

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ СПОЖИВАЧІВ
ШЛЯХОМ ПОБУДОВИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА
ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИМ ПРИНЦИПОМ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу,
групи ДЕ-ЕБ23мг-1
Спеціальності : 141 Електроенергетика
електротехніка та електромеханіка
(код і найменування спеціальності)

_____ / Олександр БАБІЧ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗИНА

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

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

« ___ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Олександра БАБІЧА

1. Тема «Підвищення рівня енергетичної безпеки споживачів шляхом побудови розподільчих електричних мереж за фрактально-кластерним принципом»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, що відображені у періодичних виданнях, наукових роботах, монографіях

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ПИТАННЯ; РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ. РОЗДІЛ 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ ТА РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ. ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | | Оцінка (бали) |
|--------|-------------|----------------|------------------|---------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв | |
| | | | | |

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник _____ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Олександр БАБІЧ
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|-------|---|------------------------|--|
| 1 | Визначення актуальності теми дослідження | 02.10.24 – 05.10.24 | |
| 2 | Проведення аналізу наукової літератури | 06.10.24 – 15.10.24 | |
| 3 | Виконання першого розділу дипломної роботи | 16.10.24 – 29.10.24 | |
| 4 | Виконання другого розділу дипломної роботи | 30.10.24 – 26.11.24 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 27.11.24 – 07.12.24 | |

Студент (ка) _____
(підпис)

Олександр БАБІЧ
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____
(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 64 ; рисунків – 21; таблиць - 2; літературних джерел – 14.

В роботі проведено ґрунтовний критичний аналіз сучасних тенденцій розвитку електричних мереж.

Проаналізовано рівень енергетичної безпеки систем електропостачання в період воєнного стану та визначено основні фактори загроз.

Розроблено пропозиції що до покращення показників надійності роботи розподільчих електричних мереж шляхом вдосконалення їх конфігурації.

Розроблено схемі рішення підстанцій для нової конфігурації електричних мереж

РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНА СТРУКТУРА, ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ, ІДЕАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ, УНІФІКОВАНІ СХЕМИ ПІДСТАНЦІЙ.

ABSTRACT

Pages of text – 64; pictures – 21; tables – 2; literary sources – 14.

The work provides a thorough critical analysis of current trends in the development of electrical networks.

The level of energy security of electrical supply systems during martial law is analyzed and the main threat factors are identified.

Proposals are developed to improve the reliability indicators of distribution electrical networks by improving their configuration.

A substation solution scheme is developed for a new configuration of electrical networks

**DISTRIBUTED GENERATION, FRACTAL-CLUSTER STRUCTURE,
ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS, IDEALIZED MODEL, UNIFIED
SUBSTATION SCHEMES.**

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Загальні фрактальні властивості технологічних, енергетичних та електронних систем та об'єктів

1.2 Загальні математичні засади застосування фракталів

Висновки за першим розділом

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЯК ЗАСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

2.1 Загальні проблеми розвитку систем розподіленої генерації

2.2 Наукові проблеми розподіленої генерації

Висновки за другим розділом

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ТА КОНФІГУРАЦІЇ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИМ ПРИНЦИПОМ

3.1 Актуальність питання зміни конфігурації та топології електричних мереж України

3.2 Загальний підхід. Визначення припущень та обмежень моделі

3.3 Моделювання структури та конфігурації електричних мереж системи розподіленої генерації

3.4 Визначення електричної потужності базового кластеру мережі

3.5 Визначення фрактальних властивостей ідеалізованої моделі розподільчої мережі

3.6 Визначення номенклатури номінальних напруг електричних розподільчих мереж за рівнем ітерації

3.7 Розрахунок показників ідеалізованої моделі

3.8 Розробка схемних рішень електричної мережі, яка моделюється

Висновки за третім розділом

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСУ – автоматична система управління;

ВДЕ– відновлювані джерела енергії;

ВІР– відкритий розподільчий пристрій;

РПВН – розподільчий пристрій високої напруги

ЗНЕ – засоби накопичення енергії;

РГ – розподілена генерація;

СЕП – система електропостачання

ФР – фрактальна розмірність;

ФКС – фрактально-кластерна структура;

ВСТУП

Актуальність полягає у тому, що протягом періоду повномасштабного вторгнення до України країни агресора відбувалося кілька періодів збоїв в роботі об'єднаної енергосистеми України національного масштабу. Ураження критично-важливих об'єктів української енергетики є реально досяжною метою ворога, що призведе до катастрофічних наслідків та паралічу усіх сфер виробництва та цивільного життя громадян.

З огляду на це актуальним стає питання розробки нових принципів побудови конфігурації електричних мереж, яка дозволить значною мірою підвищити стійкість роботи електричних мереж та підвищити рівень енергетичної безпеки усіх її об'єктів. Для цього необхідно розробити нові принципи побудови розгалужених електричних мереж, які дозволять значною мірою підвищити стійкість їх функціонування навіть в умовах воєнних дій. Відповідно до розробленої та запропонованої нової фрактально-кластерної конфігурації та топології електричних мереж необхідно визначити основні порівняльні техніко-економічні характеристики нових електричних мереж.

Об'єкт дослідження – процеси електропостачання з розподільчих мережах.

Предмет дослідження – конфігурація, структурно-геометричні та техніко-економічні показники побудови розподільчих мереж

Мета роботи – підвищення рівня енергетичної безпеки споживачів шляхом вдосконалення конфігурації та топології електричних мереж.

Завдання дослідження

1. Проведення ґрунтовного критичного аналізу сучасних тенденцій розвитку електричних мереж
2. Проведення аналізу рівня енергетичної безпеки систем електропостачання в період воєнного стану

3. Розробка пропозицій що до покращення показників надійності роботи розподільчих електричних мереж шляхом вдосконалення їх конфігурації
4. Розробка схемних рішень підстанцій для нової конфігурації електричних мереж

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Загальні фрактальні властивості технологічних, енергетичних та електронних систем та об'єктів

Фрактал (лат. fractus — подрібнений, зламаний, розбитий) — геометрична фігура, що має властивість самоподібності, тобто складена з кількох частин, кожна з яких подібна до всієї фігури цілком. Фрактазм - самостійна точна наука вивчення та складання фракталів. Фрактали відомі вже майже століття, добре вивчені та мають численні додатки в житті. В основі цього явища лежить дуже проста ідея: нескінченна за красою та різноманітністю безліч фігур можна отримати з відносно простих конструкцій за допомогою всього двох операцій - копіювання та масштабування [1,2]. Розрізняють динамічні та геометричні фрактали. Причому теорія фракталів завдяки вченим та ентузіастам вийшла за межі математики і тепер використовується як стосовно технічних наук, так і в мистецтві. Досить цікавим проявом фракталів у мистецтві є переклад графіків фінансової кризи на музику німецьким музикантом-експериментатором Йоханнесом Крайдлером. Музикант привласнив певні ноти індексам, що коливаються. Тому завдяки його творчій обробці тепер можна почути, з яким звуком «падали» Lehman Brothers, General Motors та Bank of America. Фрактали також використовуються в теорії інформації при розробці методів стиснення даних (наприклад, при стисканні графічних даних в основному застосовується властивість самоподібності фракталів - для запам'ятовування невеликого фрагмента малюнка і перетворення, за допомогою яких можна отримати інші частини, потрібно набагато менше пам'яті, ніж для зберігання всього файлу. В умовах сучасної тенденції до зростання обсягу різноманітних даних застосування фрактального стиску представляє інтерес [3,4]. Проте теорія фракталів може мати й інші науково-технічні додатки. Вже зараз фрактальні структури можна спостерігати у

різних галузях електротехніки та радіотехніки. Фрактальні антени - відносно новий клас електрично малих антен (ЕМА), що принципово відрізняється своєю геометрією від відомих рішень. По суті, традиційна еволюція антен базувалася на евклідовій геометрії, що оперує об'єктами цілісної розмірності (лінія, коло, еліпс, параболоїд тощо) [4]. Моделювання та експерименти показують, що фрактальні антени дозволяють отримати практично такий самий, як і у звичайних антен, коефіцієнт посилення. Однак габарити фрактальних антен набагато менші, відповідно і розмір радіоелектронного виробу може бути зменшений, а це важливо для мобільних пристроїв. Вважається, що вивчення можливості застосування фракталів у приймально-передаючих пристроях почалося у 80-х роках 20-го століття. Найбільш цікавим для подальшого розгляду має фрактал, званий кривою Коха (рисунок 1.1), що відноситься до виду геометричних фракталів.

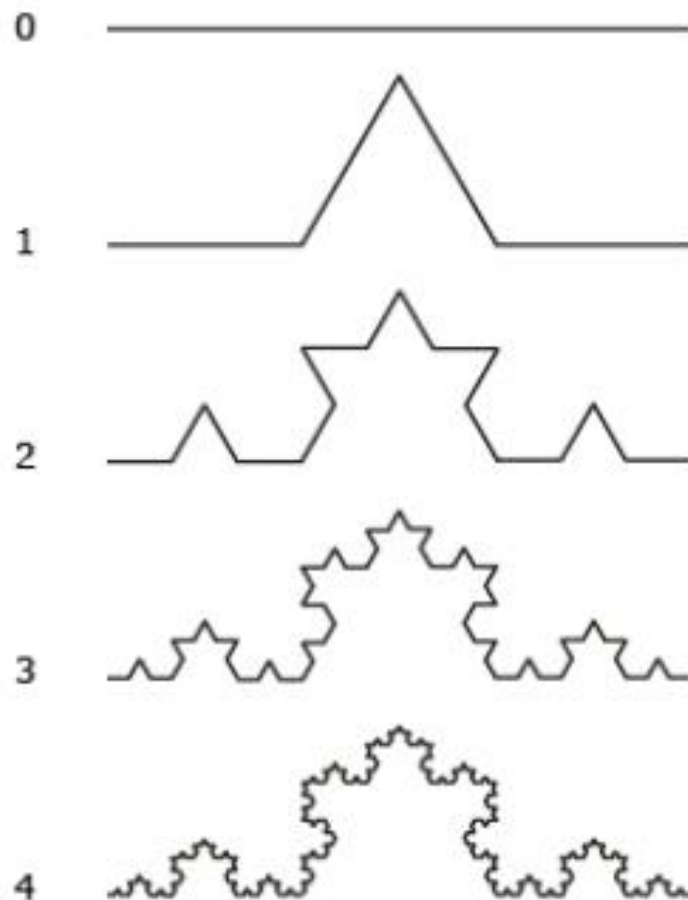


Рис. 1.1 Побудова кривої Коха

Математично довжина отриманої в результаті деякого числа ітерацій кривої може бути знайдена за формулою:

$$l = h \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^n$$

де h - довжина вихідного відрізка; n - число ітерацій.

На рис. 1.2 представлено фрактальну антену, виконану у вигляді раніше наведеної кривої Коха. Слід зазначити, що антена форми кривої Коха — це не єдине можливе виконання фрактальної антени. Як окремі пристрої приймально-передавальної апаратури можуть використовуватися елементи, що мають форму кривих Пеано, наприклад оригінальної кривої Пеано (рисунок 1.3) або рекурсивної кривої Пеано (рисунок 1.4).

