

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

„_____” _____ 2019р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему: **«Алгоритм відновлення даних у MicroGrid»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ДС-51

Корчака Микола Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: декан, д.т.н, проф. Жуйков В. Я.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультанти: Технічний розділ к.т.н., доц. Клен К. С.

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент: доцент кафедри ЕІ, к.т.н., доц., Попов А.О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра промислової електроніки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050802 Електронні пристрої та системи

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко
(підпис) (прізвище ініціали)

«22» травня 2019 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Корчаці Миколі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Алгоритм відновлення даних у MicroGrid

Керівник проекту: Жуйков Валерій Якович, д.т.н., проф.

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

затверджені наказом по університету від « 23 » березня 2019 року № 1008-с

2. Строк подання студентом проекту 12 червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту: карта місцевості мікрорайону у місті Боттроп, Німеччина, добові дані про величину сонячного випромінювання. Площа мікрорайону приблизно 1000 м². Площа хмари над мікрорайоном 25% від площі мікрорайону, площа частини мікрорайону для якої неможливо виміряти дані про величину сонячного випромінення. Напрямок руху хмари – обрати самостійно. Закон зміни прозорості хмари – обрати самостійно.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Вступ. Опис системи MicroGrid. Методи відновлення даних, алгоритм на основі емпіричних ортогональних функцій. Застосування методу для відновлення даних у Micro Grid

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Теоретичні креслення

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний	Клен К. С., к.т.н., доцент	22.05.19	17.06.19

7. Дата видачі завдання: 22.05.19

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Консультація з керівником практики	23.05.19-24.05.19	
2	Огляд літератури	25.05.19-29.05.19	
3	Дослідження системи MicroGrid	30.05.19-31.05.19	
4	Дослідження причин відсутності даних	01.06.19-02.06.19	
5	Огляд методів відновлення даних	03.06.19-04.06.19	
6	Дослідження емпіричних ортогональних функцій	05.06.19-06.06.19	
7	Розробка алгоритму відновлення даних	07.06-08.06.19	
8	Дослідження ефективності роботи алгоритму	09.06.19-10.06.19	
9	Підготовка пояснювальної записки та графічного матеріалу	11.06.19-17.06.19	

Студент

_____ (підпис)

Корчака М. О.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

Жуйков В.Я.

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У даній роботі проведено дослідження MicoGrid, а саме властивості генерації і зберігання енергії, особливості керування та функціональні можливості. Це зроблено на основі аналізу реальних впроваджених MicroGrid. Досліджено труднощі при проектуванні, розробці і впровадженні MicroGrid у існуючу мережу. Проаналізовані причини відсутності даних. Розроблено алгоритм відновлення даних у MicroGrid, який відновлює дані використовуючи емпіричні ортогональні функції. Точність відтворення даних забезпечить максимальний відбір енергії від сонячних панелей, які входять до складу системи. Ефективність роботи алгоритму підтверджено за допомогою моделювання житлового мікрорайону над яким проходять хмари, що буде причиною відсутності даних.

ABSTRACT

Microgrids are now emerging from lab benches and pilot demonstration sites into commercial markets, driven by technological improvements, falling costs, a proven track record, and growing recognition of their benefits. This review work explains what a microgrid is, and provides a multi-disciplinary portrait of today's microgrid drivers, real-world applications, challenges, and future prospects. For correct operation, the system must have a large amount of data. This work makes it possible to analyze the reasons for the lack of data. Based on the study, a data recovery algorithm was developed in MicroGrid, which restores data using empirical orthogonal functions. The accuracy of data reproduction will ensure the maximum energy selection from solar panels that are part of the system. The efficiency of the algorithm has been studied by modeling the residential micro-district over which the clouds pass, which will cause the lack of data.

ЗМІСТ

	Ст.
ВСТУП	4
1. ОПИС СИСТЕМИ MICROGRID	6
1.1. Характеристики MicroGrid.....	10
1.2. Фактори, що сприяють розвитку MicroGrid.....	14
1.3. Впровадження MicroGrid.....	16
1.4. Перспективи MicroGrid.....	21
1.5. Проблеми при впровадженні MicroGrid.....	28
2. МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ	31
2.1. Причини відсутності даних у MicroGrid.....	31
2.2. Методи відновлення даних.....	32
2.3. Метод на основі емпіричних ортогональних функцій.....	35
2.4. Зв'язок між EOF і SVD.....	45
3. ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ НА ОСНОВІ EOF ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ У MICROGRID	52
3.1. Дані для дослідження.....	52
3.2. Дослідження роботи алгоритму.....	54
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
Додаток. Лістинг програми	
ABSTRACT	

					<i>ДС51.511101.001ПЗ</i>					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Алгоритм відновлення даних у MicroGrid. Пояснювальна записка			Літера	Лист	Листів
Розроб.	Корчака М.О.	Жуйков В.Я.								3
Перевір.										
Н. Контр.	Батрак Л.М.									
Затверд.	Жуйков В.Я.									

ВСТУП

Одним з ключових факторів, який в подальшому може суттєво вплинути на питання енергозбалансованості та дотримання енергетичного балансу країни є стимулювання впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах країни [1]. Сьогодні на території України функціонує 93 сонячні електростанції загальною встановленою потужністю 530 МВт, частка електроенергії, генерованої з сонячного випромінювання, в загальному балансі електричної енергії країни не перевищує 1% [2].

В останні роки в Україні активно впроваджуються MicroGrid – системи, які реалізують керування відновлюваними джерелами енергії і електричним навантаженням для забезпечення відбору максимальної енергії. MicroGrid повинні опрацьовувати великі обсяги даних, а також мають реагувати на зовнішні зміни контекстних даних [3].

При наявності в MicroGrid сонячних панелей, система керування має опрацьовувати дані із метеорологічних та електричних моніторингових систем для забезпечення роботи системи в режимі відбору максимальної енергії. Часто ці данні надходять із різних джерел. З різних причин частина даних може втрачатися у зв'язку з проблемою передачі або через несправності у системі. Дані можуть бути відсутні за різні періоди часу, від кількох хвилин до декількох тижнів або місяців.

Для коректної оцінки даних і подальшого опрацювання у системі має бути наявна інформація про навколишнє середовище – температуру, вологість, прозорість повітря, наявність затінення, забрудненість панелей; величину сонячного випромінювання; параметри сонячних панелей; враховувати особливості процесів генерації енергії в сонячних. Коректний аналіз може бути проведений при умові, що частка відсутніх даних у базі є незначною. Стандартні методи заповнення відсутньої інформації, такі як копіювання даних за попередній день чи використання даних за минулий рік, не дають

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

коректного результату, оскільки не враховують метеорологічні умови, а також можливість виходу із ладу сонячних панелей. Також методи, що використовують попередні дані, не враховують процеси деградації системи. Методи, в основі яких лежать відновлення відсутніх даних за допомогою математичних алгоритмів, таких як інтерполяція, регресія, усереднення, не враховують умови генерації енергії в сонячних панелях. Одним з можливих підходів є відтворення відсутніх даних використовуючи дані систем, розташованих поруч, але це додатково вимагає визначення впливу різниці у мікрокліматі цих систем [4].

Тому, задача вибору коректного алгоритму відтворення відсутніх даних, який буде враховувати особливості роботи сонячних панелей, а також фактори, які впливають на генерацію енергії в них, для забезпечення відбору максимальної енергії у MicroGrid є актуальною.

Метою даної роботи є провести детальний огляд MicroGrid, на основі якого буде запропоновано алгоритм відтворення відсутніх даних у MicroGrid на основі використання емпіричних ортогональних функцій, який забезпечить відбір максимальної енергії.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1. ОПИС СИСТЕМИ MICROGRID

На сьогоднішній день у світі системи електрозабезпечення стали на шлях децентралізації, декарбонації (зменшення відходів), демократизації (популяризації). Необхідність рухатися цим шляхом, шляхом «трьох де», зумовлена потребами утримати вартість на електроенергію, замінити старі інфраструктури, покращити стійкість та надійність, зменшити кількість викидів вуглекислого газу для зменшення впливу на зміни клімату, а також надійно забезпечити електроенергією місця, які мають проблеми в інфраструктурі електрозабезпечення. Незважаючи на те, що вирішення проблеми може бути різним в залежності від різних факторів у різних місцях, MicroGrid має гнучку архітектуру, що може забезпечити розподіл енергетичних ресурсів для широкого ряду потреб у різних місцях, від урбанізованих міст до віддалених сільських місцевостей.

У індустріалізованих країнах MicroGrid розглядають як частину великої «MacroGrid», яка має наступні особливості:

- 1) До її складу входять гігаватні генератори потужності.
- 2) Протяжність високовольтних ліній електропередачі на тисячі та сотні тисяч кілометрів.
- 3) Не здатність в великій кількості накопичувати енергію.
- 4) Джерело енергії - вуглецеві викопні палива.

Мережа яка існує сьогодні розвивалася протягом довгого часу, починаючи з дуже малої, яка передавала постійний струм в кінці 19-го століття. Внаслідок зростання попиту на електроенергію, ця мережа зростала та ставала централізованою. А зараз існуюча мережа намагається стати децентралізованою знову. З 1920-их до 1970-их покращувалася надійність ліній електропередачі шляхом під'єднання різних джерел генерації електроенергії до різних навантажень, знижувалася вартість на конструкції для передачі енергії, а також збільшились можливості передавати енергію з

									Арк.
									6
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДС51.5111.005.001 ПЗ				

віддалених електростанцій. Однак, схоже, що ці переваги досягли свого максимуму і вже не можуть бути актуальними у зв'язку з економічними проблемами та проблемами навколишнього середовища. У зв'язку з реструктуризацією комунальних підприємств, покращеннях у технологіях розподіли електроенергії, а також економічними ризиками у разі побудови великих за розмірами систем генерації та передачі енергії, компанії, які займаються електрозабезпеченням, почали діяльність, пов'язану, з використанням менших, децентралізованих систем електрозабезпечення. Це пов'язано із перевагами, які мають розподілені електричні ресурси: мінімальні затрати на генерацію, передачу та розподіл енергії; контроль напруги та споживання реактивної потужності; допоміжні послуги; екологічні переваги; зменшення втрат енергії; заощадження електроенергії; збільшення надійності; покращення якості електроенергії; поєднання теплової та електричної енергії; генерація в режим очікування.

Починаючи з кінця 1990-х років, вчені і інженери почали досліджувати децентралізовані підходи, які могли б керувати інтеграцією тисяч або десятків тисяч розподілених енергетичних ресурсів таким чином, щоб максимально підвищити надійність і стійкість перед стихійними лихами, фізичними атаками, кібер-атаками та збоями у електропостачанні. Рішенням було використовувати сіткову архітектуру, яка могла б керувати виробництвом електроенергії та попитом на місцевому рівні у підрозділах сітки, які могли б бути автоматично виділені з більшої мережі, щоб забезпечити електропостачання у критичних випадках, навіть якщо мережа загалом не працює. Цей підхід отримав назву «MicroGrid».

У літературі міститься ряд визначень MicroGrid та функціональних класифікаційних схем. Широко використовується визначення, розроблене для Міністерства енергетики США компанією MicroGrid Exchange Group, спеціальною групою експертів з дослідження і застосування.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

MicroGrid - це група взаємозалежних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів в межах чітко визначених електричних кордонів, що діє як єдиний керований об'єкт відносно мережі. MicroGrid може підключатися і відключатися від електромережі, щоб вона могла працювати як в мережевому, так і в режимі ізоляції [5].

Цей опис включає три вимоги до системи:

- 5) можливість ідентифікувати MicroGrid, як частину у складі великої мережі;
- 6) ресурси MicroGrid, використовуються спільно один з одним, а не з віддаленими ресурсами;
- 7) можливість функціонування MicroGrid незалежно від того, чи підключена вона до великої мережі.

На рис. 1.1 показано схему MicroGrid.

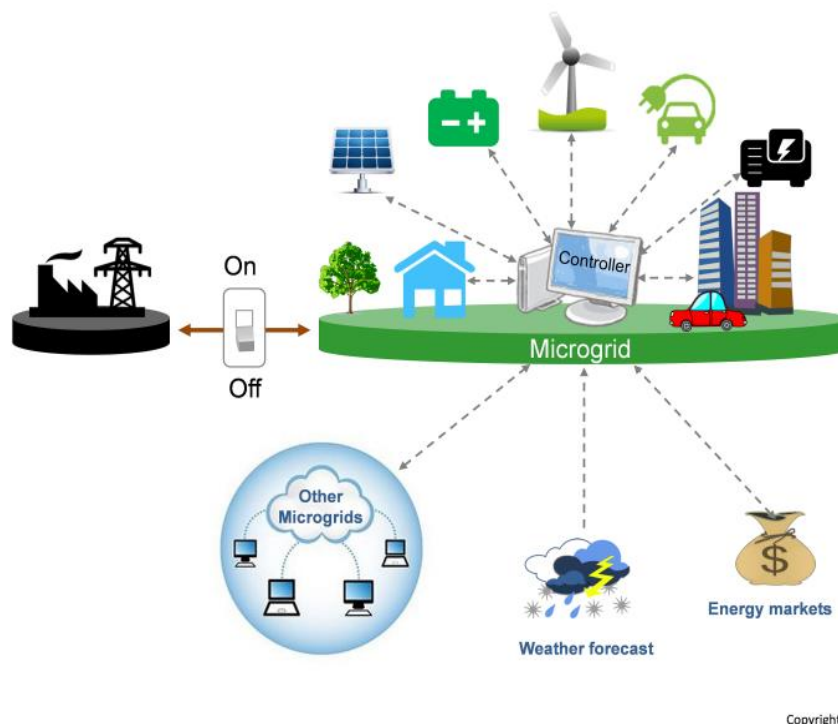


Рис 1.1 Схема MicroGrid

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.1. Характеристики MicroGrid

1.1.1. Властивості генерації та зберігання енергії

Кілька мультидисциплінарних досліджень охоплюють широкий спектр розподілених енергетичних ресурсів, які можуть бути присутні в MicroGrid. Деякі приклади можливих варіантів генерації та зберігання енергії, а також їх переваги та недоліки, наведені в табл. 1.1 [6].

Таблиця 1.1

Категорія	Реалізація	Переваги	Недоліки
Генерація	Дизельні та іскрово запальні двигуни внутрішнього згоряння	<ul style="list-style-type: none">• переносні• швидкий запуск• слідує за навантаженням• може бути використано для комбінованого опалення і електроживлення	<ul style="list-style-type: none">• викиди оксиду азоту та твердих частинок• викиди парникових газів• створює шум
	Мікротурбіни	<ul style="list-style-type: none">• переносні• можливість використовувати різні види палива• низький рівень викидів• механічна простота механізму• комбіноване опалення і електроживлення	<ul style="list-style-type: none">• викиди парникових газів
	Паливні елементи(включаючи тверді оксиди, розплавлені карбонати, фосфорну кислоту та низькотемпературну обмінну мембрану протонів	<ul style="list-style-type: none">• переносні• відсутність забруднення• може бути використано для комбінованого опалення і електроживлення• Більш висока ефективність	<ul style="list-style-type: none">• відносно дорога вартість• обмежений термін служби

	Відновлювальні джерела енергії (сонячні фотоелектричні панелі, малі вітрові турбіни, міні-гідроелектростанції)	<ul style="list-style-type: none"> • відсутні затрати на паливо • Відсутність викидів 	<ul style="list-style-type: none"> • не переносні • відсутність контролю
Зберігання	Батареї (до складу яких входять свинцева кислота, натрій-сульфур, літій-іон і нікель-кадмій)	<ul style="list-style-type: none"> • Процеси розробки і дослідження досі тривають 	<ul style="list-style-type: none"> • Обмежена кількість циклів зарядки-розрядки • Утилізація відходів
	Потокові батареї, або регенеративні паливні елементи (до складу яких входять окисно-відновні цинк-бром, полісульфід бромід, ванадіум)	<ul style="list-style-type: none"> • Розділене зберігання енергії та електроенергії • Здатність підтримувати безперервну роботу при максимальному навантаженні і повній розрядці без ризику пошкодження 	<ul style="list-style-type: none"> • Знаходиться на ранньому етапі впровадження
	Водень, отриманий внаслідок гідролізу	<ul style="list-style-type: none"> • Чистота 	<ul style="list-style-type: none"> • Відносно низька ефективність • Необхідність зберігати водень
	Зберігання кінетичної енергії (маховики)	<ul style="list-style-type: none"> • Швидкий час реакції • Високі зарядно-розрядні цикли • Висока ефективність 	<ul style="list-style-type: none"> • Обмежений час розряду • Високі постійні втрати

Загалом, вибір дизайну MicroGrid буде залежати від конкретних вимог проекту та економічних нюансів. Включення деяких накопичувачів енергії допоможе уникнути помилок, пов'язаних з несправностями у MicroGrid. Оскільки більшість джерел генерації енергії у MicroGrid, що використовується великими синхронними генераторами, не мають інерції, то для зменшення

впливу дисбалансів під час виробництва електроенергії необхідний буфер. Технології зберігання енергії у MicroGrid зараз активно розробляться, а їх кількість дедалі збільшується. Значна увага зосереджена на зберіганні електроенергії; однак зберігання теплової та механічної енергії повинно бути також враховане там, де це доречно. Варто пам'ятати про Можливості технологій зберігання надати допоміжних послуг.

