13:00	0,0344	0,0138	0,033	0,0816
13:30	0,0328	0	0,057	0,0901
14:00	0,0291	0	0,063	0,0923
14:30	0,0267	0	0,071	0,0977
15:00	0,02	0	0,08	0,1001
15:30	0,0159	0	0,088	0,1041
16:00	0,011	0,0227	0,054	0,0874
16:30	0,0099	0,0236	0,051	0,0848
	0,025	0,1051	0,054	0,0894
CLUSTER IV				
17:00	0,0058	0,0207	0,122	0,1489
17:30	0,0043	0,0196	0,169	0,1925
18:00	0,0029	0,0155	0,181	0,1991
18:30	0,001	0,0218	0,171	0,1933
19:00	0,0005	0,0242	0,157	0,1818
19:30	0,0003	0,0286	0,111	0,1394
20:00	0,0002	0,0292	0,172	0,2013
20:30	0	0,0155	0,184	0,1994
21:00	0	0,014	0,185	0,1987
21:30	0	0,0085	0,185	0,1938
22:00	0	0,0067	0,121	0,1279
	0,0014	0,186	0,015	0,1796

3.4 Індуктивне моделювання при розв'язанні задачі кластеризації

Використовуючи перший підхід отримуємо те, що нижче представлена версія алгоритму, що призначена для розв'язання задачі подвійної кластеризації, коли цільова ознака та вхідні вимірювання пов'язані

монотонними залежностями. Під монотонністю в даному контексті мається на увазі, що з нерівності слідує нерівність.

На початку задається цілий параметр K_{\max} — максимально можлива кількість кластерів. Первинну кластеризацію можна здійснити різними методами в залежності від цілей і фізичних інтерпретацій даних, наприклад, за алгоритмом максимінної відстані [4] або за іншим кластеризатором. В результаті на осі утворюється $K \leq K_{\max}$ груп зображень, для яких обчислюються середні значення.

Частина зображень з кожної групи, що мають мінімальні дисперсії, відбираються в контрольну підмножину помічених об'єктів. Кількість зображень у k -му кластері позначається як N_k .

Формулювання для мінімальних дисперсій можна подати так:

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n_k - 1} \sum_{l=1}^{n_k} (x_{0lk} - \overline{x_{0k}})^2, \quad k = 1, \dots, K \quad (3.9)$$

відбираються в контрольну підмножину помічених об'єктів Δ_k (n_k — кількість зображень у k -му кластері).

Нормування всіх $\omega_i \in \Omega$ у просторі D_2 на інтервалі $[0, 1]$. Тут можна скористатися відомою формулою:

$$\tilde{x}_r = (x_r - x_{\min}^r) / (x_{\max}^r - x_{\min}^r) \quad (3.10)$$

На цьому кроці також виконується процедура генерування простору вторинних ознак $\{\hat{X}\}$ у заданому класі базисних наборів (функцій) F .

У випадку дуже асиметричних даних доцільно замість евклідової використання канберрівської метрики:

$$d(\omega_i, \omega_j) = \sum_{s=1}^N \left[\left| x_{is} - x_{js} \right| / (x_{is} + x_{js}) \right] \quad (3.11)$$

У цьому випадку нормування початкових даних не є необхідним, оскільки в результаті застосування виразу (3.11) вони вже приведені до потрібного інтервалу $[0,1]$, за умови невід'ємності значень [4].

Кластеризація (вторинна) множини $\Omega_f = \Omega \setminus \Omega_\Delta$ за ансамблями $\{\hat{x}_i\}$, $i=1, \dots, N_1$ з використанням того ж алгоритму максимуму. У цьому алгоритмі формування $(k+1)$ -го кластера починається за умови, якщо

$$d(m_k, \omega_t) = \left[\sum_{i=1}^n (m_k - \hat{x}_i)^2 \right]^{1/2} > \alpha r_t + \delta_r, \quad (3.12)$$

$$\omega_t \in \Omega_f, \quad t=1, \dots, N_1, \quad k=1, \dots, K,$$

$$\text{де } r_t = \sqrt{t} / K_{q,t}, \quad -\frac{r_0}{2} \leq \delta_r \leq \frac{r_0}{2},$$

$1 < \alpha \leq 2$, $K_{q,t}$ – кількість встановлених кластерів у q -й кластеризації на t -му ряду селекції.