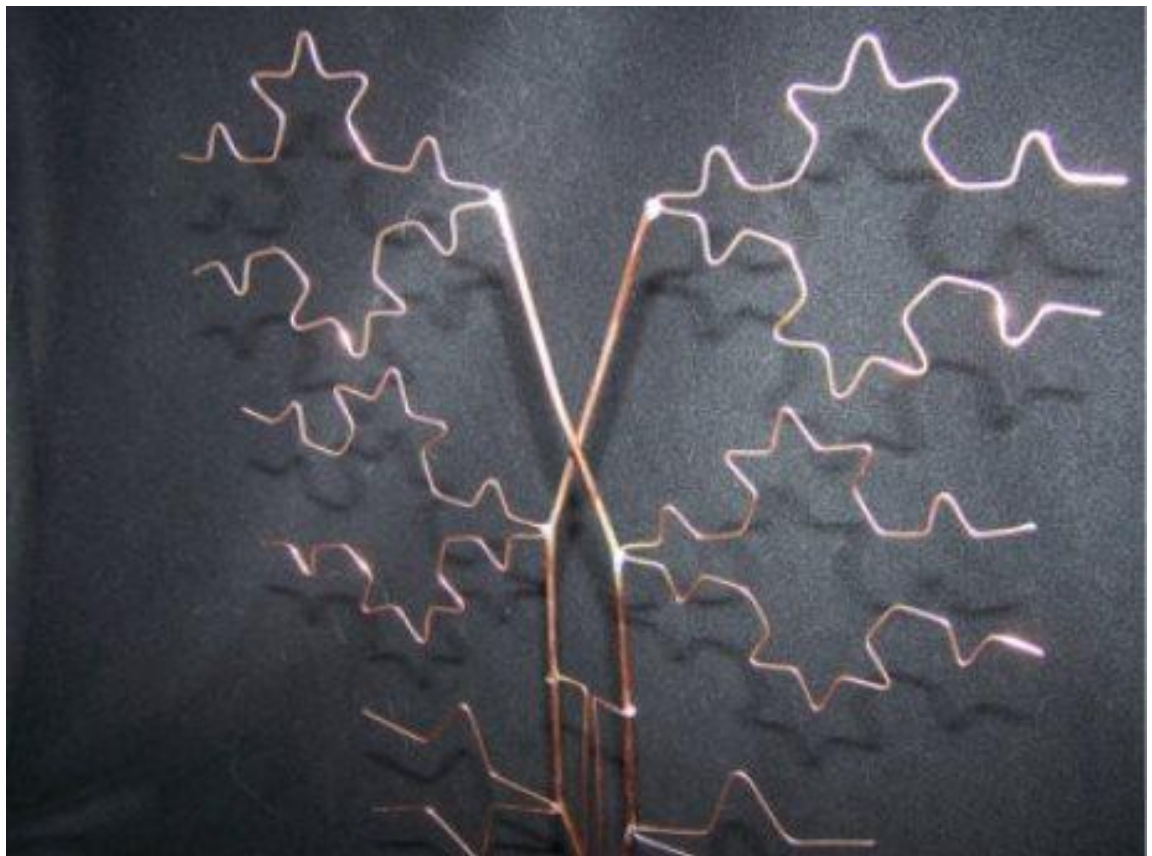


Рис. 1.2 Фрактальна антена у вигляді кривої Коха

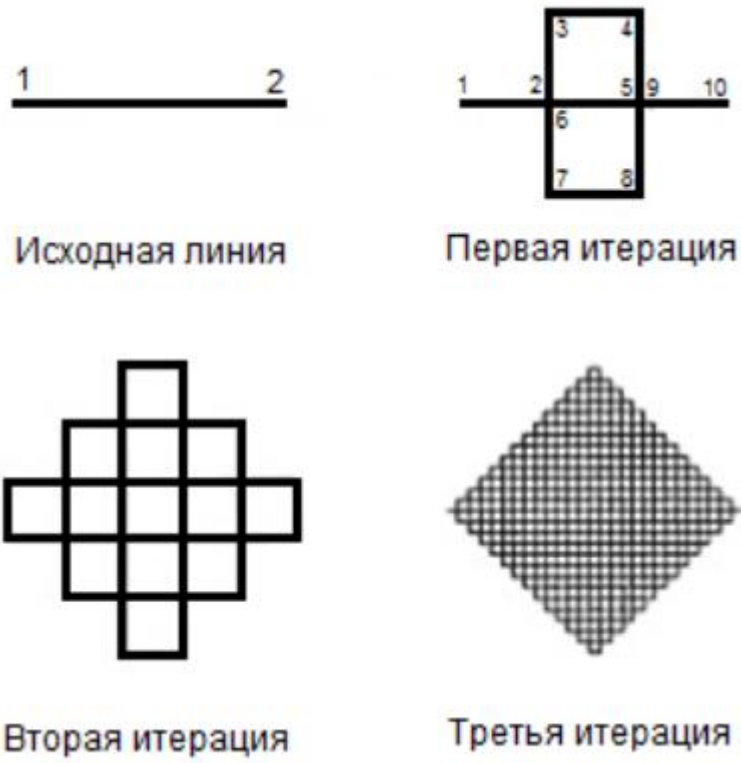


Рис. 1.3 Побудова кривої Пеано

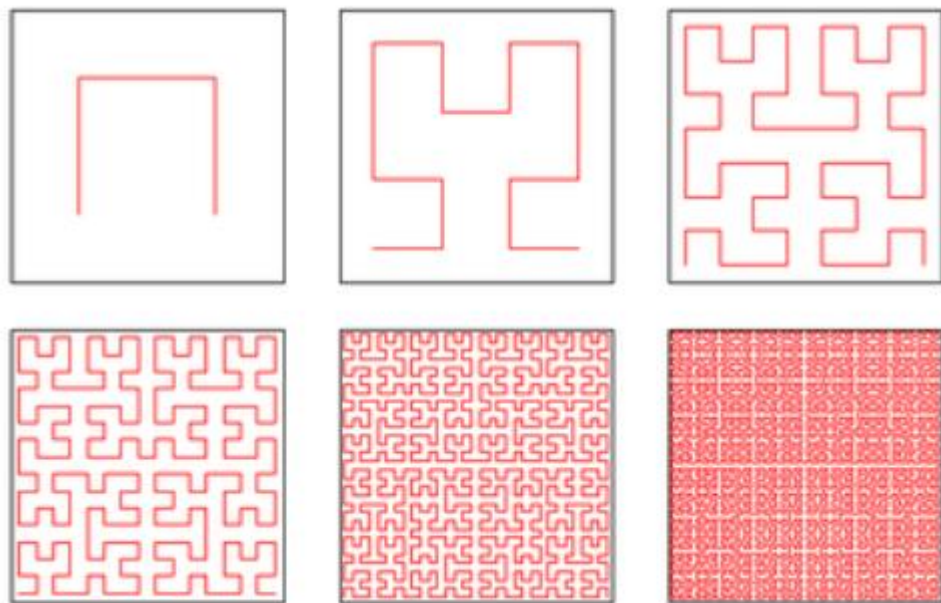


Рис. 1.4 Побудова рекурсивної кривої Пеано

Антенна, форму якої частково побудовано основі рекурсивної кривої Пеано, наведено рис. 1.5

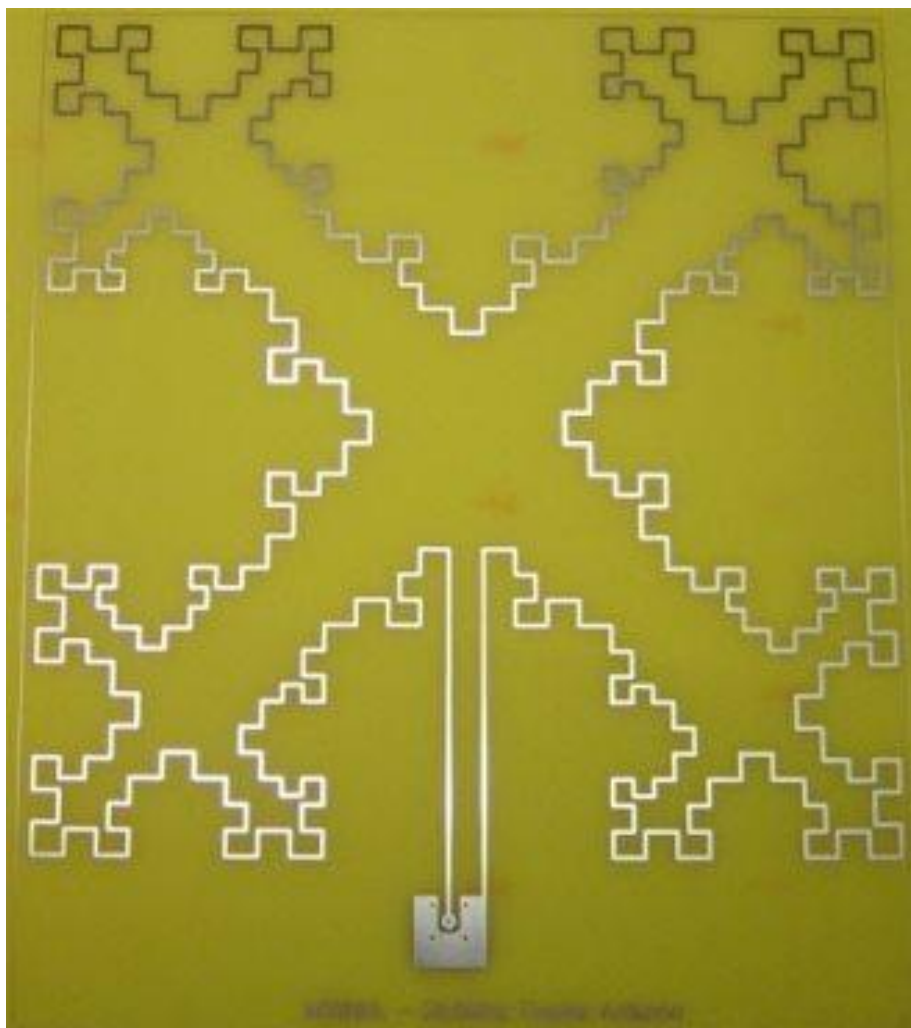


Рис 1.5 Експериментальна фрактальна антена

В цілому слід зазначити, що теоретично уявити механізм взаємодії фрактальної приймальної антени та електромагнітних хвиль, що падають на неї, складно через відсутність аналітичного опису хвильових процесів у провіднику зі складною топологією [5]. У силу вищезгаданого важливими факторами у вивченні фрактальних антен є математичне моделювання та експеримент. Також як фрактал можна розглядати структуру графену. Цей матеріал, як відомо, складається із шестикутних осередків, з'єднаних між собою, саме це нагадує фрактальну структуру (рис. 1.6). Графен має видатні фізичні та електротехнічні характеристики. Крім удосконалення відомих пристроїв, використання графену допоможе створити нові вироби.

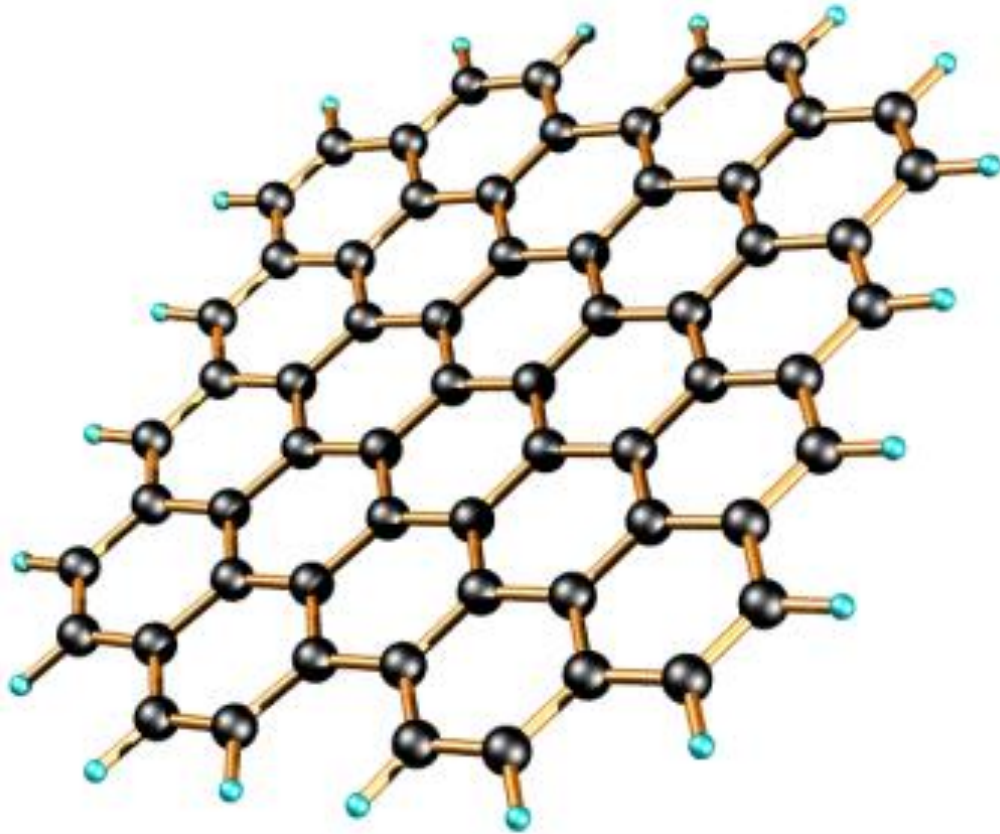


Рис. 1.6. Структура графену

1.2 Загальні математичні засади застосування фракталів

Наш світ і його реальні структури дуже нелінійні, і вони часто не можуть бути описані в термінах Евклідової геометрії. Актуальною вважається фрактальна геометрія як розділ математики, гуманістичного і квазіпрагматичного напрямку. Крім того, фрактальна геометрія та основи фрактального числення мають однозначний зв'язок з природою, мистецтвом, наукою, технікою, досягненнями у розвитку комп'ютерів та галузі ІТ. Фрактальна геометрія і моделювання присутні майже у всьому природному творінні. Це має також вплив на особливу красу природи і особливий спосіб мислення, яке можна відчувати розумом і серцем. Фрактал має такі важливі властивості, як фрактальна розмірність, самосиметрія та самоподібність та ступеневе (неціле) заповнення простору, яке може бути використане для інтерпретації реальної світові нелінійні задачі та системи. Фрактальну

геометричну розмірність можна інтерпретувати як кількісне визначення простору та здатність заповнення геометричного лінійного простору. Тоді як простори евклідової геометрії мають цілі розміри, наприклад розмір лінії «1», розмір площі «2» а розмір об'єму «3», то фрактали мають дробові розміри.

Криві заповнення простору після нескінченної ітерації можуть досягати цілого числа розміру. Поєднання фрактальної геометрії з динамічними системи призводять до нелінійних динамічних систем, які можуть допомогти у вирішенні проблем у нашу сучасну технологічну епоху

Теорія Ейнштейна була не в змозі вирішити таку проблему, як властивості динаміки системи. На рис. 1.7 показані ітерації фракталів Серпінського а на рис. 1.8. базова класифікація типів фракталів.