Microgrids часто включають в себе технології, такі як сонячні фотоелектричні панелі (які видають потужність постійного струму) або мікротурбіни (потужність високочастотного змінного струму), які потребують силових електронних інтерфейсів, таких як перетворювачі DC-AC або DC-AC-DC для взаємодії з електричною системою. Інвертори можуть бути використані для регулювання частоти і напруги в MicroGrid в режимі ізоляції. Статичний перемикач підключення-відключення є ключовим компонентом MicroGrid для переходу в режим ізоляції і синхронізації; він може бути запрограмований на дуже швидке реагування на перенапруження, знижену напругу, підвищення частоти, зниження частоти або перевантаження по струму [7].

Інтерфейс з основною мережею може бути реалізовано синхронним з'єднанням по змінному струму або асинхронним з'єднанням з використанням електронного перетворювача потужності постійного струму. Перший підхід має перевагу простоти, тоді як другий підхід електричні параметри електроенергії в MicroGrid (частоти, напруги, гармоніки) і підходить до стратегії тільки для постійного струму.

Оскільки більшість розподілених енергетичних ресурсів (включаючи паливні елементи, сонячні фотоелектричні елементи та батареї) забезпечують або приймають електроенергію постійного струму, а також більшість навантажень, включаючи силову електроніку, освітлення та регулятори частоти обертання, вентиляції та кондиціонування повітря, використовують постійний струм внутрішньо, для того, щоб уникнути втрат від перетворення

постійного струму в змінний (а потім знову в постійний), було запропоновано використання MicroGrid постійного струму. Ці втрати можуть складати від 5% до 15% виробленої електроенергії залежно від кількості зворотних переходів. Крім того, від несправностей в системах постійного струму можна позбутися завдяки блокувальним діодам, а також питання синхронізації, гармонійних спотворень і небажаних зворотних реактивних струмів стає вирішеним. Сітчаста несинхронна архітектура на основі постійного струму спрощує взаємозв'язок з мережею змінного струму і дозволяє пряме plug-and-play підключення у MicroGrid, що також дозволяє додавати компоненти без суттєвої реконструкції.

Варто відзначити, що в той час як прогрес у перспективних ініціативах, таких як «будинки постійного струму», тобто низьковольтні мережі постійного струму для житлових приміщень, був обмежений відсутністю приладів постійного струму та необхідністю мати великі перетворювачі AC-DC, DC чи гібридні AC-DC, MicroGrid мали успіх в морських застосуваннях, центрах обробки даних і так званих MiniGrid (інше ім'я, що використовувалося історично для віддалених MicroGrid), в яких використовуються фотоелектричні сонячні генератори і батареї для зарядки електронних пристроїв, таких як ноутбуки або мобільні телефони.

1.1.2. Керування та функціональні можливості

MicroGrid мають особливі вимоги та можливості управління в межах локального балансування та максимізації економічних вигід. Існує загальна домовленість про те, що керування MicroGrid повинно забезпечувати наступні функціональні вимоги:

- 1) MicroGrid має являтися у комунальній мережі єдиним самокерованим об'єктом;
- 2) можливість забезпечувати керування частотою, як синхронний генератор [8];

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- 3) уникати потоку потужності, що перевищує певне значення;
- 4) регулювати напругу і частоту в межах прийнятних меж під час роботи в режимі ізоляції;
- 5) ділитися ресурсами для підтримки енергетичного балансу;
- 6) переходити в режим ізоляції плавно і бути у змозі безпечно провести повторне з'єднання і ресинхронізуватися з основною мережею.

MicroGrid можна контролювати так само, як і головну велику мережу, тобто за допомогою трирівневого ієрархічного контролю. Контроль частоти і напруги (первинний і вторинний контроль) може бути реалізовано за рахунок використання центрального мікро контролера, який посилає команди на розподілені енергетичні ресурси або децентралізовано, як CERTS, в якому кожен ресурс відповідає місцевим умовам. Крім того, MicroGrid зазвичай включають третинний керуючий рівень, що дозволяє здійснювати економічні та оптимізаційні операції для MicroGrid, головним чином зосереджений на управлінні акумуляторним сховищем, плануванні розподіленої генерації і відправки, керуванні імпортом і експортом електроенергії між MicroGrid і комунальною мережею. Ієрархічні архітектури керування, які керують енергією в межах MicroGrid і обмінюються з основною мережею, були розгорнуті з використанням підходу «мультиагентної системи» в двох європейських MicroGrid, один на грецькому острові Кітнос, а інший у німецькому проекті «Am Steinweg». Дедалі частіше дослідження та розробка MicroGrid зосереджена на додаванні «інтелекту» для оптимізації операційного контролю та участі ринку.

1.2. Фактори, що сприяють розвитку MicroGrid

Фактори, що сприяють розробці та впровадженню MicroGrid в місцях з існуючою електричною мережевою інфраструктурою, поділяються на три

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

великі категорії: енергетична безпека , економічність та інтеграція чистої енергії.

Головним рушієм розвитку MicroGrid у Сполучених Штатах був їх потенціал для поліпшення стійкості (здатність швидко повернутися в початковий стан після виникнення проблеми) і надійність (час протягом якого система працює справно).

У Європі зміни клімату та необхідність впровадження чистої відновлюваної енергії до енергомережі у великій кількості стали вагомими факторами, які стимулювали розвиток MicroGrid. Вчені, які досліджують клімат, прийшли до висновку, що для утримання зросту швидкості зміни середньої температури у світі (понад 2 °С, що сьогодні вважається порогом між «безпечними» та «небезпечними» кліматичними змінами) на до індустріального рівні, людському суспільству необхідно зменшити частку електроенергії, виробленої шляхом спалювання викопних видів палива з 70% (у 2010 році) до 20% до 2050 року. Багато децентралізованих, періодичних і невідправних енергетичних ресурсів було використано, що в свою чергу призвело до проблеми їх інтеграції в існуючу мережу, призначену для одностороннього надходження електроенергії від централізованих електростанцій до навантажень споживачів. Використання періодичних поновлюваних джерел енергії спільно з розташованими поруч гнучкими навантаженнями і технологіями зберігання в MicroGrid дозволяє здійснювати локальне балансування попиту та пропозиції, що робить розповсюджене поширення поновлюваних джерел більш керованим. Замість того, щоб відслідковувати та координувати тисячі або мільйони окремих розподілених енергетичних ресурсів, кожна MicroGrid веде себе у розпорядженні розподільчої мережі як невелике джерело або споживач електроенергії з можливістю модифікувати мережевий профіль навантаження таким чином, щоб бути корисною для основної мережі.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Незважаючи на відмінності в пріоритетності, що надається стійкості у США та забрудненню в Європі, економія палива системою MicroGrid та допоміжні послуги є важливими компонентами бізнес-кейсу в обох областях. Зараз проводяться дослідження та розробки MicroGrid з використанням передових аналітичних підходів з метою максимізації цих переваг у широкому діапазоні критеріїв, включаючи використання землі, використання води, зайнятості, викидів CO₂, інвестиційних витрат та вартості електроенергії.

1.3. Впровадження MicroGrid

Хоча багато було написано про концепцію і перспективи MicroGrid, багато чого можна також дізнатися з прикладів реальних, діючих MicroGrid. За даними Navigant Research, яка відстежує використання MicroGrid з 2011 року, Сполучені Штати були історичним лідером у потенціалі використання. Сьогодні США та Азія мають приблизно однаковий потенціал для функціонування, розробки і використанні MicroGrid, кожна з яких має 42% ринку. Європа складає 11%, Латинська Америка - 4%, а на Близькому Сході та Африці - лише 1%. Загальна потужність складала приблизно 1,4 ГВт у 2015 році і, як очікується, зросте до приблизно 5,7 ГВт (вважається консервативною оцінкою) або 8,7 ГВт (за «агресивним» сценарієм) до 2024 року. Navigant розбиває ринок MicroGrid на наступні сегменти (з % від загальної потужності розгорнутої енергії станом на 1 квартал 2016 року): віддалене використання (54%), комерційне (промислове) використання (5%), спільне використання (13%), комунальне використання (13%) використання в кампусах (9%) і використання військовими (6%) [9]. Слід зауважити, що Navigant Research не відстежує віддалені MicroGrid з дизель-генераторами; для врахування, вони повинні включати щонайменше одне поновлюване джерело генерації енергії.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.3.1. Впровадження MicroGrid в кампусах

Впровадження місцевих генераторів, особливо в умовах комбінованого охолодження, опалення та електроспоживання з кількома навантаженнями, розташованими на території кампуса, що належить одному суб'єкту, досі є успішною моделлю і зазвичай включає найбільші MicroGrid на сьогоднішній день потужністю від 4 до 40 МВт. В'язниця Санта-Ріта, розташована в окрузі Аламеда, штат Каліфорнія, є прикладом використання MicroGrid в кампусі, яка доводить ефективність концепції (використовує концепцію CERTS). Модель проекту в'язниці показано на рис. 1.2.



Рис 1.2 Проект в'язниці Санта-Ріта

MicroGrid включає в себе паливний елемент 1 МВт, 1,2 МВт сонячних фотоелектричних панелей, два дизельних генератора 1,2-МВт, 2-МВт/4-МВт*год літій фосфат залізу систему зберігання (цей хімічний склад відрізняється високою ефективністю АС-АС перетворення і забезпечує поліпшену термічну і хімічну стабільність в порівнянні з іншими технологіями

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

батареї, незважаючи на деякі втрати в енергетичній щільності), швидкий статичний вимикач і конденсаторний банк, що коригує коефіцієнт потужності. Протокол CERTS дозволив всім цим розподіленим енергоресурсам працювати разом під час підключення до мережі та у режимі ізоляції, не вимагаючи спеціального центрального контролера. Здатність, використаного в кампусі, MicroGrid забезпечити зниження пікового навантаження, а також компроміс між оптимізацією форми чистого навантаження для об'єкта та потребами в мережах, був продемонстрований з використанням тюремної системи Санта-Ріта як приклад, використовуючи програмне забезпечення DER-CAM для визначення оптимального планування використання обладнання та відправлення електроенергії [10].

1.3.2. Військові MicroGrid

Економічна енергетична безпека (здатність установки отримати доступ до надійних джерел електроенергії та палива, а також засобів їх використання для захисту та доставки достатньої енергії для вирішення критичних операцій під час тривалого відключення місцевої електромережі) є основною причиною функціонування військових MicroGrid (розробляються також розв'язки поза електромережою для оперативного використання). Прикладом військових досліджень в MicroGrid і показом результатів є Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security (SPIDERS) Joint Capability Technology Demonstration (JCTD) [11], три етапна програма, масштаб і складність якої зростали на кожному етапі. Перший етап відбувся Joint Base Pearl Harbor-Hickam, на Гаваях в 2012 та 2013 роках, який включав в себе один розподільчий живильник, два електрично ізольованих навантаження, два дизель-генератори та сонячні панелі. Другий етап проходив у 2013 та 2014 роках у Fort Carson, штат Колорадо, і включав три розподільчі живильники, сім житлових навантажень, три дизель-генератори, 1-МВт сонячні панелі і 5 двонаправлених електричних зарядних пристроїв. Заключний третій етап, в

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Camp Smith, на Гаваях, закінчився наприкінці 2015 року; в ньому використовувалися нові та існуючі джерела генерації для підтримки навантаження всієї бази.

1.3.3. Житлові MicroGrid

Питання оптимального масштабу MicroGrid є відкритим та активно досліджується. Наприклад, чи краще включати окремих домашніх споживачів у великі MicroGrid спільноти або впроваджувати технології MicroGrid на рівні окремих будинків? Переваги повністю децентралізованих будинків з MicroGrid включають контроль за споживанням енергоресурсів і той факт, що будинки вже підключені до загальної електророзподільної мережі, так що впровадження MicroGrid швидше за все, не завдаватиме суттєвих правових ускладнень, крім тих, що вже виникли для використання сучасних сонячних установок на дахах. У той же час, цей повністю децентралізований підхід, особливо якщо він включає в себе можливості режиму ізоляції, втрачає економічність за рахунок масштабів, а також різноманітності генерації та навантаження, що відбувається внаслідок створення декількох генераторів і навантажень. Наприклад, вартість захисту між мережевих з'єднань може додати до 50% вартості мікро-джерела (тобто обслуговування окремого будинку або малого будівництва), тому краще розмістити декілька мікро-джерел в рамках одного комунального підприємства. Деякі системи передбачають вкладену систему, в якій системи управління енергією будівлі зв'язуються один з одним і головним контролером околиці для координації розподілення енергоресурсів, включаючи спільні енергоресурси громади та навантаження, такі як вуличне освітлення. Модель впровадження MicroGrid в будинки, швидше за все, виграє від інноваційного фінансування (схоже на моделі сонячної оренди) завдяки витратам на виробництво ресурсів, контролерів, силової електроніки та інтеграції з існуючими системами в будівлях. Література, що досліджує так звані «споживчі MicroGrid», розглядає

									Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>				18

технічну доцільність та економічну життєздатність цього способу широкого децентралізованого розміщення житла. Багато з цих досліджень зосереджені на питанні, чи є економічно доцільним отримання повної автономії від електромережі з використанням фотоелектричної та акумуляторної батареї.

Один з варіантів житлових MicroGrid поєднує в собі доступні на ринку системи сонячних панелей на даху, електричні транспортні засоби, повільні та середні зарядні пристрої, а також домашні або сусідні системи зберігання енергії. Протягом дня місцева система зберігання енергії буде використовувати сонячні панелі та протягом ночі енергія буде розряджена в електричні транспортні засоби. Включення систем зберігання енергії зменшує перенапруги протягом дня через надлишкове виробництво електроенергії та знижує напруги протягом ночі, викликано це величезним струмом, що зливається для заряджання автомобіля.