Для всіх кластеризацій обчислюються значення критерію, які потім сортуються в порядку зростання. Згідно зі схемою багаторядних алгоритмів самоорганізації, з усієї множини рішень на певному етапі селекції відбирається лише m найкращих за критерієм, які будуть використовуватися в подальшій селекції.

Кластеризація множини зображень Ω_f за ансамблями $\{\hat{x}_i^{(F)}, \hat{x}_j\}$, $j=1, \dots, N_1$. Для цього використовується той же базовий алгоритм максимумної відстані і ті ж умови, що й на попередньому кроці. Також, як і вище, обчислюється критерій (3.7) і відбирається F рішень-претендентів.

Багаторядна процедура продовжується до тих пір, поки виконується умова:

$$\rho^2(\dot{m})_t > \rho^2(\dot{m})_{t+1}. \quad (3.13)$$

Отже, результатом роботи описаної індуктивної процедури кластеризації в першому варіанті є:

1. оптимальна кластеризація $S^*(X^*)$ з утвореними гомогенними групами,
2. підпростір інформативних ознак $\{X^*\}$, на основі якого було отримано оптимальну кластеризацію.

Приклад застосування першого підходу:

Вибіркова матриця даних представлена в табл. 3.3. Припускаємо, що шуканий ансамбль ознак – $\{X\} = \{x_1, x_2^2\}$ і $x_0 = x_1 + x_2^2$, враховуємо кількість кластерів у просторі вхідних вимірювань залишається невідомим.

Необхідно визначити:

- 1) оптимальну кількість кластерів – K^* ;
- 2) підпростір інформативних ознак – $\{X^*\}$;
- 3) відповідний $\{X^*\}$ кластеризації об'єктів – $S^*(X^*)$.

Простір вторинних ознак згенеруємо наступним чином: $\{x_i, x_i^k\}$, $k = 1, 2, 3$, $i = 1, 2$. Значення ознак нормуємо в інтервалі $[0, 1]$ за формулою (12). Значення параметра K_r будемо задавати із множини $K_r = \{2, 4, \dots, 12\}$, а параметр δ_r візьмемо рівним 0,05, що є допустимим для практичних задач кластеризації.

Як можна легко переконатися, в результаті застосування процедури кластеризації за першим підходом із використанням базового алгоритму

максимінної відстані знаходяться три рішення з однаковими значеннями, а саме $\rho^2(\dot{m}) = 0$. Це ансамблі: $\{x_1, x_2\}$, $\{x_1, x_4\}$, $\{x_2, x_3\}$.

Таблиця 3.3

Вихідні дані для прикладу

№ об'єкту ω_i	x_0	x_1	x_2	№ кластеру, R_k	Розпізнавання (прогноз) x_0^*
1	4	3	1	1	
2	8	7	1	3	
3	13	9	2	5	
4	6	2	2	2	
5	10	1	3	4	
6	14	5	3	6	
7	20	4	4	7	
8	34	9	5	9	
9	28	3	5	8	
10	42	6	6	10	
11	54	5	7	11	
12	66	2	8	12	
ω_1^*	36	6	5.5	9	34 / 36
ω_2^*	72	8	8	12	66 / 72

Однак, легко переконатися, що застосування критерію мінімуму помилки розпізнавання у вигляді [4]:

$$\Delta^2(\Omega_\Delta) = \sum_{\Omega_\Delta} \delta_l^2 \rightarrow \min, \quad (3.14)$$

$$\delta_l = [x_{0l}^* - \dot{m}_{k(l)}(D_2)], \quad \omega_l^* \in \Omega_\Delta \quad (3.15)$$

Тоді вираз (3.15) дозволяє вибрати з трьох варіантів один оптимальний ансамбль і відповідну кластеризацію. $S^*(X^*)$ за ансамблем $\{X^*\} = \{x_1, x_4\} \equiv \{x_1, x_2\}$. Не важко розпізнати “нові” об'єкти ω_1^* і ω_2^* і

визначити “невідомі” для них значення x_0 , зарахувавши їх до кластерів, інформація про які відома. Отже, для ω_1^* значення $x_0^* = 34$ (реальне значення – 36) і для $\omega_2^* - x_0^* = 66$ (реальне значення – 72).