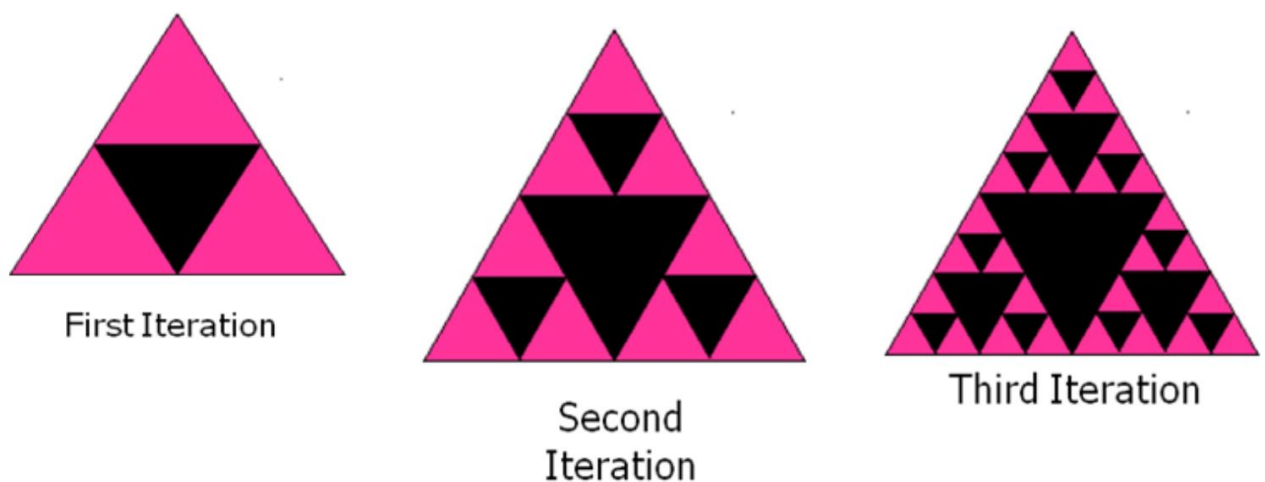


Рис. 1.7 Ітерації фракталу «серветки» Серпінського
(перша, друга та третя ітерації)

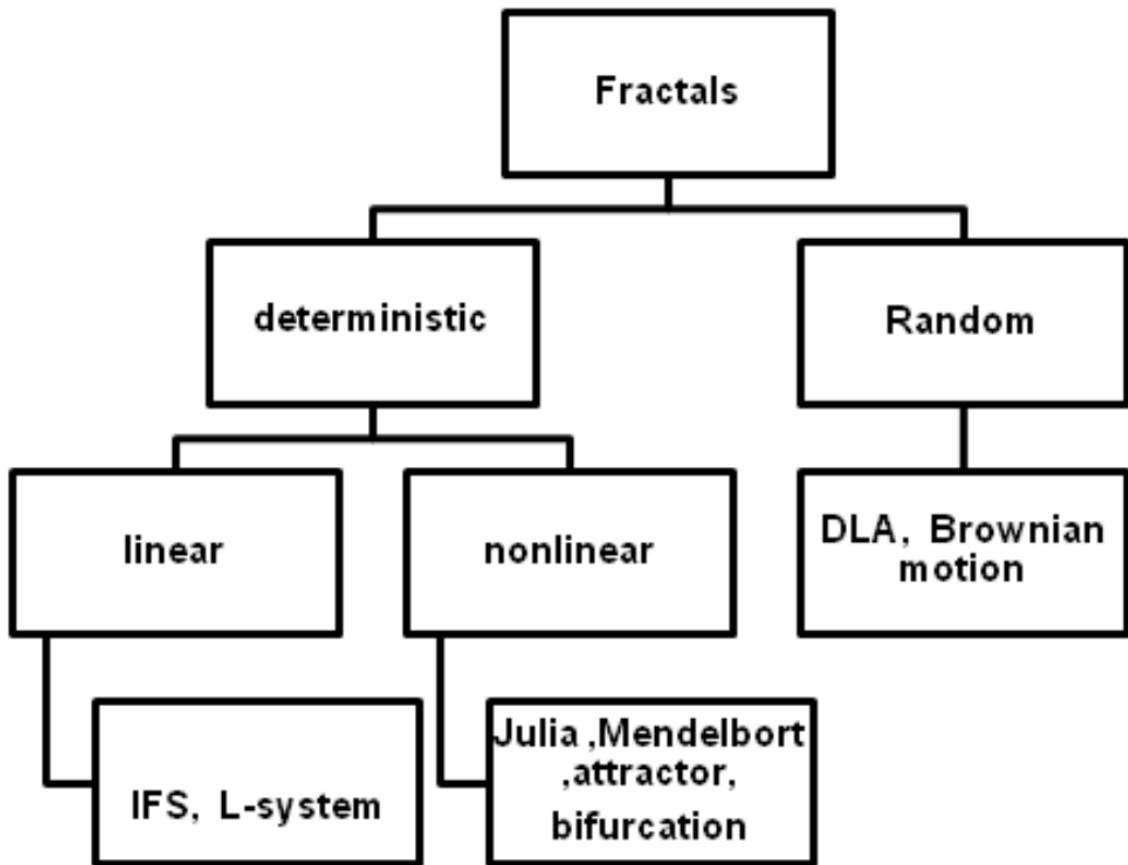


Рис. 1.8 Базова первинна класифікація фракталів

Фрактальну розмірність (ФР) можна визначити різними методами залежно від типу за яким системи стають фрактальними. Метод розміру кластеру є зазвичай для детермінованих систем, таких як вимірювання берегової лінії, кореляційний вимір призначений для вимірювання випадкової системи розмірності дивного атратора динамічної системи та для аналіз часових рядів “Н”, який пов’язаний з ФР.

Розмір Хаусдорфа, який залежить від кількості куль яка необхідна, щоб покрити фрактальну шкалу розміром r радіусом кулі.

Розмір підрахунку комірки, який визначається кількістю комірок, необхідних для покриття фрактальної шкали розміром кластеру.

Інформаційний вимір, як середнє інформація, необхідна для визначення ваги зайнятого кластеру.

Кореляційний розмір, обчислений за кількістю точок, які використовуються для створення зображення, і кількість пари точок на відстані ϵ одна від одної.

Якщо « s » є масштабним фактором і розмірністю Хаусдорфа an об'єкт заснований на покритті об'єкта маленькими дисками або кульками за мінімальне покриття. Кластер розмірності підмножини X з площиною визначається подібним чином шляхом підрахунку кількості комірок а сітка з константою « s », яка перетинає X , $N(s)$. Тоді „ X “ має розмірність « D », якщо $N(s)$ задовольняє степеневому закону.

$$N(s) = c(1/s)^D \quad (1)$$

Асимптотично в тому сенсі, що

$$\lim_{s \rightarrow 0} N(s) s^D = c. \quad (2)$$

Розмір кластеру D можна обчислити з (2) як

$$D = \lim_{s \rightarrow 0} [-\log N(s)/\log(s)]. \quad (3)$$

Фрактальна розмірність, визначена рівнянням (3), зазвичай дорівнює ототожнюється з розмірністю Хаусдорфа–Безіковича і є відомий як розмір місткості. Є прекрасна відмінність між розмірністю Хаусдорфа–Безіковича та розмір ємності, тоді як перший отримується шляхом покриття набір мінімально з гіперкубами, які можуть відрізнятись розмір; останній отримується за допомогою того самого процесу, за винятком того, що гіперкуби однакового розміру. Просторова кореляція вимірюється в термінах кореляційного виміру.

$$d_C = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r}, \quad (4)$$

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - \|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_j\|) \quad (5)$$

Параметр Херста (H) пов'язаний з шорсткістю динамічного часу крива серії, як крива навантаження електростанції, і може бути використана як міра ФР. Оцінка показника Херста для даних набір визначає, чи є дані чисто випадковими ходити або має базові тенденції. Усі відомі представлення таких сплесків у процесах мають одне загальне значення параметра.

Цей параметр має різні, але еквівалентні представлення і імена. Це H, FD і експонента “ γ ” 1/f Спектри потужності процесу пов'язані як

$$\gamma = 2H - 1 = 5 - 2D \quad (6)$$

Існує також форма самоподібності, яка називається статистичною самоподібністю. Припускаючи, що ми мали один із тих уявних нескінченні самоподібних наборів даних, будь-який розділ набору даних буде мати такі ж статистичні властивості, як і будь-які інші. Статистична самоподібність виникає в обширній кількості областей техніки, сліди трафіку комп'ютерної мережі є самоподібними.

Інші приклади статистичної самоподібності існують у картографії (вимірювання берегових ліній), комп'ютерній графіці (імітація гір і пагорбів), біології (вимірювання межі колонії цвілі) і медицині (вимірювання росту нейронів). Самосиметрія означає, що надбудова утворюється з невеликої структури, яка має масштабну інваріантність.

1.3. Застосування в електротехніці і електроніці

Існують різні застосування фракталів в електротехніці та деяких галузях електроніки:

Виявлення несправності з високим опором

В енергетичних системах несправності з високим опором є дуже своєрідними, ці несправності не споживають достатньо струму для роботи захисного режиму тому дуже важко передбачити реле. Фазні струми і напруги в розподільній енергосистемі змінюються з певною ступінню хаосу, коли виникають збої з високим опором можливо застосувати концепції фрактальної геометрії для аналізу хаотичних властивостей високоімпедансних несправностей. Ці несправності також не забезпечують зворотного шляху струму, у міру прогресування пошкодження він плавить провідник, викликає дугу, зміщення ґрунту тощо викликає дуже хаотичний струм. ФД є вимірювання цієї несправності, як показано на рис.1.9.

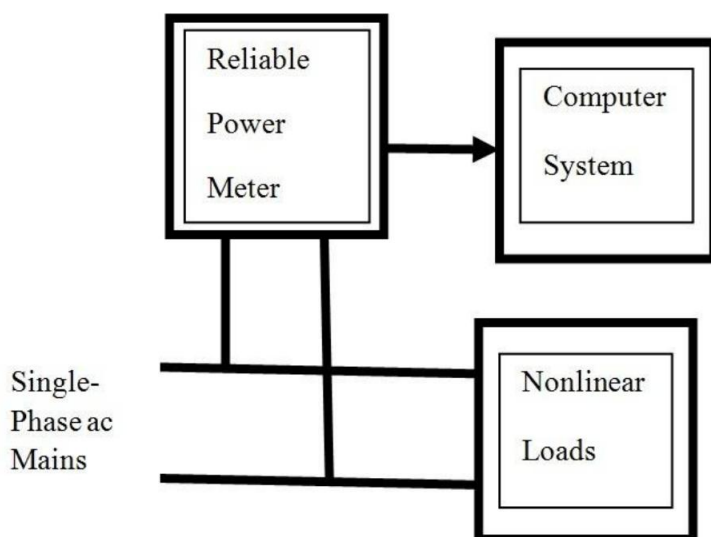


Рис. 1.9 Блок-схема локатора несправностей

Фрактальний конденсатор

На відміну від звичайних конденсаторів метал-метал, щільність фрактального конденсатора збільшується з масштабуванням. Питома ємність одиниці площі фрактальної структури залежить від розмірності фракталу. Щоб покращити щільність макета фракталу, слід використовувати великі розміри. Фрактали додають ще один ступінь свободи конструкції конденсаторів, що дозволяє збільшити щільність ємності, яку слід обміняти на менший послідовний опір.

Більшість фрактальних геометрій рандомізують напрямок струму і, таким чином, зменшити ефективну послідовну індуктивність. Фрактали зазвичай мають багато шорстких країв та точок перегибів, які накопичують електростатичну енергію та ефективніше її зберігають в порівнянні з інтероцифрованими конденсаторами.

Моделювання блискавки

Моделювання блискавки реалізовано за допомогою фракталу. Для моделювання використовуються різні додатки. Дослідження блискавки на повномасштабній моделі літака на землі потребує удару блискавки, створеного шляхом фрактального моделювання. Високовольтне повномасштабне випробування обладнання під напругою та дослідження пробою діелектрика використовує ФР як параметр.

Планування навантаження

Крива навантаження дуже динамічна і залежить від різних випадкові параметри, такі як температура, вологість, час день і соціальні параметри, такі як фестивалі, свята тощо. Крива може бути пов'язана з ФР. Шорсткість як міра може бути використовується системами штучного інтелекту (ШІ) для планування електричних навантажень в електричних мережах.

Фрактальні антени

Наступна велика можливість для бездротового компонента це виготовлення компактних антен. Фрактал-технологія, застосована до антен, досягає необхідної мініатюризації для створення повної бездротової системи в комплекті (FWSiP) реальності. Властивості заповнення простору фракталів дозволяють виготовляти мініатюрні антени з оптимальними параметрами продуктивності і багатодіапазонності. Фрактал-технологія антени підходить для Bluetooth, WLAN, GPS, UWB і Zigbee, а також для датчиків для автомобільної та біомедицинської промисловості та промислового призначення. Деякі ключові переваги антен з фрактальною геометрією:

- широкосмугова та багатосмугова АЧХ, що походить від властивостей фрактальної геометрії антени;
- компактний розмір порівняно зі звичайними антенами конструкцій (мініатюризація), зберігаючи добре до відмінна ефективність і приріст.
- механічна простота (безвідмовність) і міцність. Характеристики фрактальної антени отримані завдяки його геометрії, а не додаванням дискретних компоненти.
- розробка конкретних багаточастотних характеристик що містить певні стоп-смуги, а також специфічні кілька смуг пропускання.

Фрактальна антена Аполлонової прокладки з CPW (копланер-хвилевід) з монопольним живленням, показане на рис.1.10. Антена є розробленою і виготовленою з матеріалу FR4 з діелектричною постійною (4,33).

Експериментальний результат в лабораторних умовах виміряні зворотні втрати (параметр S11 -10 дБ) вектор-аналізатором який показує багатоканальне поведінку з центром частоти 1,265 ГГц, 4,66 ГГц і 7,8 ГГц з пропускнуою здатністю 50%, 17,5% і 15% відповідно. Ця багатозонність досягається за допомогою фрактальної геометрії [6].

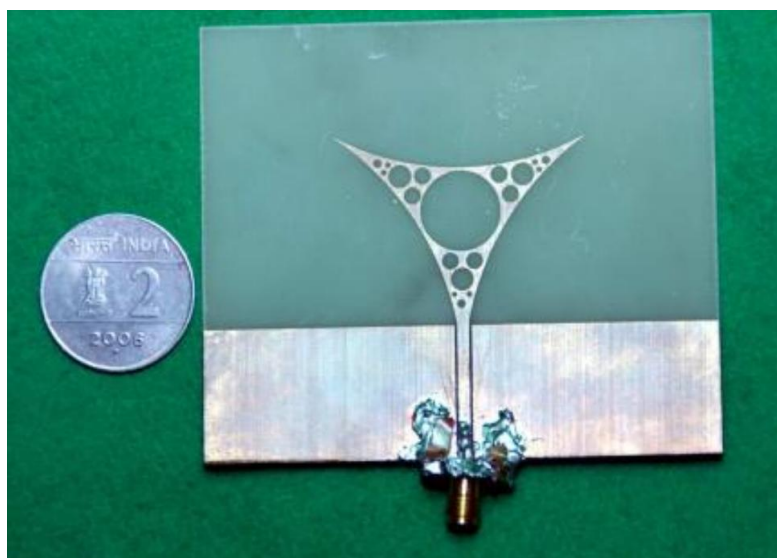


Рис. 1.10 Фрактальна антена

Фрактальне кодування в комунікації

Фрактально-кодовані зображення розпаковуються за допомогою схеми декодування низької складності [7]. На основі фракталів стиснення використовує локальну самоподібність у зображеннях текстур і природні сцени. Текстури фрактального зображення пропонують значну економію пропускної здатності як для зберігання, так і для передачі. Фрактальне стиснення/декомпресія може перевершити стандарт JPEG у мобільних додатках, як показано на рис. 1.11.