1.3.4. Впровадження MicroGrid у віддалених і сільських місцевостях

Більше 1 мільярда людей у слаборозвинених країнах та країнах, що розвиваються, в даний час не мають доступу до надійного джерела електроенергії або взагалі будь-якої електроенергії. Часто, обмежена електроенергія, яка є у доступі, виробляється з використанням дорогого дизельного палива. Зокрема, для сільських районів у цих країнах електроенергія є ключовим ресурсом для задоволення основних потреб людини, а MicroGrid можуть бути найкращим способом надання цієї електроенергії. Віддалені MicroGrid, що поєднують чисте виробництво та зберігання електроенергії можуть забезпечити комфортне життя цим людям, дозволяючи дітям навчатися в нічний час, жити медичні системи та надавати інші можливості для покращення рівня життя. Ці віддалені MicroGrid використовують ті ж досягнення, що і в розвинених країнах, а саме в енергетичній електроніці, інформаційних і комунікаційних технологіях, а також розподілені енергетичні ресурси. Це дозволяє країнам, що

						Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДС51.5111.005.001 ПЗ	19

розвиваються, потенційно перейти до світу розумних MicroGrid, так само, як мобільні комунікації дозволяли їм з'єднуватися один з одним і з зовнішнім світом, не створюючи великих мереж наземних ліній зв'язку.

Так звані «гібридні» MicroGrid [12], які включають поновлювані джерела енергії, часто як доповнення до систем на основі дизельних генераторів, демонструють великий потенціал для диверсифікації виробництва та зниження витрат на MicroGrid в ізольованих громадах, які покладаються на дорогу імпорту нафту для генерації електроенергії і у віддалених районах, далеких від існуючої інфраструктури електроенергії. Віддалені MicroGrid не потребують однакового підходу до проектування системи; при ретельній оцінці ресурсів та розумінні попиту, проекти можуть бути оптимізовані відповідно до місцевих умов. Однак, слід звернути особливу увагу на вплив мінливості ресурсів на рівень сервісу, а також на рівень технічного обслуговування, необхідний для того, щоб система працювала або зберегла дієздатність у разі відмови генератора. Прикладами досліджень, що стосуються віддалених MicroGrid, Уатакондо в Чилі, Сінсьніа в Сіньцзяні, Китай і Ленкойс в Бразилії.

1.4. Проблеми при впровадженні MicroGrid

1.4.1. Правова та нормативна невизначеність

Існують два ключових юридичних питання, що впливають на MicroGrid: по-перше, чи вважаються вони електричними комунальними послугами розподілення енергії і тому підлягають нагляду державних регулюючих органів; по-друге, навіть якщо вони звільнені від державного регулювання як комунальні послуги, чи вписуються вони в існуючі правові рамки, що регулюють продаж і купівлю електроенергії та права на виробництво та розподіл електроенергії? Необхідна чітка юридична ідентифікація MicroGrid для досягнення нормативної визначеності, необхідної для того, щоб проекти

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

MicroGrid були вартими для вкладу капіталу в них, інакше потенційні витрати занадто високі, а вигоди занадто невизначені, щоб виправдати інвестування часу та грошей [13]. Кілька штатів у США провели оцінку як MicroGrid вписується в існуючі правову та нормативні бази, що стосується виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Отримані дані дають можливість оцінити та зрозуміти проблем, з якими будуть зустрічатися держави в майбутнього з системами розподілу електроенергії.

1.4.2. Політика взаємоз'єднання

Одним з основних джерел правової невизначеності є закони, що регулюють підключення розподілених енергетичних ресурсів до мережі. Після дерегуляції в Сполучених Штатах наприкінці 1990-х років не існувало загальнонаціональних стандартизованих вимог до малих незалежних виробників електроенергії для підключення свого обладнання до електромережі. Виробникам і розробникам проектів доводилося мати справу з переліком вимог, які для різних комунальних підприємств були різними, що додавало значних витрат і часу до процесу розробки MicroGrid. Розробка стандарту IEEE 1547 (випущеного у 2003 році) була важливим кроком для узгодженого набору правил для безпечної інтеграції розподілених енергетичних ресурсів (<10 МВА) у мережу [14]. До недавнього часу основна увага Політика взаємо з'єднання розподілених енергетичних ресурсів, включаючи IEEE 1547, полягала в забезпеченні того, щоб ці ресурси були від'єднанні у випадку відмови мережі (так звана ситуація «ненавмисного переходу в режим ізоляції») для захисту безпеки працівників лінії. Це було до того часу, поки IEEE не затвердила стандарт 1547.4 в 2011 році, згідно з яким стандартизовані протоколи стали доступні і могли забезпечити безпечний *вимушений* перехід в режим ізоляції і повторне підключення систем MicroGrid. IEEE 1547.4 включає в себе правила для планування, проектування, експлуатації та інтеграції розподілених ресурсів в ізольованих систем в межах

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

більшої комунальної мережі. Він охоплює функціональні можливості MicroGrid, включаючи роботу в режимі з'єднання з мережею, навмисний перехід до режиму ізоляції, роботу в режимі ізоляції і повторне підключення до загальної мережі із потрібними значеннями напруги, частоти і фази. IEEE 1547.4 також охоплює питання безпеки, захисту, моніторингу, зв'язку, контролю та якості електроенергії. California Rule 21 також розглядає вимоги щодо взаємо з'єднання, щоб допомогти усунути перешкоди, які раніше були створені постачальниками комунальних послуг, встановлюючи стандартизовані вимоги до технологій та розмірів, чіткий процес перегляду, процедури тестування та сертифікації, регулюючи податки та роблячи простішим використання. Взаємозв'язок є надзвичайно важливим: якщо MicroGrid не можуть з'єднатися з комунальною мережею, вони повинні працювати постійно в режимі ізоляції, не маючи можливості отримувати переваги від користування загальною мережею, які вони могли б забезпечити, а також втрачається економічна вигода.

1.4.3. Проблема комунальних послуг

MicroGrid, ймовірно, буде виступати в ролі електричної корпорації, якщо вона має намір обслуговувати декількох, не пов'язаних, роздрібних клієнтів, перетинати публічні шляхи ліній електропередачі та буде отримувати право на використання від місцевих органів влади. Причини для цього висновку детальніше розглядаються нижче. Якщо комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики і комунальних послуг, вирішить, що послуги, що надаються MicroGrid, кваліфікують їх як комунальні послуги, то ця комісія може регулювати тарифи за електроенергію і вирішувати, чи слід затверджувати будівництво об'єкта, серед інших схожих об'єктів. Це все впливає на розробників і власників MicroGrid. У випадку, якщо MicroGrid вважається комунальним підприємством розподілення енергії, вона може взяти на себе зобов'язання по обслуговуванню, а це означає, що вона буде

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

зобов'язана надавати послугу за письмовим чи усним запитом потенційного роздрібного клієнта.

Всі MicroGrid, які мають намір використовувати публічні шляхи розподілу електроенергії споживачам (наприклад, передача теплової енергії або електроенергії через громадську вулицю), вимагають дозволу місцевих муніципальних органів влади. Цей дозвіл може бути у формі правового дозволу або іншого виду дозволу. Можливість MicroGrid отримати цей дозвіл в значній мірі залежить від того, чи мало раніше існує електричне комунальне підприємство правовий дозвіл. В Нью-Йорку, наприклад, якщо існує підприємство є не єдиним, державне законодавство все ще вимагає, щоб конкурентний процес використовувався для визначення грант отримувача правового дозволу, дозволяючи діючим особам та іншим постачальникам послуг конкурувати з розробником MicroGrid для отримання правового дозволу.

Внаслідок їхнього малого масштабу і обмеженого обсягу послуг, малоімовірно, що для використання MicroGrid необхідно мати правовий дозвіл і тому більшість MicroGrid не підпадають під юрисдикцію регуляторного органу комунальних підприємств; однак, ці справи вирішуються в кожному окремому випадку в суді. Крім того, для продажу MicroGrid роздрібним клієнтам, можливо, доведеться дотримуватися різних законів захисту прав споживачів. Незалежно від їх статусу в ролі підприємства розподілення електроенергії, MicroGrid, які виробляють енергію через згоряння палива (такі як мікротурбіни або дизельні генератори) підпадають під федеральні і державні закони, що регулюють викиди, для них буде необхідно отримувати дозвіл за певних умов. Вибір бізнес-моделі або моделі власності також вплине на ступінь, в який вступатимуть у дію правовий дозвіл чи інший дозвіл.

Сьогоднішні нормативні акти, що регулюють електроенергетику у Сполучених Штатах, відображають процес, який називають

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

«реструктуризацією», а розмовною - «дерегуляція», що відбувалася в середині-кінці 1990-х років у багатьох штатах США, слідуючи прикладу дерегуляції в інших основних галузях, таких як авіалінії, залізниці, телекомунікації та інші [15]. В цілому, реструктуризація передбачала розділення функцій генерації, передачі та розподілу електроенергії раніше існуючих монополій. У випадку Нью-Йорка, генератори можуть продавати електроенергію на конкурентних оптових ринках або безпосередньо місцевим комунальним підприємствам або роздрібним торговцям для перепродажі клієнтам. Системний оператор (у випадку з Нью-Йорком, NYISO) відповідає за підтримку балансу між попитом і пропозицією в будь-який час. Екосистема гравців в реструктуризованому ринку електроенергії в Нью-Йорку включає в себе невеликі генеруючі компанії, які називаються Незалежними виробниками електроенергії. MicroGrid як такі не вписуються в класи учасників ринку, які визначаються шляхом реструктуризації, можливо, тому, що вони виходять за рамки категорій генерації, передачі та розподілу. Як наслідок, необхідна подальша робота для їх включення до нормативно-правової структури.

1.4.4. Опозиція з боку комунальних підприємств

Незважаючи на те, що клієнти, які використовують MicroGrid, залишаються підключеними до електромережі завжди, крім випадків несправностей в ній, споживання власної електроенергії, що виробляється MicroGrid, може знизити дохід, який є необхідним для функціонування комунальної інфраструктури. Існує також небажання додавати великі обсяги розподілених енергоресурсів до мережі через можливі проблем управління, безпеки та захисту. Як наслідок, багато комунальних підприємств намагаються запровадити додаткові податки для власників відновлюваних джерел енергії та погрожують припинити надавати їм ряд послуг. У рамках цієї реструктуризації комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг, мають повністю відокремити послуги з

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

генерації, передачі та розподілу, а також дозволять незалежним виробникам конкурувати на оптових (і потенційно роздрібних) ринках. Ціни на електроенергію в режимі реального часу або часу користування стануть нормою для того, щоб MicroGrid отримували економічні сигнали, які вони потребують, щоб керувати своїми джерелами енергії, щоб надавати мережеві послуги, такі як регулювання частоти, позбутися перевантажень, а також максимізувати власні доходи. Однак реструктуризація комунальних послуг не була універсальним явищем, і прогрес уповільнився різко після проблем, що виникли в Каліфорнії на початок 2000-х років [15].

Навіть для дерегульованих комунальних підприємств структура ринків електроенергії та спосіб, за яким комунальні підприємства отримують дохід за надання послуг (з використанням так званого обліку витрат на обслуговування), як і раніше, є перешкодою для розподілених енергетичних ресурсів в цілому, включаючи MicroGrid. Розділення доходів електричних компаній від продажу електроенергії, що вже зроблено в 14 штатах США, є важливим кроком на шляху до усунення опору комунальних підприємств що до MicroGrid, який базується на так званій спіралі смерті комунальних підприємств (коли широке розповсюдження призводить до зменшення попиту на електроенергію, що, в свою чергу, призводить до підвищення витрат на електроенергію для традиційних споживачів, на стільки, що комунальне підприємство не може оплатити вартість електроенергії, необхідну йому самому для роботи).

Потенційне вирішення проблеми полягає в тому, щоб перейти від традиційної парадигми вартості послуг до підходу, що базується на продуктивності, який визнає, що комунальна мережа має забезпечити функції, які значно відрізняються від тих, за які вони історично відповідали, таких, як стійкість, безпека і чистота. У цій новій парадигмі комунальні підприємства будуть стимульовані проводити модернізацію інфраструктури та підвищувати її ефективність, на відміну від продажу максимальної кількості кіловат-годин.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Декілька штатів США взяли на себе зобов'язання сформулювали власні плани щодо модернізації своїх мереж та ринків електроенергії для забезпечення більш надійної, ефективної та чистої електроенергії своїм клієнтам. Такі країни, як Велика Британія, також розробляють плани розвитку мережі в більш чисту, безпечну та таку, що буде використовувати розподілені енергетичні ресурси; вивчають соціальні, правові та регуляторні фактори, які допомагають або перешкоджають цьому переходу [16].

Комунальні підприємства також приходять до думки, що вони можуть бути добре проявити себе, якщо комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики і комунальних послуг, дозволить надавати послуги з MicroGrid своїм існуючим клієнтам, оскільки вони володіють великими знаннями, інфраструктурою збуту, а також правовими дозволами від місцевих органів влади. Електротехнічні підприємства почали випробовувати MicroGrid в лабораторних умовах. Одним з прикладів є Duke Energy, який має дві тестові MicroGrid: одна в Гастон, Північна Кароліна і одна в Шарлотт, Північна Кароліна. Перша установка зосереджена на взаємодії та побудові партнерства з виробниками; друга, була побудована для випробування можливостей віртуальної електростанції, це сонячна фотоелектрична та зберігаюча MicroGrid, яка обслуговує пожежну станцію. Партнерство між командою CERTS та American Electric Power для розробки тестового набору CERTS є продуктивною моделлю партнерства між промисловістю та урядом. Інші комунальні компанії, такі як державна Arizona Public Service, Consolidated Edison, Commonwealth Edison, Green Mountain Power, NRG Energy, San Diego Gas та Electric and Southern California Edison [17] також досліджують MicroGrid як спосіб надання додаткових послуг клієнтам, залучити капіталовкладення, підвищити загальну надійність та справлятися з потенційними порушеннями в своїй бізнес-моделі.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1.5. Перспективи MicroGrid

1.5.1. Розумні мережі

Незважаючи на те, що MicroGrid є кращим підходом для врегулювання місцевих проблем, вона в майбутньому може перерости в SmartGrid, можливо, що суспільство знайде парадигми архітектури сітки, такі як «Smart SuperGrids» або «віртуальні електростанції» - які не мають локального балансування генерації і навантажень або ізольованих сегментів сітки, які будуть кращими архітектурами. На рис. 1.3. показано схему SmartGrid.