Висновки до розділу 3

Задача кластеризації в широкому розумінні часто застосовується для попереднього аналізу "сирих" даних з метою виявлення компактних груп об'єктів дослідження, а також для створення оптимальних факторних підпросторів на основі заданих критеріїв. Цей підхід часто служить першим етапом перед використанням складніших інструментів, таких як параметрична ідентифікація, що дозволяє значно зменшити обсяги обчислень на етапах структурної ідентифікації завдяки попередньо створеному ансамблю моделей.

У нашій роботі описано два підходи до вирішення задачі кластеризації, обидва з яких засновані на індуктивній методології кластерного аналізу. Ці методи можуть бути ефективно застосовані в різних сферах прикладних системно-аналітичних досліджень, пов'язаних із проблемами структуризації, класифікації, кластеризації та моделювання складних систем.

Зокрема, наша динамічна модель управління базується на оптимальному розподілі потужності різнорідних джерел КЕС. У моделюванні сценаріїв динамічного енергоменеджменту в локальній полігенераційній мікромережі використовується інструментарій індуктивної бікластеризації. Цей підхід не лише дозволяє отримати однорідні з точки зору споживання кластерні об'єкти, але й надає можливість приймати в реальному часі рішення щодо переходу користувача від одного способу споживання до іншого, більш економічного.

Отримані результати показали, що запропоновані сценарії, що використовують цінові кластери на основі традиційного динамічного тарифу,

здатні підвищити енергоефективність енергосистем PMG, що працюють у режимі підключення MN. У майбутніх дослідженнях планується розробка сценаріїв для алгоритмізації функціонування PMG та координації реакції користувача на попит залежно від CDT.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІКРОГРІД

4.1 Енергетичні показники мікрогрід

Для оцінки енергетичної ефективності мікрогрід використовуються два основні показники: кількість спожитого органічного палива для виробництва електроенергії та частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному енергобалансі.

Кількість спожитого органічного палива. Припускаємо, що для виробництва 1 МВт·год електроенергії в середньому необхідно 120 літрів органічного палива. Ціна на літр палива в гривнях протягом останніх п'яти років коливалась від 25 до 45 грн.

Частка ВДЕ. Частка відновлюваних джерел енергії в мікрогрід зазвичай поступово збільшується. За період 2020–2024 років частка ВДЕ зросла з 15% до 30% у загальному енергобалансі.

На рисунку 4.1 динаміка росту цін

Споживання палива і витрати в мікрогрід за 2020-2024 роки

Рік	Кількість виробленої енергії (МВт·год)	Споживання палива (л)	Ціна за літр (грн)	Витрати на паливо (грн)
2020	200	24,000	28	672,000
2021	210	25,200	33	831,600
2022	220	26,400	36	950,400
2023	230	27,600	40	1104,000
2024	240	28,800	45	1296,000