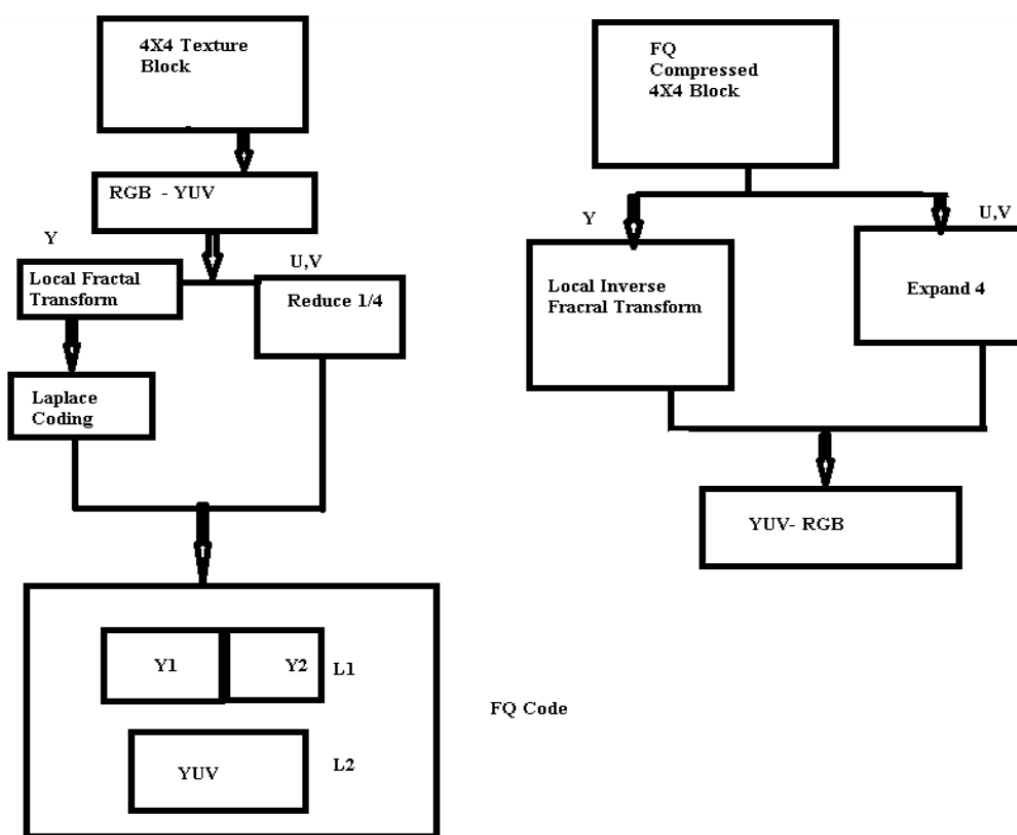


Рис. 1.11 Фрактальне кодування

Алгоритм стиснення зображення такий:

1. Вказується швидкість (доступні біти) і спотворення (допустима помилка) для цільового зображення.
2. Розподіл даних зображення на різні класи на основі на їх важливість.
3. Розподіл доступного бітового бюджету між ними, щоб викривлення було мінімальним.

4. Квантування кожного класу окремо за допомогою розподілу бітів інформації, яка отримана на кроці 3.
5. Кодування кожного класу окремо за допомогою ентропійного кодера із записом у файл.

Трансформатор опору

Використання фрактальної мікросмужки Серпінського для створення трансформатора зі ступінчастим імпедансом, що використовують фрактальну форму Серпінського, як показано на рис. 1.12.

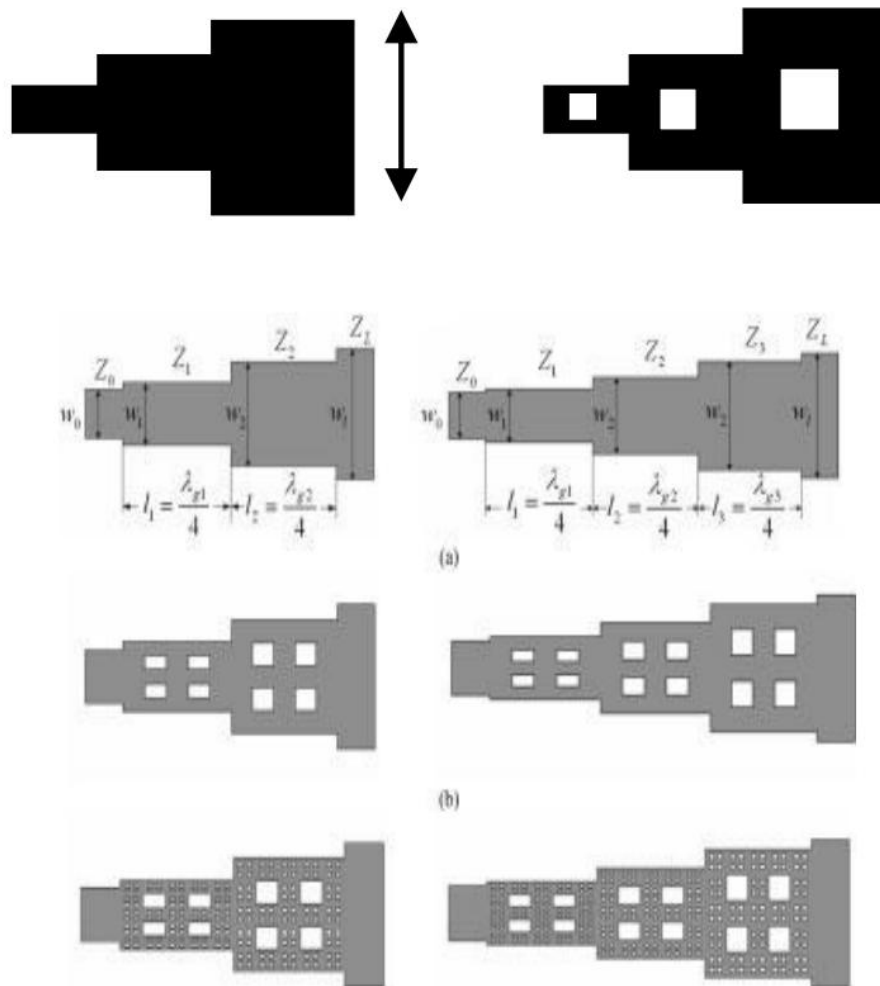


Рис. 1.12 Фрактальний трансформатор опору

Трансформатори зі ступінчастим опором можуть значно підвищити робочу смугу частот. Fractal Shape покращує пропускну здатність до 44,0% і 73,9% (S11-30 дБ) що досягається представленими двосекційними та

трисекційними фрактальними трансформаторами максимального плоского ступінчастого опору [5]. Z_1, Z_2, Z_3 – імпеданс, W_1, W_2, W_3 – ширина та $\lambda g_1,$

$\lambda g_2, \lambda g_3$ – довжини хвилі, де $l_1 = \frac{\lambda g_1}{4}, l_2 = \frac{\lambda g_2}{4}, l_3 = \frac{\lambda g_3}{4}.$

Висновки до першого розділу

1. Природа адаптує фрактальне моделювання для свого створення та існування.
2. Нечітке обчислення містить фрактальні властивості, такі як фрактальна розмірність, самоподібність, масштабна інваріантність при описі та моделювання фізичного явища.
3. Фрактальні параметри і такі властивості, як заповнення простору, ФР, і самоподібність використовується для різних аналізів.
4. Засоби фрактального моделювання та обчислення знайшли своє місце в технічних системах електротехніки та електроніки та є перспективними.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЯК ЗАСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

2.1 Загальні проблеми розвитку систем розподіленої генерації

Проблеми розвитку сучасного виробництва пов'язані із попитом на електроенергію, який випереджає приріст генеруючих потужностей. У зв'язку з цим як один із важливих засобів вирішення Енергетичного забезпечення у світовій практиці розглядають розподілену генерацію (РГ). Під розподіленою генерацією розуміється сукупність модульних генеруючих об'єктів малої потужності, що виробляють електроенергію у безпосередній близькості до місця споживання. При цьому параметр «близькість» до місця споживання оцінюється за класом напруги розподільчої мережі, до якої підключається об'єкт, що генерує. Крім електростанцій невеликої потужності у концепції РГ важлива роль відводиться відновлюваним джерелам енергії (ВІЕ) – це джерела перетворення сонячної енергії, енергії вітру та водних потоків, а також органічних відходів, пов'язаних із життєдіяльністю людини – промислові, сільськогосподарські, побутові відходи.

Останнім часом для багатьох регіонів гостро постає питання енергетичної безпеки, за якої споживач має надійний доступ до необхідної енергії, а постачальник – до її споживачам при стабільних та прийнятних цінах.

Величезні розміри країни за низької щільності населення окремих регіонах призводять до неприпустимих у сучасних умовах витрат на транспорт електроенергії, забезпечення захисту від негативного впливу природно-кліматичних умов, підвищення надійності елементів протяжних електричних мереж.

Програми інвестицій електромережових компаній, як і раніше, вимагають багатомільярдних витрат, які враховуються у тарифі на електроенергію. При цьому управління мережею практично немає модернізується і не розширюється в обсязі,

необхідному для планового розвитку галузі, а кількість аварій та інцидентів збільшується. Тому будівництво споживачем власних енергоджерел, є аналогом витрат за технологічне приєднання до ліній електромережевої компанії. При цьому витрати співставні, а окремих випадках тариф на технологічне приєднання у кілька разів перевищує суму, потрібну для інвестування проектів зі створення власних енергоджерел розподілена генерація.

Підключення систем РГ до основної електричної мережі дозволяє створювати необхідні рішення під час роботи у двох режимах:

1) паралельно з основною електричною мережею: у нормальному режимі РГ видає електроенергію, показники якості якої можна порівняти з розподільчою мережею; в післяаварійному режимі с відключення від основної мережі РГ перетворюється на автономний режим роботи;

2) автономно: у тих місцях, де відсутня розподільча мережа РГ забезпечує потребу в електроенергії, показники якості якої відповідають вимогам навантаження конкретних електроустановки.

Проте створення РГ у розподільчій мережі, надаючи їй нові властивості, створює нові проблеми. Одна з них – контроль та дослідження нормальних та післяаварійних режимів систем електропостачання, що містять РГ, та управління цими режимами за допомогою «розумних мереж», званих Smart Grid.

Для забезпечення інформаційного обміну даними у Smart Grid передбачено використання різних інформаційних моделей та технологій. Smart Grid забезпечує практично безперервний керований баланс між попитом та пропозицією електричної енергії. При цьому елементи мережі постійно обмінюються між собою інформацією про параметри електричної енергії, режимах споживання та генерації, кількості споживаної енергії та планованому споживанні, управління виробничими активами та планування ремонтних запасів. Концепція Smart Grid спрямована на ефективний захист та самовідновлення від великих збоїв, природних катаклізмів та зовнішніх

загроз. Велике значення надається підтримці вирішення технічних завдань за допомогою експертних систем, нейромережових технологій оцінки потенціалу розвитку господарських систем, організації нейромережевого прогнозування господарської діяльності підприємства електричних мереж, нейромережева оцінка господарської діяльності підприємства. Істотний вплив на надійність РГ і якість електричної енергії, що поставляється, надає знос мережевого, генеруючого та підстанційного електрообладнання, що має різні аспекти впливу на всю систему РГ та на вирішення завдань оперативного контролінгу в умовах експлуатації подібного обладнання.

Враховуючи очевидні переваги та наявні недоліки, використання РГ має гарну перспективу як віддалених від основних мереж районів, так сільській місцевості. 2000 року потужність ТЕЦ (блок-станцій) на промислових підприємствах у Канаді становила 7,7 ГВт або близько 7% від загальної встановленої потужності 111 ГВт. Потужність РГ ВІЕ (сонячних батарей, вітрогенераторів та приливних станцій) становила 500 МВт. У Західній Європі встановлена потужність РГ оцінювалася в 2012 році в 50 ГВт, включаючи малі ГЕС та вітроелектростанцій, потужність останніх – 26, 9 ГВт.

2.2 Наукові проблеми розподіленої генерації

Протягом багатьох десятиліть, аж до кінця ХХ століття, світова енергетика розвивалася шляхом підвищення концентрації та збільшення одиничних потужностей. З метою підвищення ККД збільшувалися потужності енергетичних установок, що підвищувалися рівні номінальної напруги електричних мереж. За ці роки були створені об'єднані електроенергетичні системи (ОЕС), що покривають своєю мережею величезні території, синхронні зони яких налічували сотні електростанцій із встановленою потужністю в сотні гігават. Для забезпечення роботи єдиних ОЕС створювалися багаторівневі ієрархічні системи диспетчерського управління, які дозволяли керувати режимами роботи, підвищувати надійність, економічність ОЕС та відновлювати електропостачання після

аварій. Централізований шлях розвитку енергетики призвів до виникнення енергетичних корпорацій, споживачів, що монопольно забезпечують енергопостачання, на своїй території та поєднують усі основні види енергетичного бізнесу: вироблення, транспорт, продаж (збут) енергії, диспетчеризацію, ремонти, техобслуговування та інші допоміжні послуги.

Лібералізація електроенергетики, що поширилася наприкінці ХХ ст. практично повсюдно, призвела галузь до конкуренції та суттєво знизила її монопольний характер. Неабиякою мірою цьому процесу сприяло розвиток нових енергетичних технологій, пов'язаних зі зниженням поодиноких потужностей енергоустановок і названих «розподілена генерація» (РГ).

Новий рівень розвитку технологій дозволяє розглядати РГ як альтернативний, по відношенню до централізованої енергетики, шлях забезпечення споживачів електричною енергією РГ - принципово нове явище в енергетиці. Внаслідок цього, як показав аналіз літератури з цієї проблеми, для терміна РГ поки що відсутня загальноприйнята ухвала. У зарубіжній літературі для поняття «розподілена генерація» використовується різна термінологія та визначення. Наприклад, в Австралії часто використовують термін «вбудована генерація», у країнах Північної Америки – термін «розосереджена генерація», в Європі та деяких азіатських країнах – «децентралізована генерація». Крім термінології суттєво відрізняється і класифікація пристроїв РГ, зокрема, класифікація за встановленою потужністю. На міжнародному рівні ці відмінності обумовлені особливостями політичного та економічного устрою та геополітичного розташування. Наприклад, особливості енергетики Великобританії та Уельсу, де генерація потужністю менше 50 МВт не бере участі на оптовому ринку електроенергії, а диспетчеризація здійснюється тільки для станцій потужністю понад 100 МВт, логічно зумовлюють класифікацію РГ як пристроїв із встановленою потужністю менше ніж 100 МВт. У Швеції верхньою межею потужності малої генерації є потужність 1,5 МВт. Це пов'язано з тим, що шведське законодавство в галузі енергетики розглядає

поодинокую встановлену потужність агрегату, а чи не станції загалом. Наприклад, вітрова ферма із сотні вітрогенераторів потужністю по 1,5 МВт кожен, є об'єктом малої генерації.