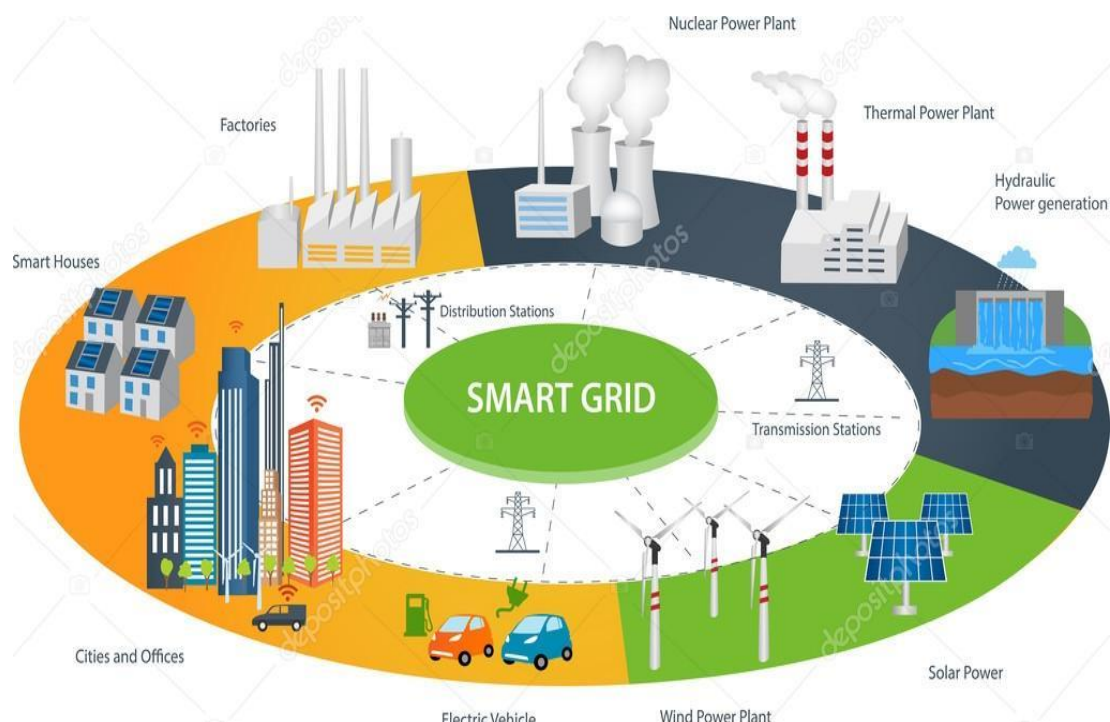


Рис 1.3 Схема SmartGrid

Smart SuperGrids покладаються на вдосконалені засоби виявлення несправностей, ізоляції та відновлення для усунення перевантажень, прокладання потужності навколо несправностей та скорочення часу відновлення від відключень. Віртуальні електростанції покладаються на програмне забезпечення та аналітику для управління широко розповсюдженими розподіленими енергетичними ресурсами, хоча MicroGrid,

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

підключені до мережі, також можуть функціонувати як віртуальні електростанції, як згадувалося вище. Нові інформаційні та комунікаційні розробки, відомі як Інтернет речей, також сприяють створенню децентралізованої, так званої, транзактивної платформи енергетичного ринку, де індивідуальні розподілені енергоресурси та навантаження можуть пропонувати покупку та продаж електроенергії один одному [18]. Те чи стануть MicroGrid домінуючим напрямком впровадження великої кількості переривчастих відновлюваних джерел і те чи підвищують вони стійкість, залежить від того, чи будуть переваги сприйматися як достатньо великі по відношенню до витрат у порівнянні з альтернативними парадигмами інтелектуальних мереж. Цілком можливо, що навіть у ситуаціях, коли існує низька значення стійкості та надійності режиму ізоляції, вважатиметься вигідним розміщувати активи віртуальних електростанцій в мікрогрідоподібних архітектурах.

1.5.2. Структура ринку та децентралізація

Проект ЄС «More MicroGrids» [19] представив чотири різні сценарії володіння ресурсами MicroGrid, включаючи: володіння оператором системи розподілення, де оператор володіє системою розподілу і відповідає за роздрібний продаж електроенергії кінцевому споживачеві; володіння кінцевого споживача або навіть консорціуму посередників (суб'єкти, що імпортують і експортують електроенергію); володіння незалежним виробником електроенергії; або володіння енергопостачальника в умовах вільного ринку. За даними Navigant Research сьогодні більшість мережевих MicroGrid належить і фінансується власниками підприємств, особливо кампусами. Важливо визнати, що MicroGrid, особливо громадські, можуть використовувати існуючу інфраструктуру системи розподілу, радикально знижуючи їхні витрати.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Було запропоновано три моделі залучення власників енергетичних ресурсів в загальну мережу: власник-власник, власник-мережа, спільна власність. У моделі власник-власник, можливо, найбільш віддаленій від сьогоденної централізованої моделі мережі, основна платформа підтримуватиме здатність виробників електроенергії та споживачів безпосередньо купувати та продавати електроенергію та інші послуги один в одного, при цьому плата переходить до менеджера розподільчої мережі для надання послуг з розподілу. Пілотні проекти цього типу починають з'являтися в таких місцях, як Бруклін, Нью-Йорк, Нідерланди і Великобританія. Дослідники, практикуючі фахівці і навіть великі європейські енергетичні компанії для застосування зарядки електричних транспортних засобів починають застосовувати безпечні платформи зв'язку, такі як блокчейн на основі ринків енергетики.

Одним з напрямків діяльності є ринок регулювання напруги в розподільних мережах з MicroGrid. Деякі дослідники пропонують, щоб кожна MicroGrid в майбутній мережі багатьох MicroGrid діяла як віртуальна енергетична установка - тобто як єдиний розподілений енергетичний ресурс - з центральними контролерами в кожній MicroGrid (припускаючи централізовану архітектуру управління), що надає енергію та допоміжні енергетичні послуги зовнішній система, заснована на агрегації заявок від розподілених енергетичних ресурсів в MicroGrid (реагуючі навантаження, мікро генератори та запам'ятовуючі пристрої). Вони розуміють, що оператор системи розподілу володіє ринковими даними реактивної потужності на добу вперед, який необхідний для передачі енергії від великих генераторів до клієнтів через радіальну мережу передачі та розподілу, і пропонують механізм для оптимального врегулювання ринку.

Інноваційні бізнес-моделі, такі як придбання електроенергії або угоди про енергетичні послуги, а також проектно-побудована власна експлуатація, ймовірно, відіграватимуть велику роль у здатності MicroGrid до розширення.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Після того, як розробка та постачання MicroGrid стануть більш раціоналізованими, угоди про купівлю електроенергії матимуть велику роль на ринку MicroGrid. В даний час угоди про купівлю електроенергії є дуже успішною бізнес-моделлю на сонячних фотоелектричних житлових і комерційних ринках США, оскільки вони можуть бути використані для взяття податкових та інших пов'язаних стимулів, уникаючи при цьому великих капітальних витрат на об'єкт, що володіє системою. Інфраструктура в угоді про купівлю електроенергії є власністю третьої сторони і передається в оренду клієнтам для надання електроенергії та пов'язаних з ними послуг кінцевим споживачам. У випадку MicroGrid можна підвищити рівень безпеки, надійності та стабільності, а також отримати економічні переваги, такі як економія енергії. У випадку об'єднаних проектів охолодження, теплопостачання та енергопостачання, тепла енергія може бути включена в угоду про купівлю електроенергії разом з електроенергією. Доцільно очікувати, що технічне обслуговування буде включеним в угоду про купівлю електроенергії, оскільки доходи від угоди залежать від систем, що реалізує свій потенціал [11].

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

2. МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ

2.1. Причини відсутності даних у MicroGrid

У роботі розглянуто методи відновлення відсутніх даних для короткотривалих та довготривалих періодів часу, беручи до уваги погодні умови, а також різні можливі режими роботи самої системи. До основних причин відсутності даних у таблицях відносяться наступні. По-перше, це – відсутність частини метеорологічних даних, в той час як електричні дані відомі. Наприклад, відсутність даних про температуру чи вологість повітря через несправність відповідних датчиків. Ці причини є типовими для домашніх чи комерційних систем малої потужності, де власники часто економлять на встановленні якісних метеорологічних датчиків. Наступна причина – переривання, несправності у роботі систем моніторингу електричних даних. Наприклад через пошкодження кабелів, по яким передається інформація, або через несвоєчасне обслуговування електричного обладнання. Третя причина – несправність у роботі обох підсистем, які можуть виникнути у зв'язку з проблемами у передачі даних, або через проблеми у роботі апаратного чи програмного забезпечення. Останні дві причини втрат даних є типовими для систем, до складу яких входить велика кількість сонячних панелей. Четверта причина – особистісні особливості людини як власника енергетичного ресурсу. Дії окремих осіб впливають на функціонування системи. Рівень їх впливу на систему залежить від таких визначальних в даному аспекті особистісних якостей, як: інтелектуальний рівень; рівень самооцінки; полнезалежність, рівень професійної підготовки [20]. Отже, постає задача вибору методу відновлення даних, який в процесі відновлення даних буде враховувати причини їх відсутності.

Відтворити дані можна різними способами, наприклад методом копіювання даних за попередні періоди часу, однак при такому підході

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

похибка відтворення буде значною і не будуть враховані процеси генерації енергії у сонячних панелях.

Дуже часто для відновлення даних використовують стандартні математичні методи, а саме інтерполяцію, сплайн інтерполяцію, лінійну регресію, метод найближчих сусідів та інші.

Недоліком цих методів є те, що вони не враховують процеси генерації енергії. Однак, на основі цих математичних методів виникають нові методи і алгоритми, які намагаються враховувати ці процеси. Стандартні і нестандартні методи відтворення даних будуть розглянуті далі.

2.2. Методи відновлення даних

Математичні методи зазвичай відновлюють відсутні дані за допомогою інтерполяції, регресії, усереднення.

У програмному середовищі Matlab існує функція `fillmissing` для роботи з таблицями даних, яка може відновити дані за одним із, доступних для вибору користувачем, методом відновлення даних.

Для того, щоб викликати функцію, використовується наступний синтаксис: $F = \text{fillmissing}(A, \text{method})$, де A – таблиця з неповними даними, `method` – метод, за яким дані будуть відновлюватися, F – таблиця з повними даними, отримана в результаті виклику функції.

Типовими методами функції є: `previous`, `next`, `nearest`, `linear`, `spline`, `pchip`, `movmean` та `movmedian`.

На рис. 2.1 наведено графічну ілюстрацію відновлення функції синуса за допомогою лінійної інтерполяції.

На рис. 2.2 наведено графічну ілюстрацію даних за допомогою усереднення `movmedian`.

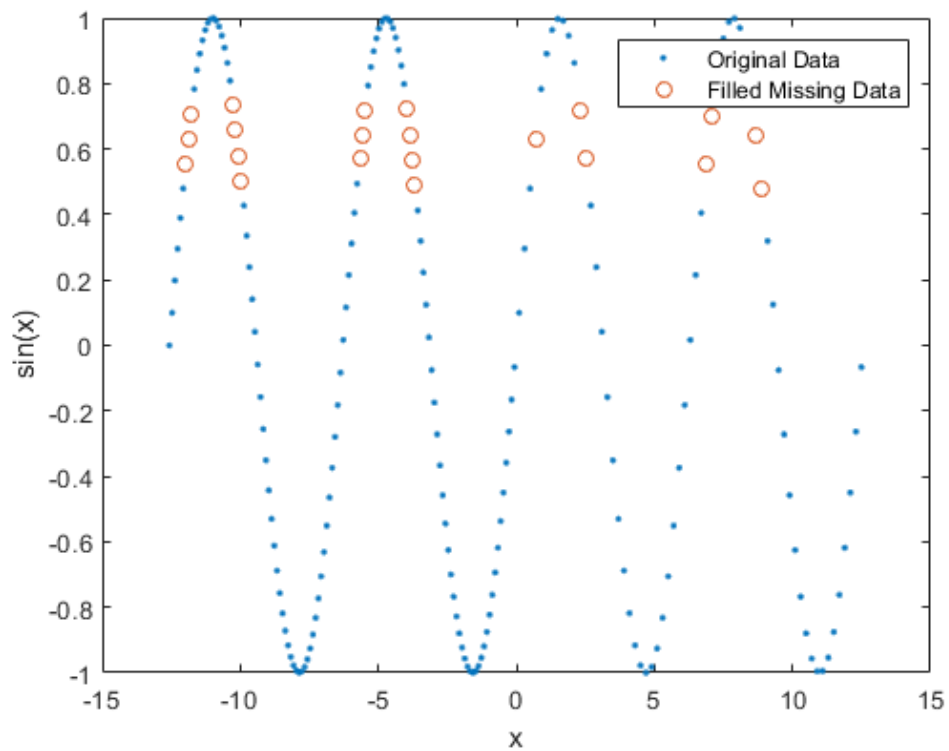


Рис 2.1 Відновлення даних за допомогою лінійної інтерполяції

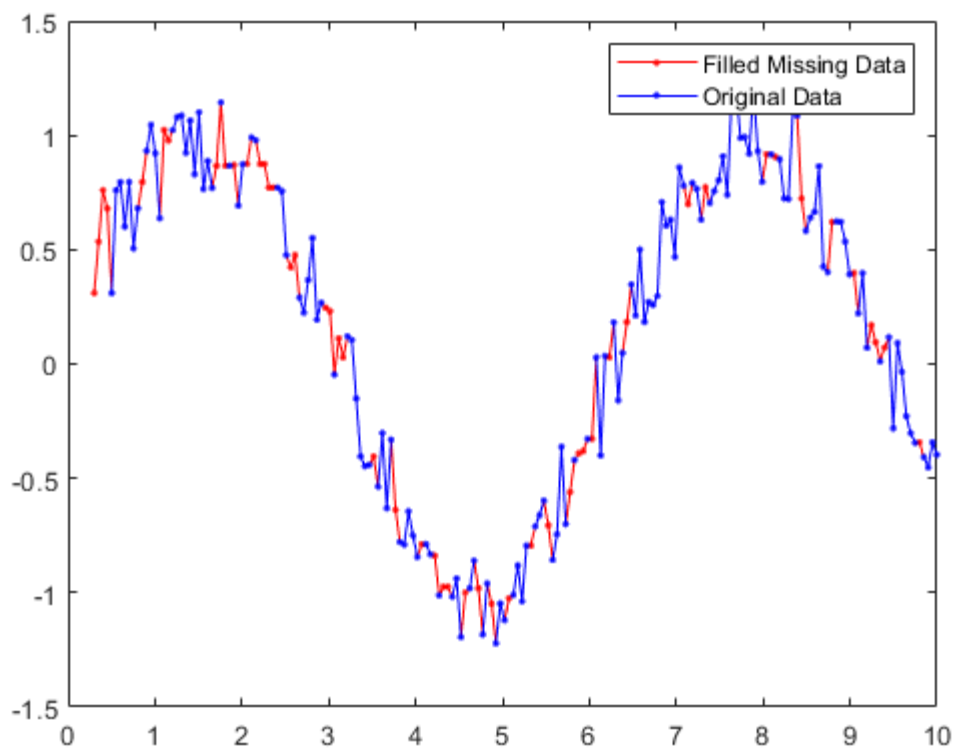


Рис 2.2 Відновлення даних за допомогою усереднення

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розглянемо метод синтезу метеорологічних даних як один із методів відтворення даних.

Нижче наведені основні етапи методу, що дозволяє синтезувати метеорологічні дані і на їх основі відновити відсутні дані [21].

На першому етапі виконується синтез даних про величину сонячного випромінювання, яке досягає земної поверхні, застосовуючи просторову інтерполяцію (Kriging) даних з мережі метеорологічних станцій. Необхідно мати щогодинний доступ до цих даних. Одним з параметрів навколишнього середовища, що синтезується за допомогою просторової інтерполяції є температура.

Оцінка сонячного випромінювання, яке отримує сонячна панель безпосередньо, може здійснюватися різними методами, але найбільш точними є методи розділення випромінювання на частини і визначення їх впливу на генерацію енергії. Це здійснюється за допомогою двоступеневого методу. На першому етапі за допомогою алгоритму поділу на пучок і дифузні компоненти відбувається поділ суцільного сонячного випромінювання на основну частину, а також на дифузійні частини, які дифундують з основної внаслідок процесів, пов'язаних, наприклад, з неоднорідністю повітря.

На другому етапі за алгоритмом визначається кількість сонячного випромінювання, яке отримує сонячна панель безпосередньо, враховуючи процеси дифузії, та різні кути нахилу сонячних панелей. Ці два кроки можуть бути замінені одно кроковим методом з використанням нейронної мережі. Температура навколишнього середовища та енергія на виході сонячної панелі в подальшому обчислюється за синтезованими даними про сонячне випромінювання.

На третьому етапі проводиться розрахунок температури сонячної панелі. На цьому етапі використовується модель Росса [22]. Параметр k –

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

коефіцієнт Росса, видозмінений температурний опір, спочатку визначається з використанням експериментальних даних та даних, отриманих в минулі роки для температури навколишнього середовища, температури сонячної панелі і щільності випромінювання.

На останньому етапі проводиться розрахунок енергії на виході сонячної панелі. Для цього кроку використовується модель, описана в [22]. При цьому використовуються коефіцієнти електричної моделі, які отримують шляхом підгонки експериментальних даних про потужність, освітленість і температуру, взяті з періоду моніторингу (експериментального періоду), близького до даного періоду, оскільки це фіксує стан системи і враховує деградацію і інші зміни [21].