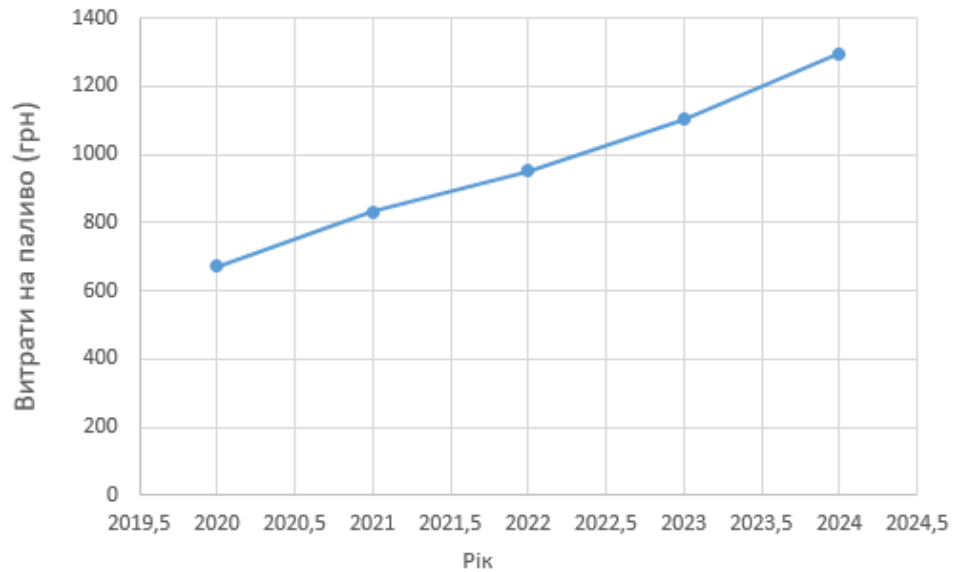


Рис. 4.1. Динаміка витрат на паливо в мікрогрід за 2020-2024 роки

Впровадження сонячних електростанцій (СЕС) дає змогу зменшити споживання органічного палива. За середніми оцінками, СЕС потужністю 50 кВт може виробляти близько 70,000 кВт·год на рік, що дозволяє замінити 20-30% річного енергоспоживання в мікрогрід.

Річна економія палива обчислюється за формулою:

$$E_{\text{економ}} = Q_{\text{паливо}} \cdot (1 - R_{\text{ВДЕ}}), \quad (4.1)$$

де $Q_{\text{паливо}}$ – загальна кількість палива (в літрах);

$R_{\text{ВДЕ}}$ – частка енергії від ВДЕ.

Розрахунки наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2

Розрахунок економії палива за рахунок СЕС

Рік	Споживання палива без СЕС (л)	Частка ВДЕ (%)	Споживання палива з СЕС (л)	Економія палива (л)
2020	24,000	15 %	20,400	3,600
2021	25,200	20 %	20,160	5,040

Продовження таблиці 4.2				
2022	26,400	25 %	19,800	6,600
2023	27,600	27 %	20,148	7,452
2024	28,800	30 %	20,160	8,640

Зменшення споживання палива також сприяє зниженню викидів CO₂. За середнім коефіцієнтом викидів 2.68 кг CO₂ на літр палива, річне скорочення обсягу викидів можна розрахувати за допомогою наступної формули:

4.2 Зниження викидів і їх грошова оцінка

Зменшення споживання палива також сприяє зниженню викидів CO₂. За середнім коефіцієнтом викидів 2.68 кг CO₂ на літр палива, річне скорочення обсягу викидів можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$E_{CO_2} = E_{\text{економ}} \cdot F_{\text{викиди}}, \quad (4.2)$$

$$\text{де } F_{\text{викиди}} = 2,68 \frac{\text{кг} \cdot \text{CO}_2}{\text{л}}.$$

Результати обчислення заносимо до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Розрахунок річного зниження обсягу викидів

Рік	Економія палива (л)	Річне зниження обсягу викидів (кг · CO ₂)
2019	3,600	9,648
2020	5,040	13,5072
2021	6,600	17,688
2022	7,452	19,971
2023	8,640	23,155

4.3 Основні економічні показники: LCOE

Вартість виробництва електроенергії в мікрогрід (LCOE) обчислюється за формулою:

$$LCOE = \frac{C_{\text{інвест}} + C_{\text{операт}}}{E_{\text{виробл}}}, \quad (4.3)$$

де $C_{\text{інвест}} = 1500000$ грн (інвестиційні витрати на встановлення СЕС);

$C_{\text{операт}} = 50000$ грн/рік (експлуатаційні витрати);

$E_{\text{виробл}} = 200000$ кВт · год на рік (загальна кількість виробленої енергії).