Відмінність класів напруг для передавальної та розподільчої мереж різних країнах також створює бар'єр для чіткого формулювання визначення поняття малої генерації. Тому в даному випадку буде доречно проводити відмінності в галузі компетенції енергетичних компаній, пов'язаних з передачею та розподілом. Ці та багато інших особливостей міжнародного характеру ускладнюють формулювання загального визначення РГ, що враховує особливості розташування і класифікації даних пристроїв.

Наступне визначення: «розподілена генерація – це енергетичні ресурси, потужністю не більше 100 МВт, що встановлюються як з живильною стороною, так і з боку споживання, які можуть мати повсюдне застосування у розподільчих мережах для забезпечення надійного електропостачання споживачів».

Останнім часом дедалі більше наукових публікацій зарубіжних вчених пов'язані з питаннями РГ. Цьому сприяє те що, що у багатьох економічно розвинених станах Європи та США частка електроенергії, виробляється в системах РГ, знаходиться на рівні 15-30%. істотну частку РГ становить енергія, одержувана з поновлюваних джерел. У станах Європи на відновлюваних джерелах до 2020 року прогнозується вироблення 20% електроенергії, а США до 2030 року 30% нашої країні розвиток РГ також відбувається бурхливими темпами, але практично без застосування установок, що використовують відновлювані джерела енергії в першу чергу, газотурбінні та газопоршневі установки потужністю до 30 МВт, що встановлюються великими промисловими підприємствами зі свого боку межі балансової приналежності зниження обсягів енергії, що купується у енергопостачальної компанії. Великі споживачі звернули увагу на РГ насамперед через постійне зростання тарифів на електричну енергію, високу

плату за приєднання до електричних мережам, а також інвестиційної привабливості проектів із розвитку.

За оцінками фахівців операторів розподілу електроенергії у зоні відповідальності Північної енергосистеми у 2019 році потужність установок РГ у споживачів перевищила 800 МВт, а у Харківській області ця цифра становить 450 МВт. В найближчі роки слід очікувати суттєвого зростання потужностей РГ, у тому числі і на відновлюваних джерелах.

Існує два основних типи класифікації пристроїв РГ. Перша класифікація розглядає встановлену потужність генераторних установок:

- мікро (1 Вт – 5 кВт);
- малі (5 кВт – 5 МВт);
- середні (5МВт – 50 МВт);
- великі (50 МВт – 300 МВт) (рідко використовуються).

Наступна класифікація заснована на технології виробництва електроенергії:

- поновлювані;
- блокові;
- когенераційні.

РГ, заснована на відновлюваних джерелах енергії, розглядається як найбільш сприятлива для довкілля. Блокова РГ складається з окремих модулів, які можуть бути виготовлені та пущені в роботу за невеликий проміжок часу за наявності великого попиту на електроенергію. Когенераційні установки дозволяють використовувати як електрика, так і тепло, що виробляється в процесі генераторної роботи установки.

Для систем РГ застосовуються такі технології:

Малі газотурбінні установки та мікротурбіни

По суті, турбіни використовують технологію, схожу з використовуваною в реактивні двигуни. Ці пристрої мають низький ККД, проте він може бути значно збільшено за рахунок використання когенераційного принципу роботи. Ці установки є шумними, однак вони

виробляють менше кількість викидів шкідливих азотовмісних газів, ніж інші типи генераторних установок.

Поршневі двигуни

Ці установки використовують циліндри та поршні, як і двигуни внутрішнього згоряння автомобілів, мають вищий ККД, але вимагають великих витрат за обслуговування. Поршневі двигуни більш галасливі та викидають в атмосферу велику кількість вуглекислого газу та азотовмісних газів.

Сонячні батареї

Технологія використання сонячних батарей є абсолютно чистою екологічного погляду. Також невеликі експлуатаційні витрати. Тим не менш, існує обмеження щодо розташування пристроїв даного типу, крім вони вимагають значних капітальних вкладень. Більше того, без додаткового введення пристроїв акумуляування електроенергії вихідна. Потужність сонячних батарей нерівномірна.

Вітрові генератори

Вітрові генератори, як і сонячні батареї, є абсолютно чистою технологією виробництва електроенергії. Найчастіше вони використовуються в вигляді про вітрових ферм (не відносяться до РГ). Тим не менш, вітровий генератор може використовуватись в одиночному режимі. Ця технологія має ті ж мінуси, що і у сонячних батарей: висока вартість, обмежені можливості розміщення, нерівномірна вихідна потужність.

Паливні елементи

На сьогоднішній день є безліч технологій для паливних елементів, проте всі вони використовують хімічні реакції взаємодії кисню та водню для вироблення електрики. Вони працюють практично безшумно і здійснюють набагато нижчі викиди вуглекислого газу та азотовмісних речовин в атмосферу, проте мають дуже високу вартістю.

Міні-ГЕС

Міні-ГЕС представляють ще одну технологію вироблення електроенергії без шкідливих викидів в атмосферу, проте їх використання обмежене доступністю водних ресурсів.

Область застосування пристроїв РГ може бути дуже великою. У першу чергу, це резервне (аварійне) електропостачання, можливість покриття пікового навантаження, експорт енергії до розподільчої мережі, когенераційний принцип роботи, вироблення реактивної потужності та регулювання рівня напруги, «острівна» робота під час аварій у розподільчій мережі.

Спільне вироблення тепла та електрики більш відоме як когенерація.

Ця технологія призводить до значного збільшення ККД в порівнянні з автономними синхронними генераторами. На відміну від централізованого вироблення, електрична та теплова енергія, вироблена когенераційними установками, використовується поблизу її місця виробництва та не вимагає спорудження протяжних транспортних мереж. Когенераційні установки є дуже практичними та легко що реалізуються за одночасної потреби як у теплі, так і в електриці, наприклад, для лікарень, університетів, заводів, міського (районного) електро- та теплопостачання.

Існує два найбільш часто використовувані цикли роботи когенераційних установок:

- цикл з використанням тепла відхідних газів та замкнений цикл. Перший цикл характеризується тим, що спочатку проводиться електрична енергія; для подальшого вироблення електрики використовується відбір тепла газів, що відходять при виробництві електроенергії або пари від попереднього термодинамічного циклу;
- у разі замкнутого циклу процес зворотний: спочатку йде процес виробництва тепла, яке згодом використовується для електроенергії.

Наукова проблематика систем із РГ близька до традиційної проблематики великих електроенергетичних систем. Однак кількісні відмінності часто переходять у якісні, що потребує вивчення нових властивостей та особливостей систем із РГ. Можна виділити такі основні напрями наукових досліджень:

– Математичні та оптимізаційні моделі для вибору потужності та розташування різних типів об'єктів РГ. Як критерії розміщення можна розглядати зниження тарифів, зниження втрат електроенергії, підвищення надійності енергопостачання, покращення екологічної обстановки, а також багатокритеріальні підходи, що дозволяють здійснювати комплексну оптимізацію на стадії проектування, будівництва та експлуатації пристроїв РГ. Багато сучасних досліджень у цьому напрямку йдуть по шляху використання оптимізаційних методів штучного інтелекту, застосуванням адаптованих генетичних та імунних алгоритмів, сприяють швидкому пошуку оптимуму у невизначених умовах.

– Розвиток методів планування режимів роботи ЕЕС за наявності ресурсів РГ. Слід зазначити, що висока частка виробітку на відновлюваних джерелах, режими яких залежать від погодних умов і можуть бути різко змінними, призводить до суттєвих труднощів при плануванні та управлінні режимами роботи "великих" ОЕС.

– Регулювання рівнів напруги та реактивної потужності за рахунок пристроїв РГ, що знаходяться поблизу споживачів, істотно підвищує керованість реактивною потужністю та напругою, але вимагає нових підходів до створення системи управління.

– Реконфігурація розподільчих мереж, що містять джерела РГ, формує ще один напрямок досліджень у цій галузі. У зв'язку з збільшенням числа та потужності синхронних генераторів відбувається перерозподіл потоків потужності в мережі, а також збільшуються струми короткого замикання. Тому на стадії ухвалення рішення про будівництво міні-станції необхідно виконати передпроектне обстеження на вибір заземлення нейтралі та

нормальних розривів у мережі. Це завдання особливо актуальна в мережах міст-мегаполісів із розгалуженою розподільчою мережею, з нерівномірним добовим графіком навантаження, великою питомою навантаженням на джерелах живлення.

– Економічні аспекти РГ та управління розподільчою мережею формують окремий блок досліджень. Основною метою дослідники ставлять перед собою забезпечення інвестиційної привабливості у довгостроковій перспективі, мінімізацію термінів окупності проектів у вигляді регулювання цін на енергоносії, а також зниження тарифів на електроенергію.

– Прогнозування навантаження за наявності в мережі об'єктів РГ на поновлюваних джерел сильно ускладнюється в порівнянні з традиційними задачами прогнозування графіків електроспоживання забезпечення необхідних показників надійності та економічності. Електропостачання використовуються складні математичні алгоритми пропонується використання низки нових технологій, що дозволяють здійснювати прогнозування навантаження як реального часу.

– Чисті та відновлювані джерела енергії представляють великий інтерес для досліджень з огляду на новизну технологій «чистої» генерації багато хто проблеми, пов'язані із застосуванням, проектуванням та експлуатацією нових енергоустановок, що вимагають наукового узагальнення підвищенню надійності електропостачання, питанням регулювання частоти та напруги в мережах з великою кількістю відновлюваних джерел енергії, а також оптимізації їх структури та режимів роботи.

– Паралельна робота РГ з електричною мережею значно ускладнює розрахунок статичної та динамічної стійкості системах з РГ вивчено мало і вимагають наукового опрацювання.

– Релейний захист розподільчих мереж ускладнюється, оскільки мережі за наявності генеруючих джерел мають складнішу конфігурацію, а усі зв'язки мають двостороннє живлення. Сучасні пристрої цифрової РЗА мають

адаптивність, таким чином основне завдання дослідників на сьогоднішній день є розробка нових алгоритмів адаптивних захистів розподільних електричних мереж, а також алгоритмів та програмного забезпечення для пристроїв автоматики та реєстрації подій.

– Цифрові системи управління у розподільній мережі формують окремий блок досліджень. Електрична мережа з великою кількістю змішаної генерації потребує наявності складних автоматизованих систем управління, що призводить до подальшого розвитку систем виміру, телемеханіки та зв'язку.

– Розробки новітніх цифрових технологій дозволяють створювати для енергооб'єктів низької напруги цифрові системи управління з штучним інтелектом. Автоматизація процесів вироблення та споживання енергії призвела до формування понять «розумна мережа» та «розумний дім», оснащених системою інтерактивного моніторингу вищенаведених процесів, а також автоматичною системою прийняття рішень для підвищення надійності електропостачання в аварійних ситуаціях.

– Завдання проектування та управління міськими електромережами особливо важливі. Цей напрямок є найбільш складним, оскільки комплексна наукова проблематика включає всі аспекти проектування, будівництва та експлуатації міських мереж з великим кількістю РР. Через емерджентність великих систем виникають додаткові проблеми, потребують наукового осмислення. Для міських мереж у такому разі стають актуальними проблеми відновлення живлення після повної втрати електропостачання, розробка систем запобігання лавин частоти та напруги. Великий науковий інтерес світової енергетики до РГ насамперед обумовлений суттєвими технічними та економічними перевагами пристроїв цього типу перед об'єктами "великої" енергетики.

Серед плюсів РГ можна виділити такі: можливість використання у віддалених населених пунктах, зниження навантаження приєднань, що відходять, зниження втрат, можливість швидкого розширення, зниження

тарифів на електроенергію, екологічну стійкість, участь у регулюванні напруги, підвищення надійності та енергобезпеки.

Пристрої РГ, маючи можливість швидкого розширення, можуть бути побудовані в короткі терміни з метою забезпечення рівноваги попиту та пропозиції. Централізована генерація електроенергії проектується для забезпечення прогнозного значення навантаження, у зв'язку з цим з'являється необхідність великомасштабного розширення. Таким чином, можливість швидкого розширення РГ дозволяє знизити капітальні вкладення та експлуатаційні витрати. Економія також може бути досягнута за рахунок відстрочення модернізації або повної відмови від неї в мережній інфраструктурі (за рахунок зниження перетоків по «головних» лініях від централізованих джерел). Для покупця електричної енергії економія досягається за рахунок додаткового асортименту та гнучкості. РГ сповна задовольняє і цю позицію покупця.

Пристрої РГ також мають свої переваги з екологічної точки зору, оскільки їх використання за наявності відповідної технології значно скорочує шкідливі викиди у повітря. Однак екологічно чисті технології не завжди можуть бути реалізовані через високу вартість, доки держава не забезпечить їхньої привабливості для інвесторів.

Як правило, передача електроенергії на великі відстані при відсутності регулювання призводить до значних падінь напруги.

Системи РГ можуть брати участь у регулюванні напруги шляхом вироблення як активної, так і реактивної потужності поблизу місць споживання електроенергії, скорочуючи втрати при передачі.

РГ має такі впливи на напругу в мережі: пом'якшення посадок напруги, а також покращення якості напруги у споживачів. Спад напруги – це миттєве зниження напруги на короткий проміжок часу (від півперіоду до 1 хвилини). Найчастіше спади напруги виникають через раптове накидання навантаження (наприклад, пуск двигунів) і можуть призвести до порушення правильної роботи чутливого електричне обладнання.

РГ надає позитивний вплив на надійність електропостачання та безпека розподільчої мережі загалом (де трапляється близько 90 % аварійних ситуацій). У деяких галузях недовідпустка електроенергії оцінюється десятками та сотнями тисяч доларів на годину (наприклад, провайдери стільникового зв'язку, фондова біржа). Здатність пристроїв РГ підтримувати електропостачання при аварійних відключеннях дозволяє уникнути значних витрат, пов'язаних із недовідпусткою електроенергії.