2.3. Метод на основі емпіричних ортогональних функцій

Всі застосування емпіричних ортогональних функцій (EOF) в основному використовують той факт, що EOF дозволяють розкласти сигнал на ряд даних, заснованих на ортогональних функціях, які побудовані таким чином, що лише деякі з цих функцій дозволяють оптимально реконструювати початковий сигнал [23].

Метою даної роботи є аналіз проблеми відсутності або ненадійності даних в MicroGrid та їх аналізу за допомогою EOF. Пропонується алгоритм на основі EOF в класичному його розумінні (має змогу працювати з набором комплексних даних), хоча можливим є використання EOF в більш загальному розумінні, як, наприклад, метод на основі розширених EOF, метод на основі затримки EOF, сингулярний аналіз спектру або інші його видозміни. Для ясності і розуміння, увагу буде зосереджено на рівномірних просторово-часових таблицях даних; для неоднорідних таблиць може бути використано підхід Норта або Шена (при цьому дискретна задача замінюється на неперервну інтегральну задачу, дозволяючи виміряти дані відповідно до

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

пов'язаного з ними просторового або часового покриття), які можуть використовуватися для роботи з числами в дискретному рівномірному просторі.

Припускаємо, що матриця вхідних даних X , яка побудована таким чином, що елемент i, j матриці називається $(X)_{ij}$ і задається значенням поля $f(r, t)$ в місці r_i і момент t_j :

$$(X)_{ij} = f(r_i, t_j). \quad (2.1)$$

Поле f є полем вхідних даних і містить, таким чином, всі неточності (інструментальні, невизначені структури і т.д.). Можемо записати матрицю як послідовність векторів у n стовпцях

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.2)$$

де кожен з векторів стовпців x_j є дискретним вектором стану розміром m в момент t_j . Вектор стану може бути полем одиничної розмірності, впорядкованим набором двомірних значень тощо. Для значень вектору стану не стоїть вимога бути реальним, вони може містити комплексні значення, в такому випадку дозволяється застосовувати комплексні EOF до 2D-векторів, перетворення Фур'є, перетворення Гілберта тощо. EOF можна потім легко обчислити за допомогою стандартних методів розкладання сингулярних значень (SVD), які ґрунтуються на методах [24], що вирішують наступну задачу пошуку власного значення:

$$Xv = \rho u, \quad (2.3)$$

$$X^* u = \rho v. \quad (2.4)$$

Перша система має розмірність m (як власний вектор u і дискретна змінна стану x) і друга має розмірність n (як власний вектор v). u часто називають просторовою EOF, а v - часовою EOF, а ρ - так зване сингулярне значення. X^* - спряжено-транспонована до матриці X .

Замість того, щоб вирішувати рівняння (3) і (4), можна вирішити

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$XX^* u = \rho^2 u, \quad (2.5)$$

$$X^* X v = \rho^2 v, \quad (2.6)$$

показуючи, що просторові моди u є власними векторами усередненої за часом коваріаційної матриці XX^* , в той час як v - власні вектори просторово-усередненої коваріаційної матриці $X^* X$.

Власні вектори нормалізуються ортогонально завдяки рівнянням (2.5) і (2.6):

$$u_i^* u_j = \delta_{ij}, \quad (2.7)$$

$$v_i^* v_j = \delta_{ij}, \quad (2.8)$$

де δ_{ij} - символ Кронекера (з значенням 1, якщо $i = j$ і 0 в інших випадках). Для просторових патернів u_i , ми отримуємо ортогональність, в той час як для часового патерну v_i ортогональність називають часовим рядом $i - o_i$ EOF, не пов'язаних з іншими EOF.

Як тільки власні вектори та власні значення відомі (число власних значень відмінних від 0 є рангом $q \leq \min(m, n)$), ми можемо розкласти початкову матрицю наступним чином:

$$X = UDV^* = \sum_{k=1}^q \rho_k u_k v_k^*, \quad (2.9)$$

де ми маємо для матриці X визначені матриці U і V таким чином, що вони мають в ролі стовпців i власні вектори u_i і v_i відповідно, що відповідають сингулярному значенню ρ_i . Матриця D є прямокутною матрицею, єдині ненульові значення якої знаходяться на її діагоналі, причому $(D)_{ij} = \rho_i \delta_{ij}$. Використовується класична умова упорядкування власних значень у порядку убутання (від більших до менших). Використання розкладання SVD порівняно з будь-яким іншим ортогональним розкладанням обирається у зв'язку з тим, що якщо замість використання всіх q власних

значень і власних векторів, ми використовуємо тільки перші k з них, можна показати що для заданого числа мод k , інший вибір базових векторів u_i не призводить до кращого наближення реальної матриці X , ніж урізаний ряд, отриманий з k перших EOF. Це означає, що тільки при збереженні однієї моди, відповідною EOF (з її розвиненням) є та, яка в середньому дозволяє найкраще апроксимувати матрицю X заданою просторовою структурою (просторові EOF), амплітуда якої змінюється в часі). Мірою того, наскільки добре мода EOF відтворює сигнал, міститься в сингулярних значеннях

$$\text{trace}(XX^*) = \text{trace}(X^*X) = \|X\|_2^2 = \sum_{k=1}^q \rho_k^2. \quad (2.10)$$

Формула є мірою загальної дисперсії (також іноді називається енергією) в системі. Відношення $f_k = \rho_k^2 / \sum_{k=1}^q \rho_k^2$ є мірою дисперсії, що міститься в k -ій моді порівняно з загальною енергією і часто говориться, що k -та мода відображає $100f_k\%$ дисперсії і що перші K мод відображають $100 \sum_{k=1}^K \rho_k^2 / \sum_{k=1}^q \rho_k^2\%$ загальної дисперсії. Це співвідношення часто є основним для вирішення кількості EOF, необхідних залишити для даної декомпозиції. Типовим вибирають залишити ті моди, які сумарно відображають 95% сигналу. Іншим вибором для оптимального усічення є так звані критерії Прейзендорфера та Оверленда: у цьому випадку за методом Монте-Карло, що генерує випадкові матриці одного розміру, вирішується, коли чистий шум, ймовірно, буде інтерпретуватися як сигнал, якщо ряд не є усіченим.

Для завершення загального опису розкладання EOF можна згадати, що при роботі на EOF або коваріаціях, деяке апріорне фонове поле або тенденція віднімається з ряду даних, зокрема, для легкого тлумачення власних значень у терміни енергії мінливості (див. рівняння 9). Заради симетрії в термінах просторових або часових координат, припускаємо, що апріорне середнє ми

вилучаємо з поля (для того, щоб працювати з аномаліями) є просторово-часовим усередненням всіх доступних даних.

Представлений вище метод SVD припускає, що матриця X ідеально і повністю відома. Наразі, коли йдеться про відсутні або недостовірні дані, можна заповнити відсутні дані, використовуючи об'єктивні методи аналізу або оптимальну інтерполяцію: звичайно, проблема при такому підході в тому, що необхідно володіти для інтерполяції інформацією про кореляційну функцію і відношення сигналу даних до шуму даних. Оскільки метою застосування EOF часто є сам аналіз даних, інші попередні аналізи даних не являються дуже природними і вводять апріорну інформацію в подальший аналіз EOF. Цей метод відтворення (і його варіанти, які використовують більш прості інтерполяційні методи) є найбільш часто використовуваним для оцінки відсутніх значень даних, оскільки він полягає у застосуванні класичного інструменту аналізу в якості попередньої обробки перед використанням будь-якого аналізу SVD або EOF.

Інший метод для роботи з відсутніми даними полягає у розрахунку власних значень і власних векторів кореляційної або коваріаційної матриці C , де коваріація обчислюється, використовуючи тільки доступні дані. Однак це не обов'язково приводить до напівпозитивної визначеної коваріаційної матриці (оскільки вже не можна записати $C = X^* X$, що приведе до завжди позитивної визначеної форми $x^* C x$, де x є вектор стовпця). Тому його власні значення можуть бути негативними. Оскільки енергія системи пов'язана зі слідом коваріаційної матриці, який дорівнює сумі його власних значень, що можуть мати негативні власні значення, то інші власні вектори матимуть більш високі власні значення, ніж насправді, таким чином переоцінюючи відповідну амплітуду EOF. Крім того, щойно власні значення і власні вектори розраховані, все ще стоїть проблема вирішення, які EOF є актуальними. Через наявність негативних сингулярних значень критерії відбору не можуть більше

									Арк.
									39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДС51.5111.005.001 ПЗ				

покладатися на відносну важливість власних значень, але слід також враховувати вплив негативних власних значень на розподіл більших власних значень. Більше того, використання часових замість просторових коваріаційних матриць (заснованих тільки на усередненні наявних даних), як правило, призведе до різних власних значень (а отже і сингулярних значень), хоча і є математичним аналогом для кореляції матриця на основі XX^* або X^*X дає ідентичні результати. Інший спосіб тлумачення цього може бути заснований на допущенні, що коефіцієнти EOF (добуток сингулярного значення і часової EOF) векторів з відсутніми даними не можуть бути просто отримані точковим добутком, але його необхідно оцінити методом найменших квадратів.

Оскільки обидва підходи (заповнення або кореляція розрахована лише з доступних даних), які найчастіше використовуються, містять деякі суб'єктивні компоненти (вибір методів інтерполяції і параметри інтерполяції, значимість EOF), будь-який метод, який не потребує такого додаткового вибору може бути цікавим. Розробка такого методу є метою нинішню роботу, яка буде представлена наступним чином. Спочатку ми представляємо метод інтерполяції і проаналізувати, як він змінює дані у відсутніх точках даних у розділі. Далі буде вирішено проблему визначення оптимальної кількості EOF, які необхідно зберегти.

Далі буде представлено алгоритм, який має на меті заповнити прогалини в наборах даних і визначає структура та кількість значимих EOF.

В основному, оскільки EOF повинна дуже ефективно підсумувати сигнал і виявляти когерентні особливості, можливим є використання саме EOF для інтерполяції. Якби були відомі домінуючі EOF даного поля і їх амплітуди, їх комбінація також дасть нам значення поля у відсутніх точках даних.

2.3.1. Інтерполяція на основі EOF

Великомасштабні EOF не повинні підпадати під вплив локальних зміни в кількох точках і тому одна можна спробувати розрахувати EOF на основі матриці, в якій перша приблизна оцінка змінної використовується у відсутніх точках даних. Потім, як тільки великомасштабні EOF і їх амплітуди розраховані вони можуть служити для розрахунку значення поля у відсутніх точках. Тоді, звичайно, самі EOF можуть бути повторно перераховані, і процес може бути повторений до зближення. Перша з проблем є рішенням щодо кількості N відповідних EOF, які варто зберегти для повторного відтворення сигналу в відсутніх точках даних. Формально алгоритм може бути описаний наступним чином:

Нехай I - масив дискретних точок, де дані відсутні, тобто коли $(i, j) \in I$, ми не маємо цих даних або вони ненадійні; I , звичайно, є підмножиною $[1, m] \times [1, n]$ і число відсутніх точок даних n_o , X_t - дійсне поле, яке ми хотіли б відновити, R - поле шуму (невирішені ознаки, інструментальний шум тощо), $X_p = X_t + R$ - дійсне поле з накладеним шумом, X_o є спостережуваним полем з відсутніми даними і нульовими значеннями в цих місцях, X_a - спостережуване поле, де були заповнені відсутні дані (також називається аналізованим полем у аналогії з об'єктивними методами аналізу).

Для будь-якої з цих матриць X_*^e є реконструкцією відповідної матриці за першими N EOF, фільтруючи таким чином вплив вищих EOF (слід зазначити, що для кожного з різних матриць, EOF є різними).

Для інших змінних буде використовувати однакові верхні та нижні шрифти (наприклад, для сингулярних значень), коли виникне необхідність реальні дані сигналу, шумний сигнал, сигнали з відсутніми даними тощо.

Запропонований алгоритм працює наступним чином: спочатку для всіх відсутніх точок даних $((i, j) \in I)$ виставляється значення нуля в матриці щоб отримати матрицю X_o .

Потім ми використовується SVD декомпозиція цієї матриці, щоб отримати доступ до першого розрахунку просторових і тимчасових EOF U і V , а також їх амплітуд (діагональні елементи матриці D , що містить сингулярні значення):

$$UDV^* = X_o. \quad (2.11)$$

Інтерпольоване значення в точці відсутності даних потім легко отримується усіченим EOF рядом:

$$(X_a)_{ij} = (U_N D_N V_N^*)_{ij} = (X_o^e)_{ij} = \sum_{k=1}^N \rho_k (u_k)_i (v_k^*)_j, \quad (i, j) \in I. \quad (2.12)$$

Матриця U_N є матрицею, що складається тільки з перших N просторових EOF. Таким чином отримуємо усічену реконструкцію матриці на відсутніх точках даних. Тепер необхідно проаналізоване поле X_a , яке задане

$$X_a = X_o + \delta X, \quad (2.13)$$

де матриця δX є нульовою в усіх місцях, за винятком відсутніх точок даних. Як тільки відсутні точки даних замінені на нові значення, можна застосувати ту ж саму процедуру знову, оскільки EOF, а також їх амплітуди будуть змінені у зв'язку з змінами у відсутніх точках даних. Таким чином, до збіжності виконується наступний набір операцій:

$$UDV^* = X_a, \quad (2.14)$$

$$(X_a)_{ij} = (U_N D_N V_N^*)_{ij} = (X_a^e)_{ij} = \sum_{k=1}^N \rho_k (u_k)_i (v_k^*)_j. \quad (2.15)$$

Корисно проаналізувати, як структуруються зміни від однієї ітерації до наступної. Щоб це зробити вважаємо, що зміни дуже малі, тому можна застосувати теорію стаціонарних збурень.

Якщо починати з початкової здогадки про нульові аномалії в точці відсутності даних, можна показати, що дисперсія домінуючих мод буде, як правило, збільшена, тоді як для менш домінуючих моди будуть амплітуда дисперсії зменшується. Це узгоджується з тлумаченням того, що початкове

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

припущення переоцінює «високочастотні» сигнали і недооцінює «великомасштабні» сигнали не враховуючи локальну інформацію навколо точки відсутності даних.

Також можна подивитися на те, як змінилися структури EOF. Фактично, виявляється, що EOF злегка обертаються, щоб зменшити внесок у домінуючі EOF від "шумних" EOF частково вираженими через початкове заповнення нулями. Дійсно спостерігаємо, що маємо не тільки тенденцію до зменшення енергії вищих мод, але ми віднімаємо частину відповідної вищої структури EOF від домінуючої EOF. Це призведе до кращого відтворення реальної структури EOF.

Також можна показати, що якщо дві EOF мають подібні сингулярні значення, то ітерації будуть сильно впливати на їхнє відтворення, що може призвести до великих варіаційних і конвергенційних проблем під час ітерацій. Однак у цьому випадку EOF не мають належного значення так чи інакше, оскільки будь-яка комбінація двох власних векторів, пов'язаних з однаковим власним значенням, все ще залишається власним вектором. У цьому випадку ітерації могли б обмежуватися встановленим значенням [23].