Розрахунки заносимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Розрахунок LCOE за 2020-2024 роки

Рік	Інвестиційні витрати (грн)	Операційні витрати (грн)	Вироблена енергія (кВт·год)	LCOE (грн/кВт·год)
2020	1500000	50000	200000	8,25
2021	1500000	50000	210000	7,86
2022	1500000	50000	220000	7,50
2023	1500000	50000	230000	7,17
2024	1500000	50000	240000	6,88

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено аналіз енергетичної ефективності мікрогрід, зокрема, зосереджено увагу на споживанні органічного палива та потенціалі використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Розрахунки показали, що впровадження сонячних електростанцій (СЕС) значно зменшує

потребу в органічному паливі, що позитивно впливає на загальні експлуатаційні витрати. Так, у 2024 році економія на паливі становила 8,640 літрів, що сприяло зниженню викидів CO₂ та загальних витрат мікрогрід.

Впровадження СЕС також призводить до збільшення частки ВДЕ, яка зросла з 15 % у 2020 році до 30 % у 2024 році, що значно покращує енергоефективність системи. Зниження викидів CO₂ та економія палива роблять мікрогрід більш екологічно чистим і економічно вигідним.

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність використання ВДЕ для сталого розвитку мікрогрід, демонструючи, що перехід на відновлювані джерела енергії дозволяє суттєво підвищити енергоефективність та знизити витрати.

РОЗДІЛ 5

БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

5.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи, які досягли 18 років, не мають медичних протипоказань для виконання робіт та пройшли вступний і первинний інструктаж, а також виробниче навчання і перевірку знань. Електромонтер повинен бути ознайомлений зі схемою електропостачання об'єктів виробництва та володіти необхідними навичками для технічного обслуговування електроустановок. Він забезпечується засобами індивідуального захисту та спеціальним одягом. Інструменти та засоби захисту мають бути перевірені, справні та використовуватися за призначенням.

При експлуатації електроустановок використовуються електрозахисні засоби та запобіжні пристосування. Для ручного включення і відключення обладнання з напругою понад 1000 В необхідно застосовувати діелектричні рукавички, калоші або килимки. Відключення обладнання включає такі етапи: вимикання роз'єднувачів, заміна плавких вставок запобіжників, відключення приводів мережі. Після вивішування попереджувального плаката перевіряється відсутність напруги на відключеній ділянці мережі, а в оперативному журналі фіксується запис про відключення. Включення устаткування проводиться тільки після зазначення у журналі про завершення робіт з вказівкою відповідальної особи.

Безпека при виконанні робіт також забезпечується організаційними заходами, такими як оформлення нарядів, допуску до робіт та нагляд під час виконання завдань. Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, умови безпечного проведення робіт,

склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду, але з обов'язковим записом в журналі, можуть виконуватися роботи, такі як прибирання приміщень до огороження.

Під час обслуговування електрообладнання, зокрема чистки кожухів, доливки масла в підшипники, догляду за колекторами, контактними кільцями, щітками та заміни запобіжників, необхідно дотримуватися таких вимог: при роботі з електроустановками з напругою до 1000 В без зняття напруги слід захистити інші струмовідні частини, що знаходяться поблизу робочого місця, до яких може бути випадковий дотик. Працівник повинен працювати в діелектричних калошах або стояти на ізолюючій підставці чи діелектричному килимі, а інструменти повинні мати ізолюючі рукоятки (викрутки повинні мати ізольовані стрижні). У разі відсутності такого інструменту необхідно використовувати діелектричні рукавички.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах із застосуванням ізолювальних засобів захисту, потрібно тримати ці засоби за рукоятки до обмежувального кільця та правильно розташовувати ізолюючі частини, щоб уникнути небезпеки замикання на землю або між струмоведучими частинами двох фаз. Використовувати тільки сухі та чисті ізолювальні частини засобів захисту, що не мають пошкоджень лакового покриття.

У разі виявлення пошкоджень лакового покриття або інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту їх використання повинно бути негайно припинене.