Незважаючи на всі переваги пристроїв РГ, їх використання може негативно вплинути на розподільчу систему. Оскільки пристрої РГ можуть замаскувати зростання навантаження (що може перешкоджати коректному плануванню навантаження в мережі), порушення роботи генераторної установки може призвести до повної втрати електропостачання. Більше того, коли споживач виставляє жорсткіші вимоги до надійності електропостачання, виникає необхідність мати резервний запас генеруючої потужності, що призводить до зниження ККД установки, ускладнення системи управління та, як наслідок, до подорожчання системи. Проблема надійності більш ефективно вирішується шляхом ухилення від автономного режиму роботи до режиму роботи паралельно з енергосистемою, що, у свою чергу, вимагає виконання відповідних технічних вимог та призводить до подорожчання проекту. Також існують інші складні технічні проблеми, пов'язані з розробкою пристроїв релейного захисту, регулюванням напруги в мережі, зниженням гармонійних складових, коливань напруги у мережі, і навіть використанням систем телекомунікацій.

Висновки до другого розділу

1. Розподілена генерація – це інвестиційно-привабливе та ефективне вирішення проблеми забезпечення електроенергетичних потреб споживачів в умовах все зростаючого рівня технологій і все зростаючої вартості електроенергії.

2. Вирішення питання про впровадження РГ потребує серйозних наукових розробок в галузі комплексного вирішення порушених у статті наукових проблем та розроблення узагальненого поняття РГ.

3. Застосування засобів розподіленої генерації значною мірою збільшує надійність та стійкість роботи систем енергопостачання.

4. Розподілена генерація та децентралізовані електричні мережі унеможливають масштабні аварії які виникають в наслідок воєнного впливу.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ТА КОНФІГУРАЦІЇ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИМ ПРИНЦИПОМ

3.1 Актуальність питання зміни конфігурації та топології електричних мереж України

Наявна структура електричних мереж України є багаторівневою, ієрархічною та розгалуженою. Вона побудована на засадах централізації, концентрації та укрупнення виробничих потужностей [8]. Потужності основних агрегатів електростанцій та підстанцій в Україні, а також пропускна здатність ліній електропередачі сягають від десятків до сотень мегаватів, тоді як найбільші генератори на атомних електростанціях мають встановлену потужність до 1000 МВт. Це свідчить про те, що українська електроенергетична система є централізованою та нерівномірною з концентрацією вузлів генерації та передачі електроенергії (рис. 3.1).

Однак, така структура виявилася вразливою до зовнішніх воєнних впливів. Під час повномасштабного вторгнення агресора в Україну сталося кілька національних масштабних збоїв у роботі об'єднаної енергосистеми України. Атаки на критично важливі об'єкти енергетики є реальною загрозою, що може призвести до катастрофічних наслідків та паралічу всіх сфер виробництва та цивільного життя.

З огляду на це, виникає потреба у розробці нових принципів побудови електричних мереж, що дозволять підвищити стійкість їх роботи та рівень енергетичної безпеки. Необхідно розробити принципи, які забезпечать стабільність функціонування розгалужених електромереж навіть у воєнних умовах.

Отже, метою даної роботи є розробка загальних підходів до проектування конфігурації електричних мереж та розробка ідеалізованої

моделі електричних мереж підвищеної стійкості до впливів воєнного характеру.



Рисунок 3.1 Структура та топологія електричних мереж об'єднаної енергосистеми України

3.2 Загальний підхід. Визначення припущень та обмежень моделі

У сучасних умовах роботи електричних мереж України враховуємо можливість їх пошкодження внаслідок ракетних обстрілів, атак безпілотників і диверсій, що проводяться агресором. При цьому вважаємо, що такі атаки обмежені за кількістю через наявні можливості ворога та ефективність роботи українських сил оборони. Одним із ефективних засобів протидії намаганням знищити українську енергетику є використання принципів розосередження та децентралізації в системах електропостачання. Це призведе до збільшення кількості цілей для ворога, що зробить його спроби знеструмити великі регіони країни марними.

Крім того, розвиток систем розподіленої генерації стимулюється загальними тенденціями розвитку технологій і суспільства, такими як:

- індивідуалізація виробництва, сфери послуг і соціальних структур;
- розвиток альтернативних автономних джерел енергії;
- розвиток систем управління та автоматизації процесу електропостачання;
- продовження тренду на енергоефективне споживання енергетичних ресурсів [9].

За принципами розподіленої генерації вироблена електроенергія споживається максимально близько до місця її генерації. Районні розподільчі мережі перенаправляють надлишкову енергію з однієї частини системи до іншої. Таким чином, мережі високої напруги розвантажуються та не є основним джерелом живлення, оскільки через них циркулює лише енергія небалансу між окремими частинами об'єднаної енергетичної системи [10].

В системах з розподіленою генерацією електроенергія виробляється численними малопотужними джерелами, розміщеними по всій країні (регіону). Основним елементом системи генерації є не точка на карті, а площа певної ділянки з власним енергетичним потенціалом. Цей потенціал може бути достатнім, недостатнім або надлишковим. Базова ділянка може виконувати роль нейтральної транзитної ланки мережі, споживача або джерела енергії. Її роль може змінюватися в часі залежно від режиму генерації-споживання електроенергії.

В системах з розподіленою генерацією основною функцією електричних мереж є надійний зв'язок усіх елементів мережі, а не передача великих обсягів енергії. На перший план виходять вимоги до оперативної гнучкості та резервування ліній електропередачі (зв'язку).

Отже, основні умови для подальшого моделювання структури та конфігурації розподільчих електричних мереж з розподіленою генерацією-споживанням електроенергії такі:

Джерела генерації електроенергії та її споживачі району мають розподілений по площі характер.

Встановлена потужність джерел енергії кожної ділянки має задовольняти або перевищувати потреби споживачів цієї ділянки за сприятливих умов генерації.

Режим генерації джерел енергії кожної ділянки передбачає певну нестачу енергії за несприятливих умов генерації.

Режим роботи електрообладнання кожної ділянки може бути порушений через воєнне втручання або інші аварійні ситуації.

В районі відсутні високопотужні (концентровані) споживачі електроенергії та її джерела.

3.3 Моделювання структури та конфігурації електричних мереж системи розподіленої генерації

У цій роботі розглядається фрактально-кластерний принцип побудови електричних мереж у системах з розподіленою генерацією. Такі фрактально-кластерні структури притаманні багатьом природним і технологічним складним системам і процесам [11-14].

Завдання, що ставляться перед запропонованою фрактально-кластерною структурою електричної мережі, включають:

- забезпечення високої надійності та стійкості мережі до зовнішніх впливів воєнного та терористичного характеру;
- уніфікацію технологічних рішень та елементів мережі;
- високу оперативну гнучкість і просту логіку оперативних перемикачів в нормальних та аварійних режимах роботи.

У роботі представлено одну з можливих структур фрактально-кластерних мереж, як показано на рисунку 3.2.

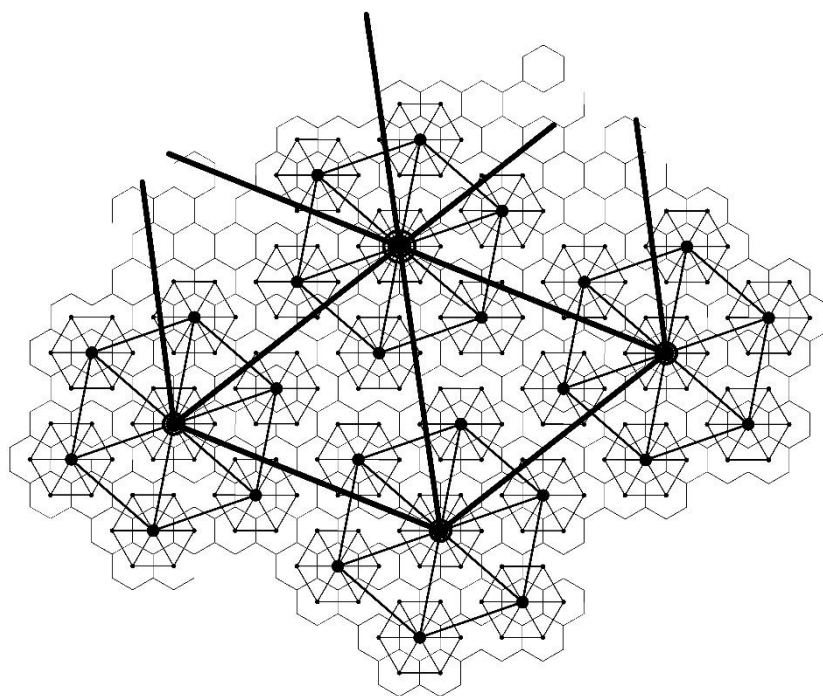


Рисунок 3.2 Фрагмент розгалуженої фрактально-кластерної структури електричних мереж з розподіленою генерацією

Запропоновано вибрати шестикутник як базову ділянку площі. Це зумовлено відомою властивістю сотоподібних структур, які мають оптимальне співвідношення між площею фігури та довжиною її периметра. Така властивість дозволить значно оптимізувати витрати провідникового матеріалу для створення зазначеної мережі.

Фрактальні властивості сотоподібних структур розглянуті у першому розділі даної роботи та є характерними для структури графену.

Вузли сітки електричної розподільчої мережі яка основана на базовому шестикутному елементі мають три промені ліній електропередачі, що одразу збільшує у півтори рази надійність роботи підстанції на відміну від класичних схем тупикових та транзитних підстанцій, які мають по два вводи на стороні високої напруги.

Збільшення кількості комірок розподільчих пристроїв високої напруги вузлових підстанцій не суттєво впливає на капітальні витрати по спорудженні нової мережі запропонованої конфігурації, адже компенсується

оптимізацією конфігурації самої мережі та відповідними новими схемними рішеннями уніфікованих підстанцій.

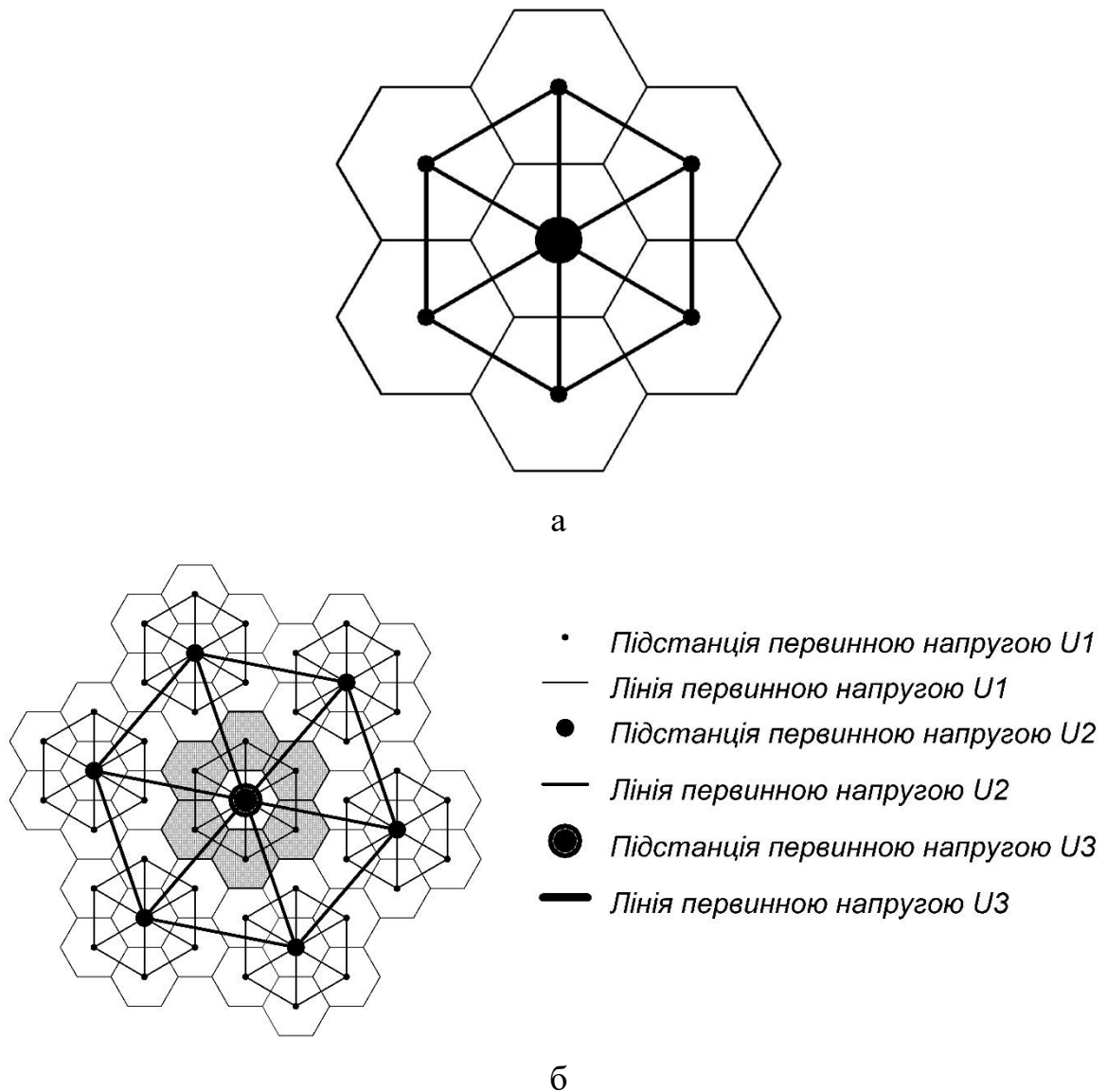


Рис. 3.3 Фрактально - кластерна структура електричних мереж з розподіленою генерацією

а – базовий кластер структури мережі, б – принцип формування багаторівневої фрактально-кластерної структури

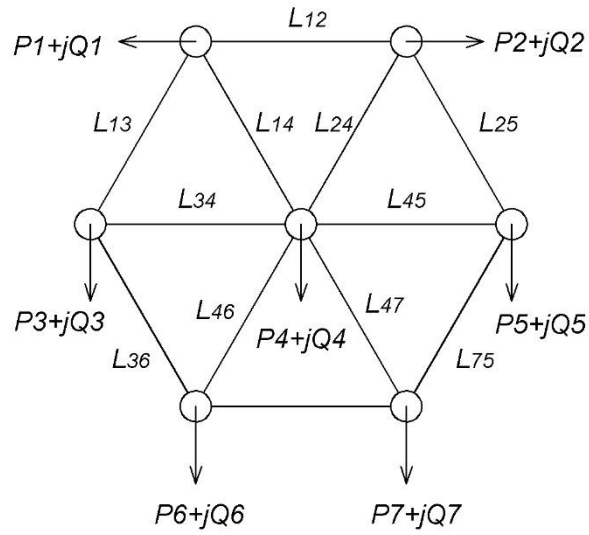
За базовий кластер фрактально-кластерної структури (рис. 3.3 а) в нашому випадку приймаємо структуру, яка складається з сьомих ділянок площі району шестикутної форми які мають точку зв'язку (видачі-прийому електричної енергії) яка розташована в центрі фігури та в реальній ситуації виконує функції розподільчого пристрою. Розподільчі пристрої шістьох

дільниць, які межують з границею кластера з'єднані один з одним за кільцевою схемою та радіально приєднані до розподільчого пристрою центральної (сьомої) дільниці. В центрі сьомої дільниці також розташована підстанція яка забезпечує зв'язок між електричною мережею базового кластеру напругою $U1$ та мережами більш високої напруги $U2$ які утворюють фрактал наступної ітерації і так далі (рис. 3.3 б).