2.3.2. Визначення оптимальної кількості EOF

Тепер ми маємо алгоритм, який ітеративно модифікує EOF і їх амплітуди для отримання самоузгодженого набору EOF та інтерпольованих даних. Тим не менш, кількість N відповідних EOF поки не визначено. Можуть бути застосовані суб'єктивні або об'єктивні критерії, засновані на методах Monte-Carlo, але це введе деякі суб'єктивні параметри чи критерії усічення суто засновані на матричних розмірах і зовсім не на потужності спектри сингулярних значень даних. Крім того, ми б нехтували новою можливістю введеного алгоритму: можливість інтерполяції. Справді, коли ми можемо інтерполювати відсутні дані, ми можемо застосувати методи перехресної перевірки. Ми можемо відкинути деякі додаткові точки для перевірки,

						Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДС51.5111.005.001 ПЗ	43

використовуючи алгоритм для інтерполяції цих значень також. Потім ми можемо порівняти інтерпольовані значення з даними, які ми відкладаємо, і маємо міру помилки інтерполяції. Тоді, звичайно, пошук оптимальної кількості EOF є однозначним якщо прийняти, що оптимальною кількістю EOF є та, яка мінімізує помилку інтерполяції. Процедура перехресної перевірки у визначенні кількості відповідних EOF є тоді наступною: ми відкладаємо випадковий набір дійсних даних. Похибка інтерполяції потім просто рахується як середньоквадратичне відстань між інтерпольованим полем у цих точках і даними у цих точках.

Алгоритм для визначення оптимальної кількості EOF і відповідних інтерпольованих даних та EOF є наступними: ми спочатку застосуємо метод інтерполяції з однією EOF до зближення. Потім ми можемо розрахувати похибку. Далі друга EOF враховується в методі інтерполяції (починаючи, звичайно, з інтерпольованих даних на основі єдиного конвергентної EOF) і інтерполюється до зближення, уже з двома EOF. Потім ми знову можна обчислити похибку. Якщо похибка починає збільшуватися, процедура зупиняється; в іншому випадку ми продовжуємо використовувати все більше і більше EOF. Щоб переконатися, що не зупинилися на локальному мінімумі, ми могли б також продовжувати процедуру до встановленої кількості EOF, ніколи не перевищуючи q , і зберігати оптимальний набір. Як тільки буде знайдено кількість EOF, що мінімізує похибку, ми можемо налаштувати розрахунок EOF та інтерполяцію даних, нарешті, вводячи в інтерполяцію дані, які були виділені для перехресної перевірки. У цьому випадку, звичайно, треба розпочинати заключну ітеративну процедуру з інтерпольованими даними, отриманими з оптимальним числом EOF під час перехресної перевірки. У випадку, коли немає відсутніх даних, запропонований метод перехресної перевірки зменшує пошук оптимальної кількості EOF, а потім - останнього кроку виконують нормальне розкладання EOF на дані, знаючи оптимальне усічення.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

За допомогою техніки перехресної перевірки ми можемо знайти оптимальне число EOF та а оцінка похибки процедури інтерполяції (середньоквадратичне відстань між інтерпольованими даними та даних перевірки) [23].

2.4. Зв'язок між EOF та SVD

Нехай задано матрицю X розміром $n \times p$. Будемо вважати, що матриця централізовано, тобто із кожного стовбця було віднято його середнє значення і зараз це середнє значення рівне нулю.

Тоді коваріаційна матриця C :

$$C = \frac{X^T X}{n-1}.$$

Ця матриця є симетричною і тому може бути записана у вигляді:

$$C = V L V^T,$$

де V - матриця власних векторів та L - діагональна матриця з власними значеннями, розташованими на діагоналі в порядку спадання. Власні вектори називаються головними осями або головними напрямками даних. Проекції даних на головні осі називаються головними компонентами (їх можна розглядати як нові змінні). j -ий головний компонент визначається j -им стовпцем матриці XV . Координати i -ої точки даних в новому просторі головних компонентів визначається i -им рядком матриці XV .

Якщо застосувати SVD розкладання матриці X , то отримаємо:

$$X = U D V^T,$$

де U унітарна матриця, а Σ - діагональна матриця з сингулярними значеннями σ_i .

Тепер видно, що:

$$C = \frac{V D U^T U D V^T}{n-1} = V \frac{D^2}{n-1} V^T,$$

це значить, що праві сингулярні вектори V - це головні напрямки, а також, що сингулярні значення співвідносяться до власних значень коваріаційної матриці наступним чином:

$$\lambda_i = \frac{\sigma_i^2}{n-1}.$$

Тоді головні компоненти будуть рівними:

$$XV = UDV^T V = UD .$$

2.4.1. Приклад SVD розкладання

Для прикладу розглянемо приклад SVD розкладання для матриці:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо добуток матриці на її транспоновану матрицю AA^T :

$$AA^T = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 & 1 \\ 1 & 11 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо власні значення та відповідні власні вектори для AA^T :

$$AA^T \vec{v} = \lambda \vec{v};$$

$$\begin{pmatrix} 11 & 1 \\ 1 & 11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}.$$

В результаті отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (11 - \lambda)x_1 + x_2 = 0 \\ x_1 + (11 - \lambda)x_2 = 0 \end{cases}.$$

Система матиме нетривіальний розв'язок якщо:

$$\det(AA^T - \lambda E) = \begin{vmatrix} 11 - \lambda & 1 \\ 1 & 11 - \lambda \end{vmatrix} = 0;$$

$$(11 - \lambda)^2 - 1 = (10 - \lambda)(12 - \lambda) = 0;$$

$$\lambda_1 = 12;$$

$$\lambda_2 = 10.$$

Для $\lambda_1 = 12$, отримаємо $x_1 = x_2$. Оберемо власний вектор $\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Для $\lambda_2 = 10$, отримаємо $x_1 = -x_2$. Оберемо власний вектор $\vec{v}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$.

Приведемо власні вектори до ортогонального вигляду за допомогою нормалізації-ортогоналізації Грама-Шміда, в результаті чого отримаємо ліву матрицю власних векторів:

$$U = (w_1 \quad w_2).$$

Почнемо з нормалізації \vec{v}_1 :

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{v}_1}{|\vec{v}_1|} = \frac{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

Далі розрахуємо:

$$\begin{aligned} \vec{w}_2 &= \vec{v}_2 - \langle \vec{u}_1, \vec{v}_2 \rangle \vec{u}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} - \left\langle \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\rangle \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} - 0 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Нормалізуючи \vec{w}_2 отримаємо:

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{w}_2}{|\vec{w}_2|} = \frac{\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}}{\sqrt{1^2 + (-1)^2}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Таким чином було знайдено матрицю:

$$U = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

Розрахунок матриці V подібний і починається з пошуку власних значень та відповідних власних векторів для $A^T A$:

$$A^T A = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 2 \\ 0 & 10 & 4 \\ 2 & 4 & 2 \end{pmatrix}.$$

Знайдемо власні значення та відповідні власні вектори для $A^T A$:

$$AA^T \vec{v} = \lambda \vec{v};$$

$$\begin{pmatrix} 10 & 0 & 2 \\ 0 & 10 & 4 \\ 2 & 4 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

В результаті отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (10 - \lambda)x_1 + 2x_3 = 0 \\ (10 - \lambda)x_2 + 4x_3 = 0 \\ 2x_1 + 4x_2 + (2 - \lambda)x_3 = 0 \end{cases}.$$

Система матиме нетривіальний розв'язок якщо:

$$\det(A^T A - \lambda E) = \begin{vmatrix} 10 - \lambda & 0 & 2 \\ 0 & 10 - \lambda & 4 \\ 2 & 4 & 2 - \lambda \end{vmatrix} = 0;$$

$$-\lambda^3 + 22\lambda^2 - 120\lambda = -\lambda(\lambda - 10)(\lambda - 12) = 0;$$

$$\lambda_1 = 12;$$

$$\lambda_2 = 10;$$

$$\lambda_3 = 0.$$

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для $\lambda_1 = 12$ отримаємо власний вектор $\vec{v}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Для $\lambda_2 = 10$ отримаємо власний вектор $\vec{v}_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Для $\lambda_3 = 0$ отримаємо власний вектор $\vec{v}_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix}$.

Приведемо власні вектори до ортогонального вигляду за допомогою нормалізації-ортогоналізації Грама-Шмідта, в результаті чого отримаємо праву матрицю власних векторів:

$$V = (w_1 \quad w_2 \quad w_3).$$

Почнемо з нормалізації \vec{v}_1 :

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{v}_1}{|\vec{v}_1|} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}.$$

Далі розрахуємо:

$$\vec{w}_2 = \vec{v}_2 - \langle \vec{u}_1, \vec{v}_2 \rangle \vec{u}_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Нормалізуючи \vec{w}_2 отримаємо:

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{w}_2}{|\vec{w}_2|} = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{5}} \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Далі розрахуємо:

$$\vec{w}_3 = \vec{v}_3 - \langle \vec{u}_1, \vec{v}_3 \rangle \vec{u}_1 - \langle \vec{u}_2, \vec{v}_3 \rangle \vec{u}_2 = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ 3 \\ -\frac{4}{3} \\ -\frac{10}{3} \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Нормалізуючи \vec{w}_3 отримаємо:

$$\vec{u}_3 = \frac{\vec{w}_3}{|\vec{w}_3|} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{30}} \\ \frac{2}{\sqrt{30}} \\ \frac{-5}{\sqrt{30}} \end{pmatrix}.$$

Таким чином було знайдено матрицю:

$$V = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{30}} \\ \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{5}} & \frac{2}{\sqrt{30}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{-5}{\sqrt{30}} \end{pmatrix}.$$

Матриця D складається з квадратних коренів ненульових власних значень розташованих на головній діагоналі від найбільшого до найменшого:

$$D = \begin{pmatrix} \sqrt{12} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{10} & 0 \end{pmatrix}.$$

$$A_{nn} = U_{nn} D_{nn} V_{nn}^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{12} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{10} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{-1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{-5}{\sqrt{30}} \end{pmatrix} =$$

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$= \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{12}}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{\sqrt{12}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{10}}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{-1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{-5}{\sqrt{30}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.4.2. Реконструкція матриці за допомогою EOF

Для зменшення розмірності матриці даних з p до $k < p$, виберемо k перших стовпців матриці U і верхню ліву частину матриці D розміром $k \times k$. Їх добуток $U_k D_k$ є потрібною матрицею, що містить перші k головних компонентів.

Подальше множення перших k головних компонентів на відповідні головні осі V_k^T дасть у результаті матрицю:

$$X_k = U_k D_k V_k^T,$$

Яка має розмірність оригінальної матриці $n \times p$, але менший ранг, рівний k .

Матриця X_k являє собою реконструкцію оригінальної матриці із перших k головних компонентів. Така реконструкція має малу похибку.

Цей принцип можна застосувати для відновлення відсутніх даних, спершу заповнивши відсутні значення нулями, а потім проводити ітеративно реконструкція даних за першими EOF до сходження у одній точці, як це було описано в поясненні методу. Таке відтворення матиме малу похибку, оскільки для відтворення використовуються ортогональні функції.

3. ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ НА ОСНОВІ EOF ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ У MICROGRID

3.1. Дані для дослідження

Для дослідження ефективності роботи запропонованого алгоритму на основі використання емпіричних ортогональних функцій необхідно обрати реальні дані для дослідження.

В якості об'єкту дослідження виберемо мікрорайон в Боттроп, Німеччина [25]. В цьому районі на більшості дахів будинків встановлено сонячні панелі. На рис. 3.1 показано зображення частини мікрорайону зі супутнику.



Рис. 3.1 Мікрорайон Боттроп

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС51.5111.005.001 ПЗ

Арк.

52

В якості досліджуваних даних виберемо дані про кількість сонячного випромінення.

Частина даних про кількість сонячного випромінення з 10:37 до 12:37 наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Час	Сонячне випромінення, Вт/м ²
10:37	544
10:52	553
11:07	560
11:22	566
11:37	569
11:52	571
12:07	571
12:22	569
12:37	566

На рис. 3.2 зображено типовий графік сонячного випромінення, що потрапляє на сонячну панель, для одного із будинків за одну добу.

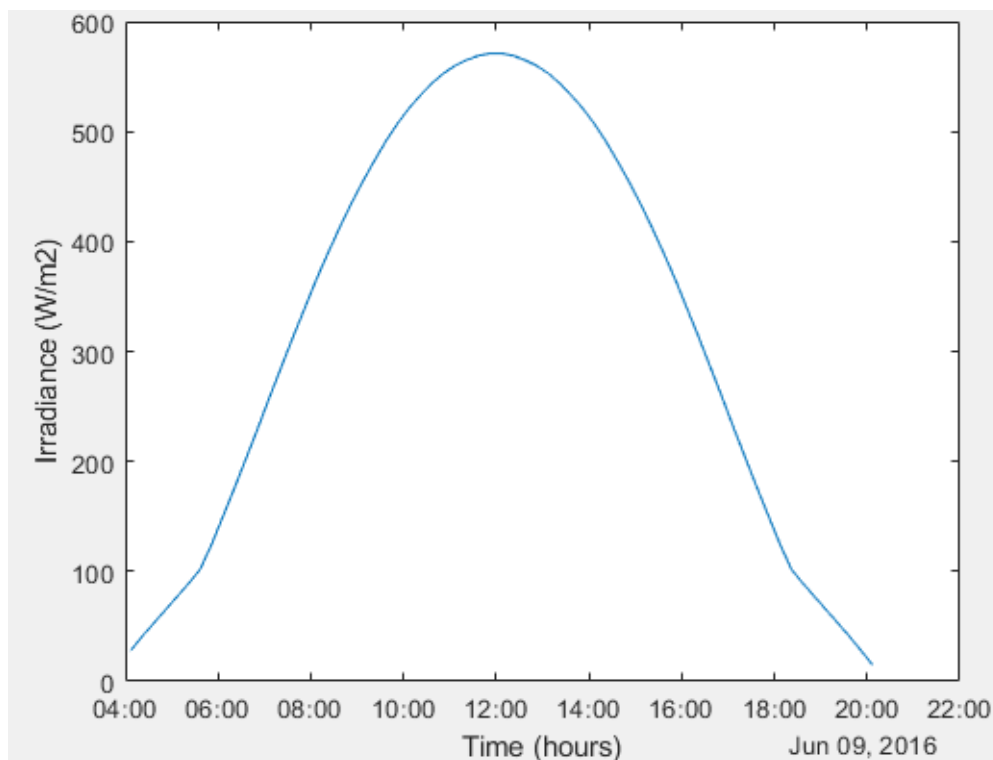


Рис. 3.2. Графік сонячного випромінення

3.2. Дослідження роботи алгоритму

Для дослідження необхідно, щоб частина даних була відсутня. Будемо вважати, що дані відсутні у зв'язку з рухомими хмарами, які затіняють сонячні панелі в певні проміжки часу, що призводить до зменшення коефіцієнту прозорості атмосфери.

Маючи таблицю неповних даних, відновимо відсутню частину за допомогою алгоритму на основі EOF, а також інших методів відтворення, які наявні в середовищі Matlab (методи функції fillmissing).

Для кожного з методів знайдемо середню абсолютну похибку у відсотках (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|X(t) - X_a(t)|}{X(t)} \cdot 100\% . \quad (3.1)$$

Проведемо кілька таких дослідів, а потім знайдемо середнє значення MAPE для цієї кількості дослідів, окремо для кожного з методів.

На рис. 3.3 зображено модель мікрорайону, де червоним кольором зображено місця, де дані будуть завжди відомі, а жовтим кольором – місця, де дані будуть відсутні, у зв'язку з відсутністю датчиків.