Щоденні огляди електрообладнання та мереж повинні проводити чергові електрики. Огляд має включати перевірку стану обладнання, ступеня корозії, фарбування труб, справності вводу проводів та кабелів, заземлюючих пристроїв, наявності попереджувальних плакатів і маркування на вибухонебезпечних частинах обладнання, а також перевірку наявності всіх болтів та елементів, що кріплять оболонку.

Якщо під час огляду виявляється ненормальна робота силового трансформатора, черговий електрик повинен вимкнути його, дотримуючись усіх заходів безпеки та використовуючи засоби індивідуального захисту. Відключення проводиться при сильному нерівномірному шумі та інших аномальних ознаках.

Потріскування всередині трансформатора, ненормальне і постійне зростання його температури при номінальному навантаженні і роботі охолоджувальних пристроїв, викид масла з розширювача або розрив діафрагми вихлопної труби, а також витік масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого — це серйозні ознаки, що вимагають негайного реагування. У разі виявлення таких несправностей необхідно зафіксувати ситуацію в оперативному журналі і повідомити відповідального за електрогосподарство.

Відповідно до правил технічної експлуатації електроустановок та техніки безпеки, при експлуатації електроустановок споживачів повинні проводитися регулярні огляди і ремонт електромереж, а також вимірювання опору ізоляції.

5.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі розуміють їх здатність у надзвичайних ситуаціях продовжувати виробництво в запланованому обсязі та асортименті продукції, а також оперативно відновлювати роботу у разі середніх пошкоджень або порушення зв'язків із кооперацією та поставками.

Для об'єктів, що не займаються виробництвом матеріальних цінностей, під стійкістю розуміють їх здатність виконувати функції в умовах надзвичайних

ситуацій. На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в НС впливають такі фактори:

- 1) надійність захисту працівників;
- 2) здатність інженерно-технічного комплексу витримувати уражаючі фактори стихійних лих, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- 3) захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів, таких як пожежі, вибухи, зараження отруйними речовинами;
- 4) надійність системи забезпечення об'єкта необхідними ресурсами, такими як сировина, паливо, комплектуючі, електроенергія, вода, газ та інші.

Стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі включає здатність забезпечувати виробництво продукції в надзвичайних ситуаціях у запланованих обсягах та номенклатурі, а також оперативно відновлювати виробничі процеси при середніх руйнуваннях чи порушеннях у зв'язках з постачанням та кооперацією.

Фактори, що впливають на стійкість роботи об'єктів, включають: – забезпечення безперебійного керування виробництвом та цивільною обороною (ЦО); – готовність об'єкта до виконання робіт з ліквідації наслідків аварій та відновлення виробництва.

Захист працівників здійснюється через чотири основні способи: – укриття в захисних спорудах; – проведення евакуаційних заходів; – радіаційно-хімічний захист; – медичний і біологічний захист.

Для надійного захисту виробничого персоналу важливо використовувати всі ці методи в комплексі.

Захист виробничих фондів включає підвищення стійкості будівель і конструкцій до уражаючих факторів та захист технологічного обладнання, верстатів, систем комунікацій і інших елементів виробничого процесу.

Для підвищення надійності електро-, водо- та теплозабезпечення передбачають:

- 1) електрозабезпечення: поділ мережі на незалежні частини, створення резервних джерел енергії;
- 2) водопостачання: два незалежних джерела, одне з яких підземне, захист вододжерел та резервуарів;
- 3) газо-, тепло- і паливозабезпечення: підземні газопроводи, автоматичні вимикаючі пристрої в аварійних випадках.

Протипожежна стійкість забезпечується: – мінімізацією запасів палива та вибухонебезпечних матеріалів; – проведенням профілактичних заходів і підготовкою сил для пожежогасіння.

Стійкість матеріально-технічного постачання досягається створенням запасів сировини, палива та комплектуючих для безперервної роботи в разі перебоїв у постачанні.

Система керування повинна бути підготовлена до швидкого відновлення виробництва, для чого розробляються технічні та технологічні документи, визначається необхідне обладнання і ресурси для відновлення, а також розраховується черговість відновлювальних робіт.