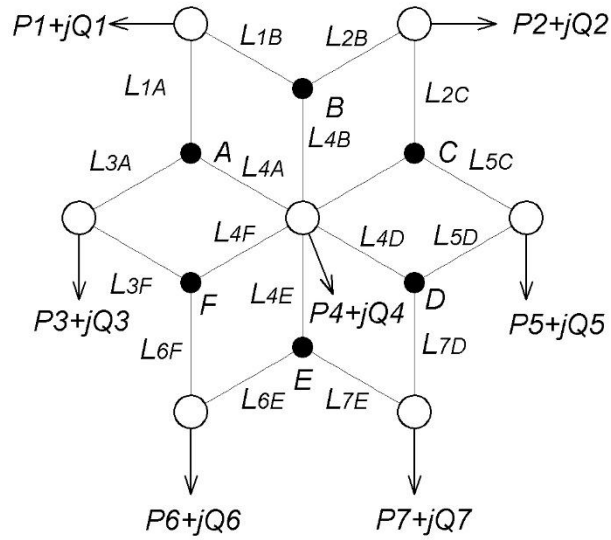
3.4 Визначення електричної потужності базового кластеру мережі.

Схема заміщення електричної мережі базового кластеру представлена на рис. 3.4 а. Вона має сім вузлів які характеризуються величиною електричної потужності вираженої в комплексному вигляді $P+jQ$ яка змінюється в часі і може мати як позитивне (генерація) так і негативне (споживання) значення. Враховуючи, що за умовами моделювання усі проводи мережі кластеру виконані проводом однієї марки та перетину в подальшому параметри опору замінюємо параметрами довжин ділянок ліній електропередачі. Визначимо в загальному вигляді потекорозподіл мережею кластеру та загальну його потужність в точці приєднання до кластеру наступної ітерації. Для цього проведемо послідовне перетворення схеми заміщення мережі базового кластеру. На першому етапі перетворимо «трикутники» між вузлами потужностей у еквівалентні «зірки» на прикладі трикутника 1-3-4 за відомими формулами (1) його сторони L_{13} , L_{14} , L_{34} (рис. 3.4 а) перетворюються на промені «зірки» L_{1A} , L_{3A} , L_{4A} (рис. 3.4 б)

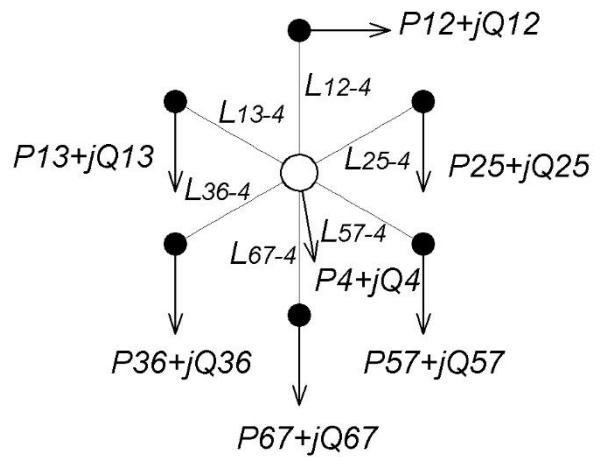
$$\begin{aligned}
 L_{1A} &= \frac{L_{13} \cdot L_{14}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}}; \\
 L_{3A} &= \frac{L_{13} \cdot L_{34}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}}; \\
 L_{4A} &= \frac{L_{14} \cdot L_{34}}{L_{13} + L_{14} + L_{34}};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



a



б



в

Рисунок 3.4 Розрахункове перетворення базового кластеру мережі

Враховуючи, що всі лінії базового кластеру мають однакову довжину, можна прийняти її за базове значення і виконати розрахунки у загальному вигляді у відносних одиницях. У цьому випадку отримаємо, що всі еквівалентні опори ліній другого етапу перетворення також однакові та мають втричі менше еквівалентне значення опору. Таким чином, замість дванадцяти секцій еквівалентна схема матиме вісімнадцять секцій.

Наступним кроком перетворення є розподіл потужностей вузлів 1-7 по суміжних утворених віртуальних вузлах А, В, С, D, Е, F (центрах "зірок"). Розподіл здійснюється методом зворотних плечей. Оскільки еквівалентна довжина всіх ліній другого етапу перетворення базового кластеру однакова, потужності вузлів діляться навпіл і розподіляються між сусідніми вузлами.

$$\begin{aligned}
 S_{13} &= \frac{1}{2}(P_1 + P_3) + j\frac{1}{2}(Q_1 + Q_3); \\
 S_{12} &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + j\frac{1}{2}(Q_1 + Q_2); \\
 S_{25} &= \frac{1}{2}(P_2 + P_5) + j\frac{1}{2}(Q_2 + Q_5); \\
 S_{57} &= \frac{1}{2}(P_5 + P_7) + j\frac{1}{2}(Q_5 + Q_7); \\
 S_{67} &= \frac{1}{2}(P_6 + P_7) + j\frac{1}{2}(Q_6 + Q_7); \\
 S_{36} &= \frac{1}{2}(P_3 + P_6) + j\frac{1}{2}(Q_3 + Q_6);
 \end{aligned} \tag{2}$$

В результаті перетворень отримуємо шестикінечну еквівалентну зірку (рис. 3.4 в) сумарний баланс потужності якої знаходимо за першим законом Кірхгофа, тобто за рахунок алгебраїчного додавання усіх еквівалентних потужностей у вузлі 4 (3).

$$S_{\Sigma} = \sum_{n=7}^1 P + j \sum_{n=7}^1 Q \tag{3}$$

Враховуючи, що у виразах 2 усі активні та реактивні складові потужностей вузлів 1-6, що поділені навпіл зустрічаються по два рази, то можна сказати, що загальний баланс потужності базового кластеру мережі дорівнює алгебраїчній сумі потужностей усіх вузлів. Такий простий алгоритм розрахунку обумовлений симетричною конфігурацією мережі базового кластеру та зберігається на усіх рівнях ітерації фракталу.

3.5 Визначення фрактальних властивостей ідеалізованої моделі розподільчої мережі

Запропонована конфігурація ідеалізованої моделі розподільчої мережі має структуру регулярного фракталу, схожого на "серветку" Серпинського або "сніжинку" Коха. Давайте визначимо основні геометричні співвідношення для цього фракталу.

Спочатку визначимо базовий коефіцієнт збільшення довжини ліній електропередачі при переході від фракталу меншої ітерації до фракталу більшої ітерації (рис. 3.5).

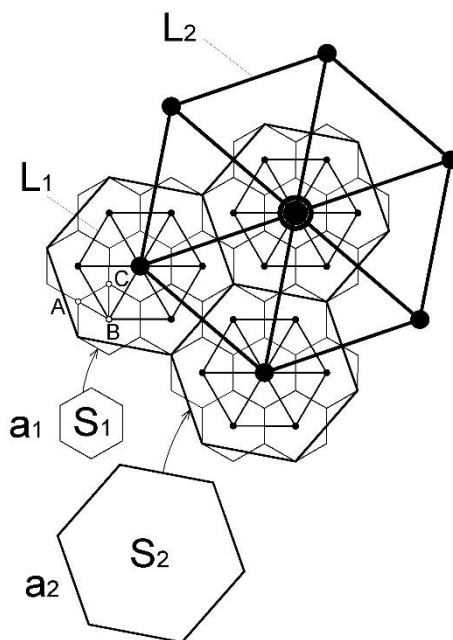


Рис. 3.5 Визначення геометричних співвідношень фрактальної структури мережі

При цьому уніфікована довжина лінії електропередачі фракталу першої ітерації L_1 дорівнює двом висотам трикутника ABC (як елемента базового шестикутника зі стороною a_1) та дорівнює

$$L_1 = 2 \frac{a_1 \sqrt{3}}{2} = a_1 \cdot \sqrt{3}. \quad (5)$$

При переході до фракталу другої ітерації елементарною основою площі стає шестикутник зі стороною a_2 та площею S_2 яка дорівнює

$$S_2 = 7S_1 \quad (6)$$

так як елементарна основа площі фракталу другої ітерації охоплює сім елементарних основ площі попереднього фракталу першої ітерації (рис. 3.5). Знаючи площу S_2 аналогічно формулі (4) можна вивести значення для сторони a_2 виражене через a_1 та S_1 як

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}} 7S_1} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}} 7 \frac{3a_1^2 \sqrt{3}}{2}} = \sqrt{7} \cdot a_1 \quad (7)$$

при цьому аналогічно формулі (5)

$$L_2 = 2 \frac{a_2 \sqrt{3}}{2} = a_2 \cdot \sqrt{3}, \quad (8)$$

а вважаючи, що $a_2 = \sqrt{7} \cdot a_1$ визначаємо подібне співвідношення між L_1 та L_2 як $L_2 = \sqrt{7} \cdot L_1$.

Таким чином показник $\sqrt{7}$ є природнім масштабом фрактальної структури електричної мережі, яка розглядається. Він відображає основні

характерні властивості фракталів такі як самоподібність та масштабна інваріантність. Кожна наступна ітерація даного фракталу збільшує довжину уніфікованих ліній електропередачі у $\sqrt{7}$ разів.

Визначимо загальну протяжність ліній електропередачі для кожної ітерації фракталу. Очевидно, що сумарна протяжність ліній електропередачі базового кластеру першої ітерації напругою U_1 дорівнює $12L_1$ або $12\sqrt{3} a_1$. Ця протяжність ліній формує розподільчу мережу первинної низької напруги U_1 на площі району базового кластеру. На другій ступені ітерації площа кластеру збільшується у 7 разів, і відповідно загальна протяжність низьковольтних ліній електропередачі напругою U_1 сімох базових кластерів, які утворюють загальну площу району кластеру другої ітерації зростає у 7 разів. При цьому з'являється мережа напругою U_2 яка формує мережу кластеру другої ітерації подібну до мережі базового кластеру. Її протяжність визначається як $12L_2$ або $12\sqrt{3} a_2$ або $12\sqrt{3} \sqrt{7} a_1$ або $12\sqrt{21} a_1$.

Сумарна протяжність розподільчих мереж напругою U_1 та U_2 разом кластеру другої ітерації фракталу, що розглядається буде дорівнювати

$$7 \times 12\sqrt{3} a_1 + 12\sqrt{21} a_1, \quad (9)$$

а для фракталу третьої ітерації

$$7 \times (7 \times 12\sqrt{3} a_1 + 12\sqrt{21} a_1) + 12\sqrt{147} a_1 \quad (10)$$

і так далі.

Тобто якщо сумарну протяжність ліній електропередачі фракталу кожної ітерації визначити як $\sum L_i$, то в узагальненому вигляді формула розрахунку загальної протяжності електричних мереж які побудовані за фрактально-кластерним принципом та вказаною структурою буде мати вигляд

$$\sum L_{i=n} = 7 \sum L_{i=n-1} + 12L_n \quad (11)$$

Питому протяжність ліній електропередачі мережі відносно площі району визначаємо як

$$L_{num} = \frac{\sum L_{i=n}}{S_n} \quad (12)$$

де S_n – площа району мережі ітерації фракталу n , км².

Отже можемо зробити висновок про те, що:

1. Базовим елементом для подальшої побудови конфігурації даної ідеалізованої моделі є правильний шестикутник шестикутника площі електрифікованого району зі стороною a_1 . Він використовується як основа форми кластерів усіх ітерацій. Через його лінійний розмір можна обрахувати усі інші лінійні розміри даної фрактальної структури.

2. Природнім просторовим масштабом фракталу, що розглядається по збільшенню лінійних розмірів є величина $\sqrt{7}$, а по збільшенню площі є масштаб 7.

3. При збільшенні кількості ітерацій фракталу складність простору збільшується нелінійно, що відбивається на зміні фрактальної розмірності даної структури

Очевидно, що з кожною наступною ітерацією фракталу мережі її просторова складність буде зростати за рахунок додавання елементів ліній електропередачі все більшої і більшої напруги, а відповідно буде зростати і питома протяжність ліній електропередачі. Проте ступінь зростання питомої протяжності ліній електропередачі з кожною наступною ітерацією буде зменшуватися та наближатися до значення 1,83 км/км². Це чітко видно по результатах розрахунків (табл. 3.1). Тобто на 1км² площі електрифікованого району необхідно не більше 1,85 км проводів усіх перетинів та номінальних напруг.