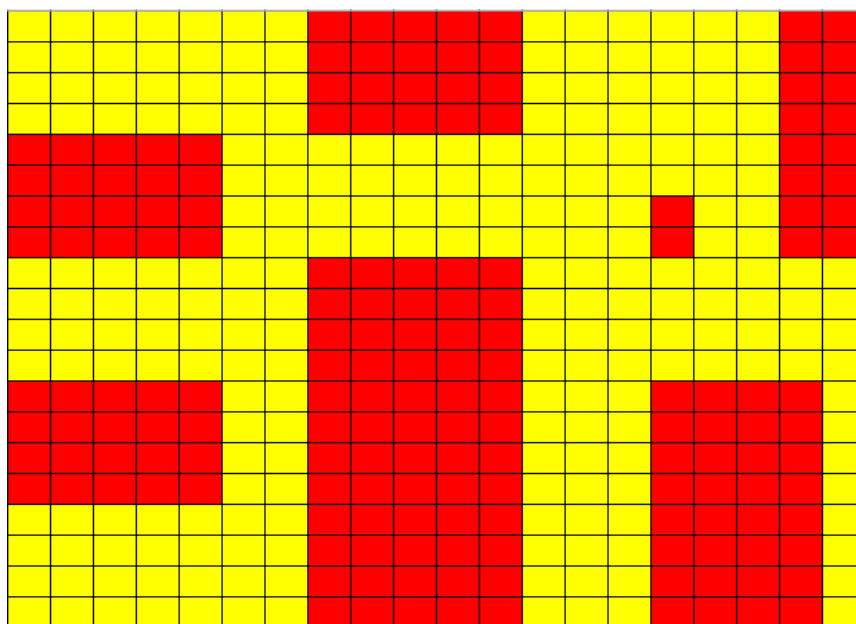


Рис. 3.3 Модель досліджуваного мікрорайону

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для досліду будемо вважати, що хмара рухається з південного сходу на північний захід над мікрорайоном. На рис. 3.4 зображено положення хмари над мікрорайоном о 11:22.

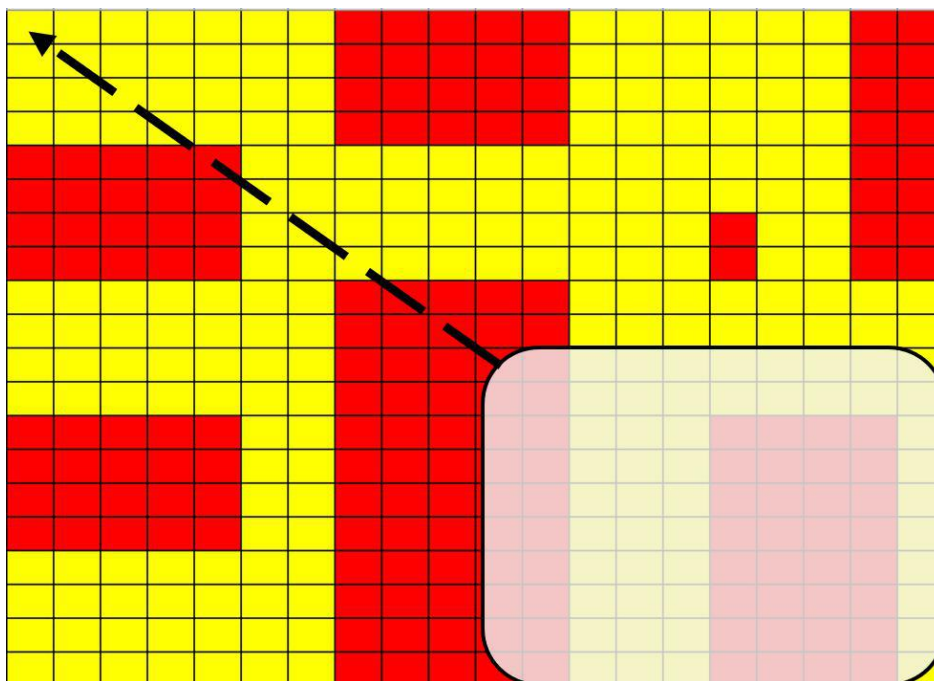


Рис. 3.4 Початкове положення хмари

В 11:52 хмара займе наступне положення, яке зображено на рис. 3.5.

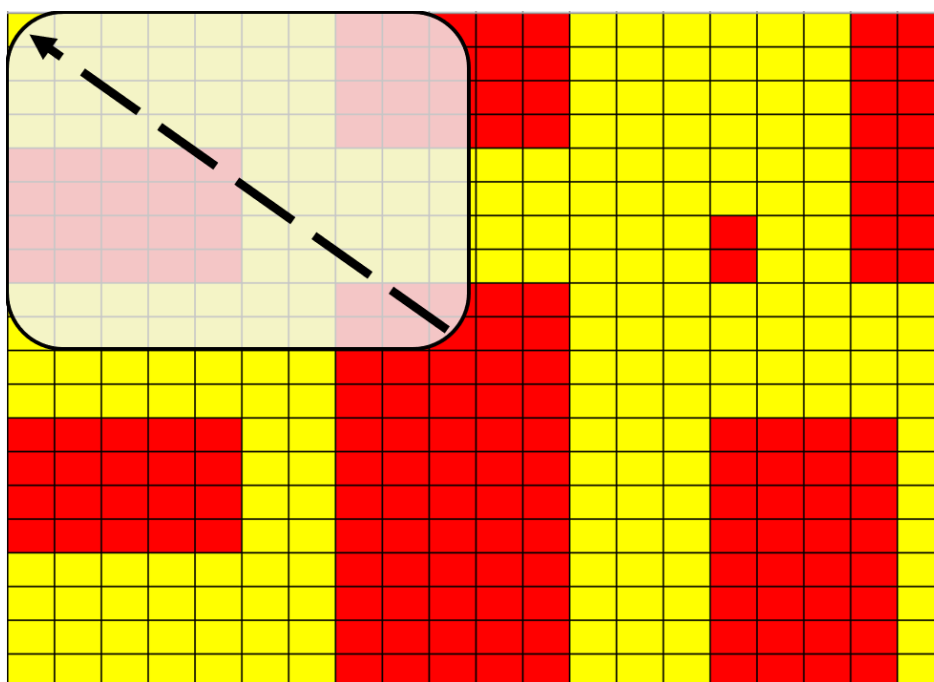


Рис. 3.5 Друге положення хмари

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС51.5111.005.001 ПЗ

Арк.

55

Будемо вважати, що через хмару коефіцієнт прозорості атмосфери змінюється за законом синуса у площині XZ. Тоді в місці під вершиною хмари коефіцієнт прозорості буде рівним 0, що відповідає нульовому значенню сонячного випромінення, а в місці поблизу краю хмари коефіцієнт прозорості буде рівним 1, що відповідає значенню сонячного випромінення, яке було б без впливу хмари. Форму хмари зображено на рис. 3.6.

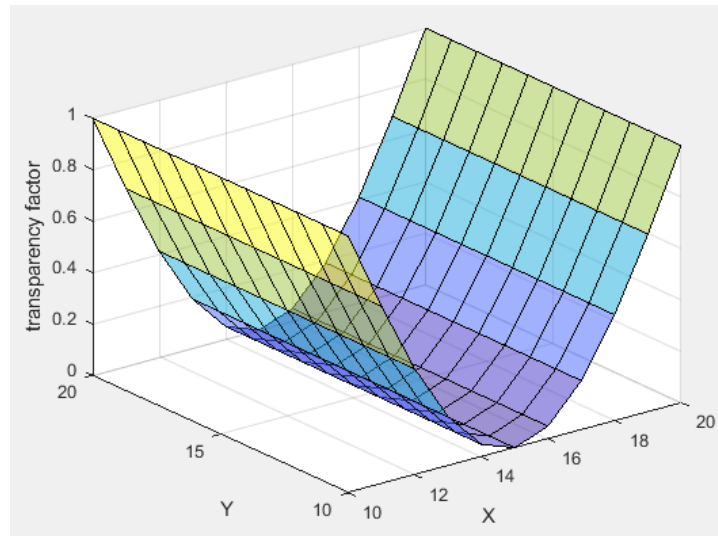


Рис. 3.6 Зміна коефіцієнта прозорості у просторі

Алгоритм буде ефективним, якщо він зможе відновити дані, які будуть змінюватися за законом синуса (в ідеальному випадку). Реальне значення, яке ми отримали б при наявності всіх даних проілюстровано на рис. 3.7.

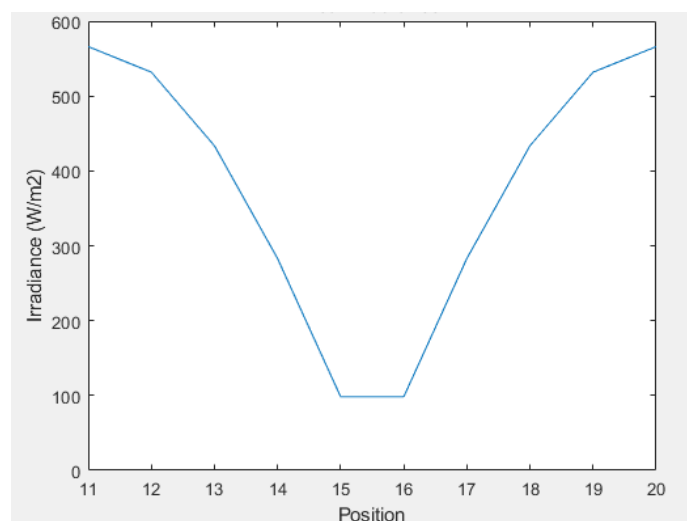


Рис. 3.7 Реальне значення даних про величину сонячного випромінення

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На рис. 3.8 синім зображено відомі дані, на місцях пробілів дані відсутні.

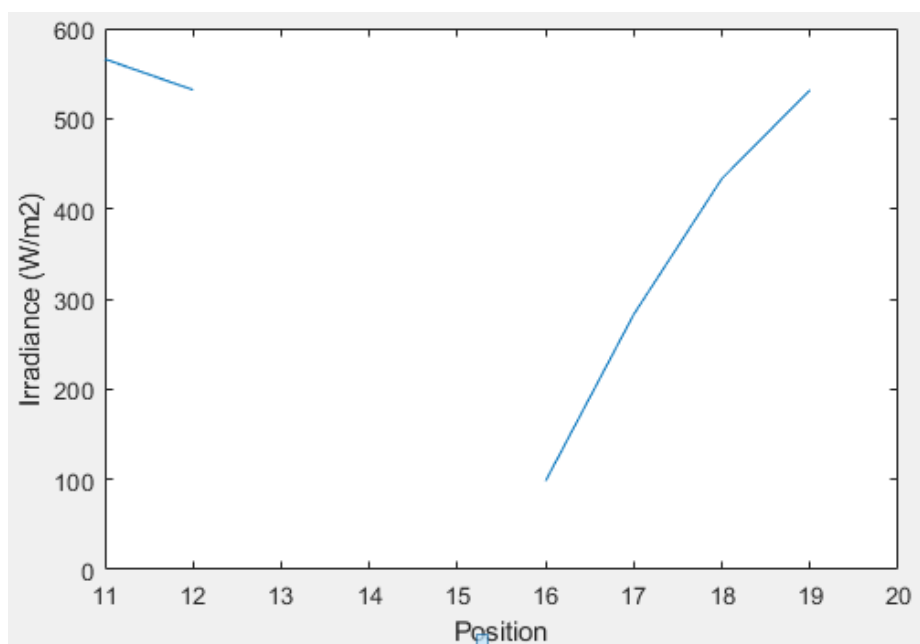


Рис. 3.8 Відомі і відсутні дані

На рис. 3.9 зображено результат відновлення даних за рахунок використання EOF алгоритму.

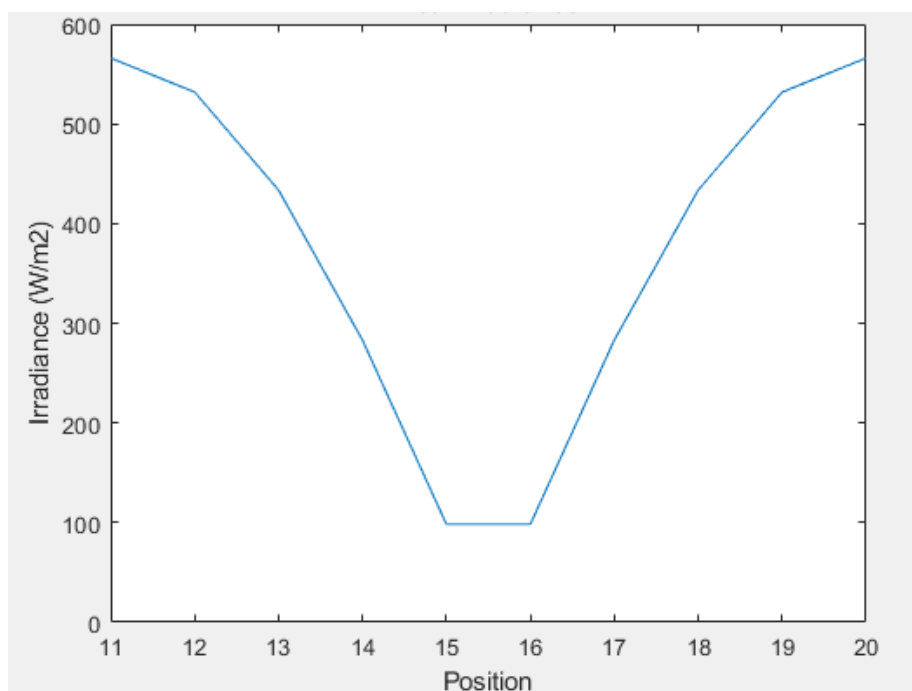


Рис. 3.9 Результат відновлення даних

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДС51.5111.005.001 ПЗ

Арк.

57

В результаті дослідження було знайдено похибку - $10^{-13}\%$. Така велика точність зумовлена тим, що для відновлення функції косинуса можна застосувати поліном малого ступеня, одиниці або двійки буде достатньо. Для більш складних функціональних залежностей необхідно буде використовувати більшу кількість EOF.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Було проведено детальний огляд системи енергозбереження і енергоефективності MicroGrid. Розглянуті характеристики демонструють структурні особливості системи, а також вказують на основні проблеми, які можуть виникнути під час проектування і впровадження MicroGrid. Було розглянуто реальні приклади впровадження MicroGrid, які задають потенційний вектор розвитку проектування і впровадження в більших масштабах.

В другій частині даної роботи було визначено, що для коректної роботи MicroGrid, система має володіти великою кількістю даних. Ці дані за певних причин можуть бути відсутні. У зв'язку з цим виникає необхідність відновити ці дані. Точність відтворення даних буде безпосередньо впливати на роботу системи, а саме дасть змогу MicroGrid забезпечити такий режим роботи, у якому буде відібрано максимальну потужність. Було розглянуто стандартні і нестандартні методи відновлення даних. А також запропоновано новий алгоритм відновлення даних на основі використання емпіричних ортогональних функцій, для цього застосовувалося SVD розкладання таблиці вхідних даних.

В третій частині було досліджено запропонований алгоритм відновлення даних під час роботи з таблицею реальних даних про сонячне випромінювання, яке досягає сонячних панелей будинків, розташованих в одному мікрорайоні. Ефективність запропонованого алгоритму порівнювалася із стандартними методами відновлення даних, наявних у програмному середовищі Matlab. Критерієм ефективності способу відтворення даних була середня абсолютна похибка у відсотках. Дослідження показали, що запропонований алгоритм на основі EOF відновлює дані з великою точністю. Для більшості випадків похибка не перевищує 1%, в той час як, інші стандартні методи не змогли показати таку точність.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Незважаючи на точність запропонованого алгоритму, його ефективність може бути покращена. Все ще стоїть задача підбору оптимальної кількості ортогональних функцій, яка забезпечить найбільшу точність відтворення даних. Вирішення даної задачі збільшить точність відтворення даних, а також призведе до збільшення швидкодії алгоритму. Також алгоритм можна вдосконалити таким чином, що він зможе працювати аналізуючи розташування сонячних панелей.