Наявність підготовленої робочої сили також важливо для стійкості об'єктів.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом забезпечується через: – надійну систему зв'язку; – високу підготовку керівного складу; – своєчасне ухвалення правильних рішень і постановку завдань в залежності від обставин.

Загалом, для досягнення високої стійкості об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі необхідно проводити інженерно-технічні, технологічні та організаційні заходи, спрямовані на мінімізацію впливу уражаючих факторів і забезпечення оперативного відновлення виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Загальні висновки з проведеного дослідження підтверджують значний потенціал мікрогрід як ефективної та сталого енергетичної системи для майбутнього. Інтеграція різних джерел енергії, включаючи відновлювані та традиційні, а також використання накопичувальних систем дозволяє створювати гнучкі та надійні рішення для забезпечення енергетичних потреб у різних умовах. Огляд сучасних архітектур мікрогрід показує їхній потенціал у критичних об'єктах та в умовах, де забезпечення стабільного енергопостачання є особливо важливим.

Інтеграція IoT-технологій, хмарних обчислень та машинного навчання відкриває нові можливості для моніторингу і оптимізації енергетичних процесів. Моделювання та оптимізація роботи мікрогрід з використанням математичних методів, таких як регресія та нейронні мережі, дозволяють значно підвищити ефективність системи, особливо у сфері прогнозування енергоспоживання та виробництва.

Зокрема, підхід до кластеризації та індуктивної бікластеризації в управлінні потужностями дозволяє вдосконалити управлінські стратегії та оптимізувати використання енергетичних ресурсів, що позитивно впливає на економічну ефективність мікрогрід. Це дозволяє знижувати витрати на енергію та збільшувати частку відновлювальних джерел енергії, сприяючи досягненню цілей сталого розвитку.

Аналіз енергетичної ефективності мікрогрід показав, що впровадження сонячних електростанцій (СЕС) дозволяє знижувати витрати на органічне паливо, зменшувати викиди CO₂ та знижувати загальні експлуатаційні витрати системи. Перехід на відновлювальні джерела енергії не тільки підвищує енергоефективність, але й робить систему більш екологічною.

Отже, результати дослідження підтверджують, що мікрогрід із інтеграцією відновлювальних джерел енергії та використанням новітніх технологій є потужним інструментом для досягнення сталого розвитку енергетичних систем і підвищення енергоефективності на різних етапах енергетичного циклу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Биконя О.С. Формування інтелектуальної енергосистеми України. Економіка і прогнозування. К., 2014. №1. С.87–96.
2. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 1. С. 7–21
3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / Базюк Т.М. та ін.; за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
4. Осипенко В.В. Два підходи до розв'язання задачі кластеризації у широкому сенсі з позицій індуктивного моделювання. Енергетика і автоматика. 2014. №1 URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/3433> (дата звернення: 15.10.2024).
5. Основні положення концепції інтелектуальної енергосистеми з активно-адаптивною мережею. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microgrid> (дата звернення: 16.10.2024).
6. Охріменко В.М. Споживачі електричної енергії. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 286 с.
7. Петергеря Ю.С., Жуйков В.Я. Принципи побудови інтелектуальних систем керування перетворювачів у локальних об'єктах. Збірник праць науковотехнічної конференції «Екотехнології і ресурсозбереження. Енергоефективність та охорона навколишнього середовища». К., 2001. URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/2_2018/60.pdf (дата звернення: 16.10.2024).

8. Рачицький В.С., Денисюк С.П. Перспективні архітектури Microgrid та особливості їх застосування. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», Київ, 2013. 220 с.
9. Савченко Н., Косиченко О., Кислий А. Microgrid система з джерелами альтернативної енергетики у вигляді мобільних сонячних електростанцій. URL: <https://www.researchgate.net/publication/384671980> (дата звернення: 16.10.2024).
10. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с.
11. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: Навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «Твори», 2020. 332 с.
12. Степашко В.С. Елементи теорії індуктивного моделювання. Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія. Колектив авторів. Київ: Наукова думка, 2010. С. 471–486.
13. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України. Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: спец. вип. Ч. 1. К., 2011. С. 5–20.
14. Barbose, G., Goldman, C., Bharvirkar, R., Hopper, N., Ting, M., & Neenan, B. “Real time pricing as a default or optional service for C&I customers: A comparative analysis of eight case studies,” Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005. URL: <http://escholarship.org/uc/item/7q6408h5.pdf> (дата звернення: 12.10.2024).
15. BPI, Smart buildings in a Decarbonized Energy System, California Energy Commission, Zero-Emission Vehicles and Infrastructure – Tracking Progress, October 2016. P. 54–65.