					<i>ДС51.5111.005.001 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П. П. Гаврилко, Р. С. Чорний та Я. В. Шевчук, «Розвиток та впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах України,» Міжнародний науковий журнал. – 2016. - Т. 2, - № 10, - С. 66-71.
2. К. В. Богомолова, «Сонячна енергетика: детермінанти та тенденції розвитку,» в Перший крок у науку: матеріали ІХ студентської конференції, Суми, 2018.
3. Є. В. Вербицький, А. Г. Кисельова та К. С. Осипенко, Контекстно-залежне керування автономними системами електроживлення: під заг. ред. д-ра техн. наук Жуйкова В. Я., Київ: Аверс, 2015.
4. E. Koubli, D. Palmer, P. Rowley and R. Gottschlag, "Inference of missing data in photovoltaic monitoring datasets," IET Renew. Power Gener., vol. 10, no. 4, pp. 434-439, 2016.
5. Ton, Dan T., and Merrill A. Smith. "The US department of energy's microgrid initiative." The Electricity Journal 25.8 (2012): 84-94.
6. Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., & Villafafila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable and sustainable energy reviews, 16(4), 2154-2171.
7. Alegria, E., Brown, T., Minear, E., & Lasseter, R. H. (2013). CERTS microgrid demonstration with large-scale energy storage and renewable generation. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(2), 937-943.
8. Guerrero, J. M., Loh, P. C., Lee, T. L., & Chandorkar, M. (2012). Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part II: Power quality, energy storage, and AC/DC microgrids. IEEE Transactions on industrial Electronics, 60(4), 1263-1270.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ДС51.000.000.010ПЗ</i>				

9. Asmus, P., & Lawrence, M. (2016). Emerging microgrid business models. Navigant Research Report, available at: www.navigantresearch.com/research/emerging-microgrid-business-models (accessed 7 November 2017).
10. Asmus, P., & Lawrence, M. (2016). Market data: microgrids. Navigant.
11. Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402-411.
12. Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096-2103.
13. Hyams, M., Awai, A., Bourgeois, T., Cataldo, K., & Hammer, S. A. (2011). Microgrids: an assessment of the value, opportunities and barriers to deployment in new york state. Prepared for the New York State Energy Research and Development Authority.
14. Basso, T. (2014). IEEE 1547 and 2030 standards for distributed energy resources interconnection and interoperability with the electricity grid (No. NREL/TP-5D00-63157). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
15. Borenstein, S., & Bushnell, J. (2015). The US electricity industry after 20 years of restructuring. *Annu. Rev. Econ.*, 7(1), 437-463.
16. New York Public Service Commission. Reforming The Energy Vision: NYS Department of Public Service Staff Report and Proposal. Case 14-M-0101; 2014.
17. Montoya, M., Sherick, R., Haralson, P., Neal, R., & Yinger, R. (2013). Islands in the storm: Integrating microgrids into the larger grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(4), 33-39.
18. Council, T. G. A. (2015). Gridwise transactive energy framework version 1.0. The GridWise Architecture Council, Tech. Rep.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ДС51.000.000.010ПЗ</i>				

19. Schwaegerl, C., Tao, L., Lopes, J. P., Madureira, A., Mancarella, P., Anastasiadis, A., ... & Krkoleva, A. (2009). Report on the technical, social, economic, and environmental benefits provided by Microgrids on power system operation. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids.

20. К. С. Осипенко, В. Я. Жуйков. Принцип преемтивного керування у SmartGrid //Електронна та Акустична Інженерія. – 2018. – Т. 1. – №. 1. – С. 13-19.

21. E. Koubli, D. Palmer, P. Rowley and R. Gottschlag, "Inference of missing data in photovoltaic monitoring datasets," IET Renew. Power Gener., vol. 10, no. 4, pp. 434-439, 2016.

22. J. Ross, R. G., "Interface design considerations for terrestrial solar cell modules," in 12th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp. 801–806, 1976.

23. Beckers, J. M., & Rixen, M. (2003). EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets. Journal of Atmospheric and oceanic technology, 20(12), 1839-1856.

24. Lawson, C. L., & Hanson, R. J. (1974). Linear least squares with linear inequality constraints. Chap, 23, 158-173.

25. <https://goo.gl/maps/WVRdAA73fcFBgRKk9>

								Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ДС51.000.000.010ПЗ</i>			

Додаток. Лістинг програми

```
X_real=inputdata;
[row_NaN,col_NaN]=find(isnan(X_input));
nsize_NaN=size(row_NaN);
size_NaN=nsize_NaN(1);
X_real(isnan(X_real))=0;
Nopt=5;
n_convergence=100;
for nComp=1:Nopt;
for a=1:n_convergence
mu = mean(X_real);
[eigenvectors, scores] = pca(X_real);
X_a = scores(:,1:nComp) * eigenvectors(:,1:nComp)';
X_a = bsxfun(@plus, X_a, mu);
for num_NaN=1:size_NaN
X_real(row_NaN(num_NaN),col_NaN(num_NaN))=X_a(row_NaN(num_
NaN),col_NaN(num_NaN));
end
end
end
```

ABSTRACT

INTRODUCTION

In recent years, MicroGrid, a system that manages the management of renewable energy and electrical loads to ensure maximum energy selection, is being actively implemented in Ukraine. MicroGrid should process large volumes of data, and should respond to external changes of context data.

With MicroGrid solar panels, the control system has to process data from meteorological and electrical monitoring systems to ensure that the system operates in maximum power selection mode. Often these data come from a variety of sources. For a variety of reasons, some data may be lost due to a transmission problem or a malfunction in the system. Data may not be available for different periods of time, from a few minutes to several weeks or months.

For correct data evaluation and further processing in the system, information on the environment should be available - temperature, humidity, air transparency, shading, contamination of the panels; the value of solar radiation; solar panel options; take into account the peculiarities of solar energy generation processes. Correct analysis can be carried out on the condition that the share of missing data in the database is insignificant. The task of choosing the correct method for reproducing missing data, which takes into account the peculiarities of the work of the solar panels, as well as the factors that influence the generation of energy in them, is to be considered for ensuring the maximum energy selection in MicroGrid.

The purpose of this work is to conduct a detailed review of MicroGrid, based on which an algorithm for the reproduction of missing data in MicroGrid will be proposed based on the use of empirical orthogonal functions, which will ensure the selection of maximum energy.

1. REVIEW OF MICROGRID

Microgrid is a group of interconnected loads and distributed energy resources within clearly defined electrical boundaries, acting as a single managed object relative to the network. Microgrid can be connected and disconnected from the power grid so that it can work both in network and in isolation mode.

The choice of MicroGrid design will depend on specific project requirements and economic nuances. Including some power supplies will help prevent MicroGrid malfunctions. Since most MicroGrid power generation sources used by large synchronous generators do not have inertia, a buffer is required to reduce the effects of imbalances during power generation. MicroGrid's energy storage technologies are now being actively developed, and their number is ever increasing. Considerable attention is focused on storing electricity; however, the storage of thermal and mechanical energy should also be taken into account where appropriate. It's worth remembering about storage technology opportunities to provide auxiliary services.

Microgrid often include technologies such as solar photovoltaic panels (which produce DC power) or microturbines (high frequency alternating current power) that require power electronic interfaces such as DC-AC or DC-AC-DC converters for electrical interaction the system. Inverters can be used to control the frequency and voltage in MicroGrid in isolation mode. A static switch-off switch is a key component of MicroGrid for switching to isolation and synchronization mode; it can be programmed for a very fast response to overvoltage, reduced voltage, increase frequency, decrease frequency or overload current.

The factors contributing to the development and deployment of MicroGrid in places with existing electrical network infrastructure are divided into three broad categories: energy security, cost-effectiveness and the integration of clean energy.

Although much has been written about the concept and prospects of MicroGrid, much can also be learned from examples of real, active MicroGrid. According to Navigant Research, which tracks the use of MicroGrid since 2011, the United States has been a historic leader in the potential use. Today, the United States and Asia have

roughly the same potential for the operation, development and use of MicroGrid, each of which has 42% of the market. Europe is 11%, Latin America - 4%, and in the Middle East and Africa - only 1%. The total capacity was about 1.4 GW in 2015 and is expected to increase to about 5.7 GW (conservative estimate) or 8.7 GW (in the "aggressive" scenario) by 2024. Navigant divides the MicroGrid market into the following segments (from% of total power of deployed energy by Q1 2016): remote use (54%), commercial (industrial) use (5%), sharing (13%), utilities (13%) use on campuses (9%) and military use (6%) [9]. It should be noted that Navigant Research is not tracking remote MicroGrid with diesel generators; for inclusion, they must include at least one renewable source of energy generation.

Although MicroGrid is the best approach to addressing local issues, it may grow into SmartGrid in the future, it's possible that society will find paradigms of grid architecture such as "Smart SuperGrids" or "virtual power" - which do not have local balancing of generation and loads or isolated segments of the grid that will be the best architectures.

Smart SuperGrids rely on advanced troubleshooting, isolation, and recovery features to eliminate overloads, build power over faults, and reduce the time of recovery from disconnections. Virtual power plants rely on software and analytics to manage widespread distributed energy resources, although MicroGrid, networked, can also function as virtual power plants, as mentioned above. New information and communication developments, known as the Internet, also contribute to the creation of a decentralized, so-called transactional energy market platform, where individual distributed energy and load can offer the purchase and sale of electricity to each other.

2. FILLING GAPS METHODS

The paper considers the methods of restoration of missing data for short-term and long-term periods of time, taking into account weather conditions, as well as various possible modes of operation of the system itself. The main reasons for the lack of data in the tables are the following. Firstly, this is a lack of meteorological data, while electrical data are known. For example, the lack of data on temperature or humidity due to the failure of the respective sensors. These reasons are typical of home or commercial low-power systems, where owners often save on installing high-quality meteorological sensors. The next reason is interruption and malfunctioning of electrical data monitoring systems. For example, due to damage to the cables through which the information is transmitted, or due to untimely service of the electrical equipment. The third reason is the malfunctioning of both subsystems that may occur due to problems with data transmission, or due to hardware or software problems. The last two reasons for data loss are typical of systems that include a large number of solar panels. The fourth reason is the personality of a person as the owner of the energy resource. The actions of individuals affect the functioning of the system. The level of their influence on the system depends on such determinants in this aspect of personal qualities as: intellectual level; level of self-esteem; poland dependence, level of professional training [20]. Consequently, the task of choosing the method of data recovery, which in the process of data recovery will take into account the reasons for their absence.

Data reproduction can be performed in various ways, for example by copying data over previous periods of time, but with this approach, the reproduction error will be significant and will not take into account the processes of generating energy in the solar panels.

Very often, standard mathematical methods are used to restore data, namely interpolation, spline interpolation, linear regression, method of closest neighbors, and others.

The disadvantage of these methods is that they do not take into account the processes of generating energy. However, based on these mathematical methods, there

are new methods and algorithms that try to take into account these processes. Standard and non-standard methods for reproducing data will be discussed further.

Standard maths usually restore the missing data using interpolation, regression, averaging.

In the Matlab software environment, there is a `fillmissing` function for working with data tables, which can restore data by one of the data available to the user by the method of data recovery.

All applications of empirical orthogonal functions (EOF) mainly use the fact that the EOF allows to split the signal into a series of data based on orthogonal functions, constructed in such a way that only some of these functions allow optimally to reconstruct the initial signal.

The purpose of this work is to analyze the problem of the lack or unreliability of data in MicroGrid and their analysis using EOF. An EOF-based algorithm is proposed in its classical sense (it is possible to work with a set of complex data), although it is possible to use EOF in a more general sense, such as an extended EOF method, an EOF delay method, a singular spectrum analysis, or other its modification. For clarity and understanding, attention will be focused on uniform spatio-temporal data tables; For heterogeneous tables, the North or Shen approach may be used (with this discrete task being replaced by a continuous integral problem, allowing the measurement of data in accordance with the spatial or temporal coverage associated with them) that can be used to work with numbers in a discrete, uniform space.

To complete the general description of the EOF decomposition, one can recall that when working on EOF or covariance, some a priori background field or trend is subtracted from a series of data, in particular, for easy interpretation of the eigenvalues in terms of the energy of variability (see equation 9). For the sake of symmetry in terms of spatial or temporal coordinates, we assume that we remove the a priori average from the field (in order to work with anomalies) is the spatio-temporal averaging of all available data.

Currently, when it comes to missing or false data, you can fill out the missing data using objective methods of analysis or optimal interpolation: of course, the

problem with this approach is that it is necessary to have interpolation information about the correlation function and the ratio of the data signal to the data noise. Since the purpose of using EOF is often the data analysis itself, other prior data analyzes are not very natural and introduces a priori information in a further analysis of the EOF. This playback method (and its variants using more simple interpolation methods) are most often used to evaluate missing data values because it involves applying a classic analysis tool as pre-processing before using any SVD or EOF analysis.

The algorithm for determining the optimal number of EOF and related interpolated data and EOF is as follows: we first apply an interpolation method with one EOF to convergence. Then we can calculate the error. Next, the second EOF is counted in the interpolation method (starting, of course, from interpolated data based on a single convergent EOF) and interpolated to convergence, with two EOFs. Then we can again calculate the error. If the error begins to increase, the procedure stops; otherwise we continue to use more and more EOFs. To ensure that we did not stop at the local minimum, we could also continue the procedure to the set EOF number, never exceeding, and save the optimal set. Once we find the amount of EOF that minimizes the error, we can adjust the EOF calculation and interpolate the data, finally, by entering in the interpolation data that were selected for cross-checking. In this case, of course, it is necessary to begin the final iterative procedure with interpolated data obtained with the optimal number of EOFs during the cross-check. In the absence of missing data, the proposed cross-check method reduces the search for the optimal number of EOFs, and then - the last step performs the normal EOF decomposition into data, knowing the optimal truncation.

3. TESTING OF THE EOF BASED ALGORITHM

To study the effectiveness of the proposed algorithm on the basis of the use of empirical orthogonal functions, it is necessary to select the real data for the study.

As a research object, we will select the district in Bottrop, Germany. In this area, most roofs have solar panels.

As research data, we will choose data on the amount of solar radiation that reaches the solar panels for one day from 4:07 to 20:07.

To study, it is necessary that some data be missing. We will assume that the data is absent due to moving clouds that obscure the solar panels at certain intervals.

With a partial data table, we will restore the missing part using the EOF-based algorithm, as well as other reproduction methods that are available in the Matlab environment (fillmissing methods).

We conduct several such experiments, and then we find the mean value of MAPE for this number of experiments, separately for each of the methods.

The results of the study show that in all cases, the error of data recovery using the method based on the use of EOF is very small, less than other methods. Of the other methods worth paying attention to is the data recovery method based on spline interpolation.

SUMMARY

A detailed review of the MicroGrid energy saving and energy efficiency system was conducted. The characteristics discussed demonstrate the structural features of the system, and also indicate the main issues that may arise during the design and implementation of MicroGrid. There were considered real examples of the introduction of MicroGrid, which set the potential vector for the development of design and implementation on a larger scale.

In the second part of this work it was determined that for the correct operation of MicroGrid, the system should have a large amount of data. These data may not be available for some reason. In this regard, there is a need to restore this data. The accuracy of the data play will directly affect the operation of the system, in particular, allowing MicroGrid to provide a mode in which the maximum power will be selected. Standard and non-standard data recovery methods were considered. A new algorithm for data restoration based on the use of empirical orthogonal functions was proposed. SVD decomposition of the table of input data was used for this.

In the third part, the proposed algorithm for data recovery was studied while working with a table of real data on solar radiation that reaches the solar panels of buildings located in one neighborhood. The effectiveness of the proposed algorithm was compared with the standard methods of data recovery available in the Matlab software environment. The criterion for the effectiveness of the data reproduction method was the average absolute error in percentages. Studies have shown that the proposed EOF-based algorithm restores data with great accuracy. In most cases, the error does not exceed 1%, while other standard methods have failed to show such accuracy.

Despite the accuracy of the proposed algorithm, its efficiency can be improved. Still, the task of selecting the optimal number of orthogonal functions is to be ensured, which will ensure the highest accuracy of data reproduction. Solving this task will increase the accuracy of data playback, as well as increase the speed of the algorithm.