16. Bui V. H., Hussain A., and Su W. C. "A dynamic internal trading price strategy for networked microgrids: a deep reinforcement learning-based game-theoretic approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 13, no. 5, P. 3408–3421.
17. Bullich-Massague E., Gonzalez F. D, Arag ' u'es-Pe ' nalba M., Girbau-Llistuella F., Olivella-Rosell P. and Sumper A. "Microgrid clustering architectures," *Applied Energy*, Vol. 212, P. 340–361
18. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 12 2008, P. 235–249.
19. Fang S. D., Y. Xu, Z. M. Li, Zhao T. Y. and Wang H. D. "Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in allelectric ship microgrids," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, no. 4, P. 3361–3373.
20. Ivakhnenko A.G., "Objective Computer Clusterisation Based on Self-Organisation Theory," *Soviet Automatic Control*, Vol. 20, no. 6, 1987, P. 1–7.
21. Kaplun, "The dynamic pricing of electricity as a criterion of efficiency of local microenergy systems," *Bulletin KNUTD, Ser: Engineering*, no. 3 (98), 2016. P. 50–59.
22. Kaplun, V. Osypenko V, "On the issue of creation of innovative dispatching systems in the energy microgrids," *Proc. of the Int. Conf. "Intelligent Decision Making Systems and Problems of Computational Intelligence, Kherson: PP Vyshemirsky V.S., 2017. P. 524–527.*
23. Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., Dimeas, A., "Microgrids management," *Power and Energy Magazine, IEEE* , Vol.6, no.3, May-June 2008. P. 54–65.
24. Liu X., Wang P., and Loh P. C. "A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, no. 2, P. 278–286.
25. Mashayekh S., Stadler M., Cardoso G., Heleno M., Madathil S. C., Nagarajan H., Bent R., Mueller-Stoffels M., X. N. Lu, and Wang J. H. "Security-

constrained design of isolated multi-energy microgrids,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, no. 3, pp. 2452– 2462.

26. Mousavi N., Kothapalli G., Habibi D., Das C. K., and Baniasadi A. “A novel photovoltaic-pumped hydro storage microgrid applicable to rural areas,” Applied Energy, Vol. 262, P. 114–284.

27. Nezamabadi H. and Vahidinasab V. “Arbitrage strategy of renewable-based microgrids via peer-to-peer energy-trading,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 12, no. 2, pp. 1372–1382.

28. Osypenko V., Kaplun V., “About the intelligent decision making system for dynamic electricity pricing on renewable microgrids,” Proc. of the XII IEEE Int. Conf. CSIT-2017 & Int. Workshop on Inductive Modeling, September 05-08, 2017, Lviv, Ukraine, Lviv: Publisher “Vezha&Co”, 2017. P. 348–350.

29. Osypenko V., Kaplun V., Modeling of Dynamic Energy-Management Scenarios in Local Polygeneration Microgrids Using Inductive Bi-clustering Algorithm. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8929843/authors#authors> (дата звернення: 18.10.2024).

30. Roozbehani, M., Dahleh, M. A., & Mitter, S. K. (2011). Volatility of Power Grids under Real-Time Pricing, X, 1–15. Retrieved from URL: <http://arxiv.org/abs/1106.1401> (дата звернення: 13.10.2024).

31. Thirugnanam K., El Moursi M. S., Khadkikar V., Zeineldin H. H. and Al Hosani M. “Energy management strategy of a reconfigurable gridtied hybrid AC/DC microgrid for commercial building applications,” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 13, no. 3, pp. 1720–1738.