3.6 Визначення номенклатури номінальних напруг електричних розподільчих мереж за рівнем ітерації

Запропонована модель електричної мережі має кілька ітерацій. При цьому кожна ітерація фракталу повинна мати свою номінальну напругу. Номінальна напруга електричних мереж залежить від потужності яка передається лінією електропередачі та відстані на яку треба передати вказану потужність. Є кілька методик визначення можливих номінальних напруг електричних мереж. У даній роботі скористаємось емпіричною розрахунковою формулою Ілларіонова згідно якої оптимальна напруга дорівнює

$$U_{opt} = \frac{1000}{\sqrt{500/L + 2500/P}}, \quad (13)$$

де L - довжина уніфікованої лінії, км;

P - передана активна потужність, МВт.

Використання саме цього (розрахункового) методу визначення номінальної напруги для ітерацій фракталу мережі обумовлено ідеалізацією моделі та розрахунково-теоретичним характером дослідження.

Лінійні розміри ділянок мережі L обраховуються так як наведено вище, а передана активна потужність обраховується за питомим показником P_{num} (МВт/км²). У даній роботі візьмемо цей показник як середнє значення потужності генерованої українськими електростанціями усіх типів у 2013 році (194377 млн.кВт год) приведену до площі країни (603628 км²) та із значенням кількості годин використання максимуму встановленої потужності 84560 годин (тобто віртуальне 100% завантаження одиниці площі). Таким чином

$$P_{num} = \frac{194377}{8760 \cdot 603628} = 0,0368 \text{ МВт} / \text{км}^2 \quad (14)$$

Такі дані відображатимуть природній режим роботи економіки та відповідно енергетики України напередодні воєнної агресії з боку країни агресора. Таким чином в роботі моделюється режим максимального завантаження розподільчих електричних мереж, які працюють у режимі передавання повної потужності споживачів/генераторів від/до кластеру потужності, хоча насправді в мережах з розподіленою генерацією згенерована електрична енергія споживається переважно у місці її генерації, а у розподільчу мережу потрапляють переважно перетоки небалансу. Виходячи з цього визначені значення будуть моделювати самий напружений режим роботи електричної мережі, що моделюється.

3.7 Розрахунок показників ідеалізованої моделі

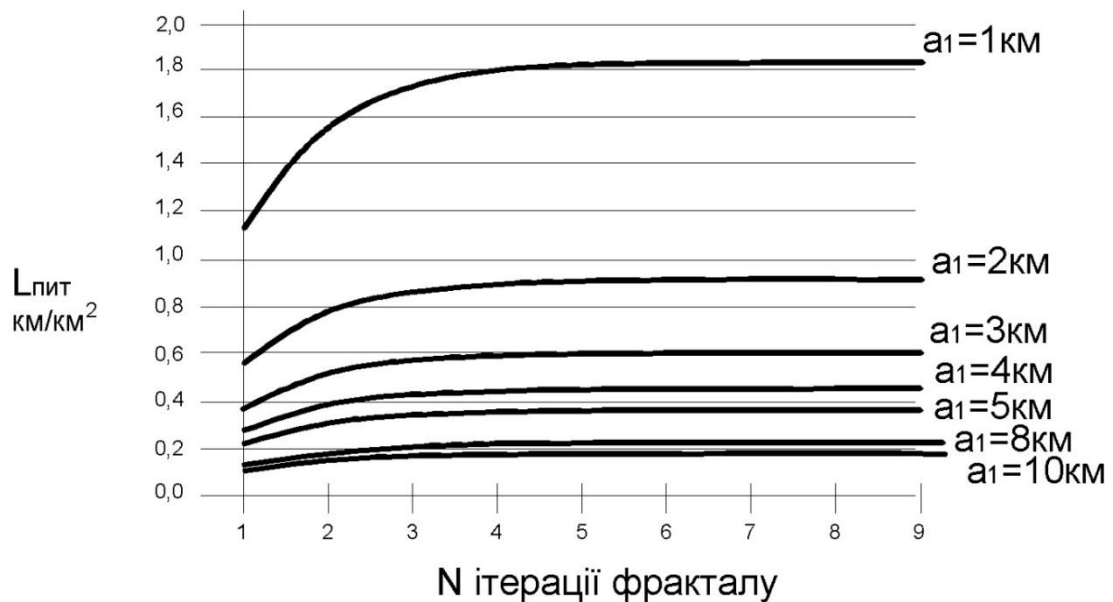
Розрахунок проводимо за допомогою програмного середовища таблиць Excel. Результати розрахунків наведено у таблиці 1 та на рисунку 3.6.

Таблиця 3.1. Результати розрахунку показників ідеалізованої моделі

| N ітерації фракталу | Рпит МВт/км2 | a км | Sел км2 | Sкл км2 | L1 км | P МВт | Uопт кВ | Сума L км | Lпит км/км2 |
|------------------------|-----------------|---------|-------------|--------------|----------|-----------|------------|--------------|----------------|
| 1 | 0,0368 | 1,00 | 2,60 | 18,17 | 1,73 | 0,10 | 6,15 | 20,76 | 1,1429 |
| 2 | 0,0368 | 2,65 | 18,17 | 127,18 | 4,58 | 0,67 | 16,12 | 200,25 | 1,5746 |
| 3 | 0,0368 | 7,00 | 127,20 | 890,42 | 12,11 | 4,68 | 41,69 | 1547,10 | 1,7375 |
| 4 | 0,0368 | 18,53 | 890,59 | 6234,11 | 32,05 | 32,77 | 104,32 | 11214,32 | 1,7989 |
| 5 | 0,0368 | 49,02 | 6235,28 | 43646,97 | 84,80 | 229,46 | 244,04 | 79517,84 | 1,8218 |
| 6 | 0,0368 | 129,70 | 43655,18 | 305586,24 | 224,39 | 1606,51 | 514,04 | 559317,53 | 1,8303 |
| 7 | 0,0368 | 343,19 | 305643,69 | 2139505,86 | 593,72 | 11247,69 | 969,27 | 3922347,44 | 1,8333 |
| 8 | 0,0368 | 908,09 | 2139908,09 | 14979356,61 | 1571,00 | 78748,62 | 1690,27 | 27475283,99 | 1,8342 |
| 9 | 0,0368 | 2402,81 | 14982172,73 | 104875209,12 | 4156,85 | 551343,96 | 2830,49 | 192376870,21 | 1,8343 |

У таблиці 3.1 наведено результати розрахунку показників ідеалізованої моделі електричної мережі фрактально-кластерного типу для дев'яти ітерацій фракталу базового кластеру із стороною a_1 елементарного шестикутника, яка дорівнює 1 км. На шостій ступені ітерації площа кластеру $S_{кл}$ стає співвідносною з територією України, а на сьомій ступені вже перевищує її. Тому для практичних розрахунків ці позиції є граничними по своїй

доцільності, проте обрахунок восьмої та дев'ятої ступені ітерації дає розуміння загальної динаміки зміни питомої довжини ліній електропередачі $L_{пит}$, яка після сьомої ітерації майже не змінюється, що свідчить про нелінійний характер зміни складності простору, що є характерним для фрактальних структур. Цю залежність наведено на рисунку 3.6. Залежності побудовані для фракталів з різними первинними геометричними розмірами елементарного базового шестикутника зі стороною від 1 до 10 км. На великих первинних лінійних розмірах елементарного шестикутника питома довжина ліній електропередачі майже залишається незмінною в залежності від масштабу фракталу і номеру його ітерації.



Рисуну 3.6 Визначення питомої протяжності ліній електропередавання фрактально-кластерної мережі як функції від базового лінійного розміру дільниці площі району

Що до оптимальних напруг характерних ітерацій фракталу, то вони, згідно розрахунків, мають сім рекомендованих ступенів від 6 кВ до 970 кВ, що є технічно можливим для реалізації. В таблиці 3.2 наведені розрахункові дані відповідних обчислень для фрактально-кластерної структури електричної мережі з різними первинними геометричними розмірами

елементарного базового шестикутника зі стороною від 1 до 10 км. З таблиці видно, що зі збільшенням лінійних розмірів базового шестикутника кількість ітерацій фракталу мережі буде зменшуватися з причини недоцільності технічної реалізації з таких причин як надвисокі напруги (понад 1000кВ) та недостатня щільність та розгалуженість мережі. Найближче наближеним варіантом лінійки номінальних напруг запропонованої моделі мережі до існуючої лінійки номінальних напруг високоіюльтних мереж України є варіанти з лінійними розмірами сторони базового шестикутника 1, 2 та 3 км.

Таблиця 3.2. Оптимальні напруги мереж різних ітерацій

| N ітерації фракталу | a1, км | | | | | | |
|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 8 | 10 |
| | U опт, кВ | | | | | | |
| 1 | 6,15 | 12,23 | 18,24 | 24,19 | 30,08 | 47,40 | 58,65 |
| 2 | 16,12 | 31,79 | 47,04 | 61,90 | 76,38 | 117,79 | 143,87 |
| 3 | 41,69 | 80,54 | 116,96 | 151,27 | 183,75 | 272,12 | 324,98 |
| 4 | 104,32 | 192,91 | 270,41 | 339,66 | 402,54 | 564,15 | 656,12 |
| 5 | 244,04 | 419,89 | 561,13 | 681,21 | 786,88 | 1049,87 | 1196,46 |
| 6 | 514,04 | 815,63 | 1045,03 | 1236,23 | 1403,16 | 1817,12 | 2048,11 |
| 7 | 969,27 | 1448,46 | 1809,50 | 2110,87 | 2374,77 | 3032,52 | 3401,35 |
| 8 | 1690,27 | 2446,52 | 3020,37 | 3501,74 | 3924,62 | 4982,61 | 5577,60 |
| 9 | 2830,49 | 4039,78 | 4963,02 | 5739,72 | 6423,20 | 8136,20 | 9100,82 |

3.8 Розробка схемних рішень електричної мережі, яка моделюється

Оперативна гнучкість та надійність електричної мережі в першу чергу залежать від схематичних рішень, що використовуються. У запропонованій вище конфігурації мережі можна застосувати уніфіковану схему підстанцій з трьома приєднаннями ліній електропередачі та двома приєднаннями силових трансформаторів (рис. 3.7). Ця схема дозволяє реалізувати кільцеве транзитне підключення підстанцій кола і їх приєднання до центральної підстанції кластеру. У даній схемі використовуються чотири високовольтних вимикача на п'ять приєднань, що є досить економічним варіантом. У

порівнянні з типовою схемою транзитної підстанції за схемою містка, для одного додаткового приєднання додається лише один вимикач. Ця схема характерна для розподільчих пристроїв 330 – 750 кВ, які збираються за схемою "3/2" або "4/3". Як і зазначені схеми, запропонована схема має простий і зрозумілий алгоритм оперативних перемикачів. Кожне приєднання захищене одразу двома вимикачами, що забезпечує високу селективність захисту і локалізує будь-яку аварію лише на тій ділянці, де вона сталася. Крім того, ремонт будь-якої частини схеми підстанції здійснюється за однаковим алгоритмом перемикачів, що зменшує вірогідність помилкових дій оперативного персоналу і прискорює реакцію на зміну штатних режимів роботи та аварійні ситуації. Також приєднання підстанції за трьома лініями значно підвищує її надійність.

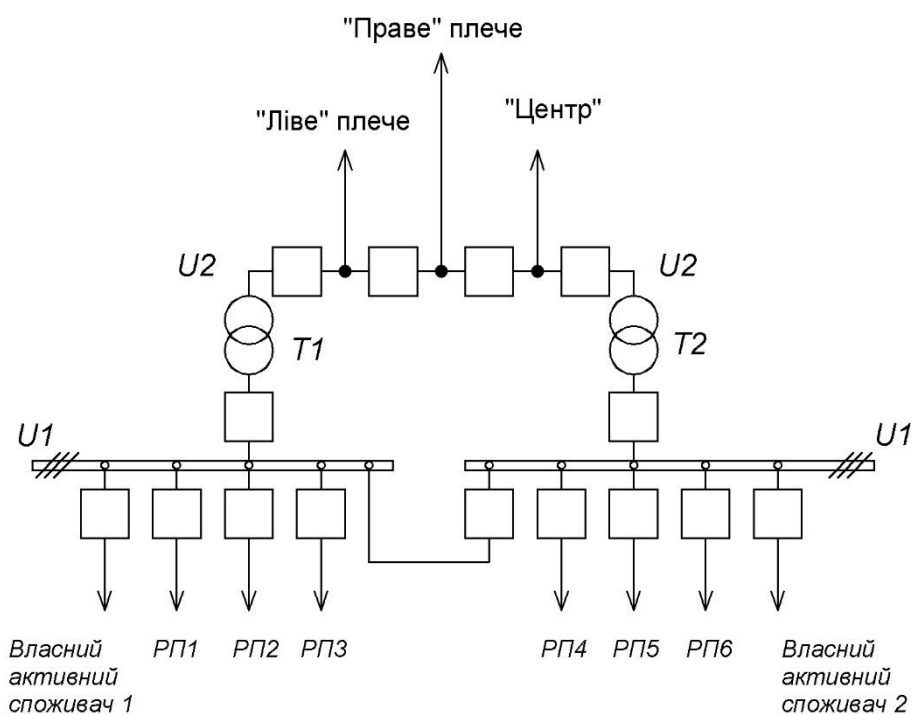


Рисунок 3.7 Схема первинних з'єднань уніфікованої підстанції

На рис. 3.8 наведена електрична принципова схема з'єднань підстанцій базового кластеру мережі, яка моделюється в роботі. Відповідно до неї мережа базового кластеру має шість уніфікованих підстанцій *ПС1 – ПС6* з напругами *U1* та *U2* зібраних по схемі з рис. 3.4 та вузлову підстанцію *ПС7*

яка має три рівні напруги (U_1, U_2, U_3) та забезпечує з'єднання базового кластеру з фракталом наступної ітерації з більш високим рівнем напруги U_3 . При цьому частина вузлової підстанції ПС7 напругою від U_1 до U_2 виконана за схемою «два блоки з ремонтною перемичкою», що спрощує та здешевлює цю частину, а розподільчий пристрій високої напруги U_3 виконаний за уніфікованою схемою з рис. 3.6 яка пропонується в даній роботі. Цей розподільчий пристрій вже є елементом фракталу наступної ітерації та повторює схемні рішення на більш високому рівні напруги. Така самоподібність є характерною для фрактальних структур.

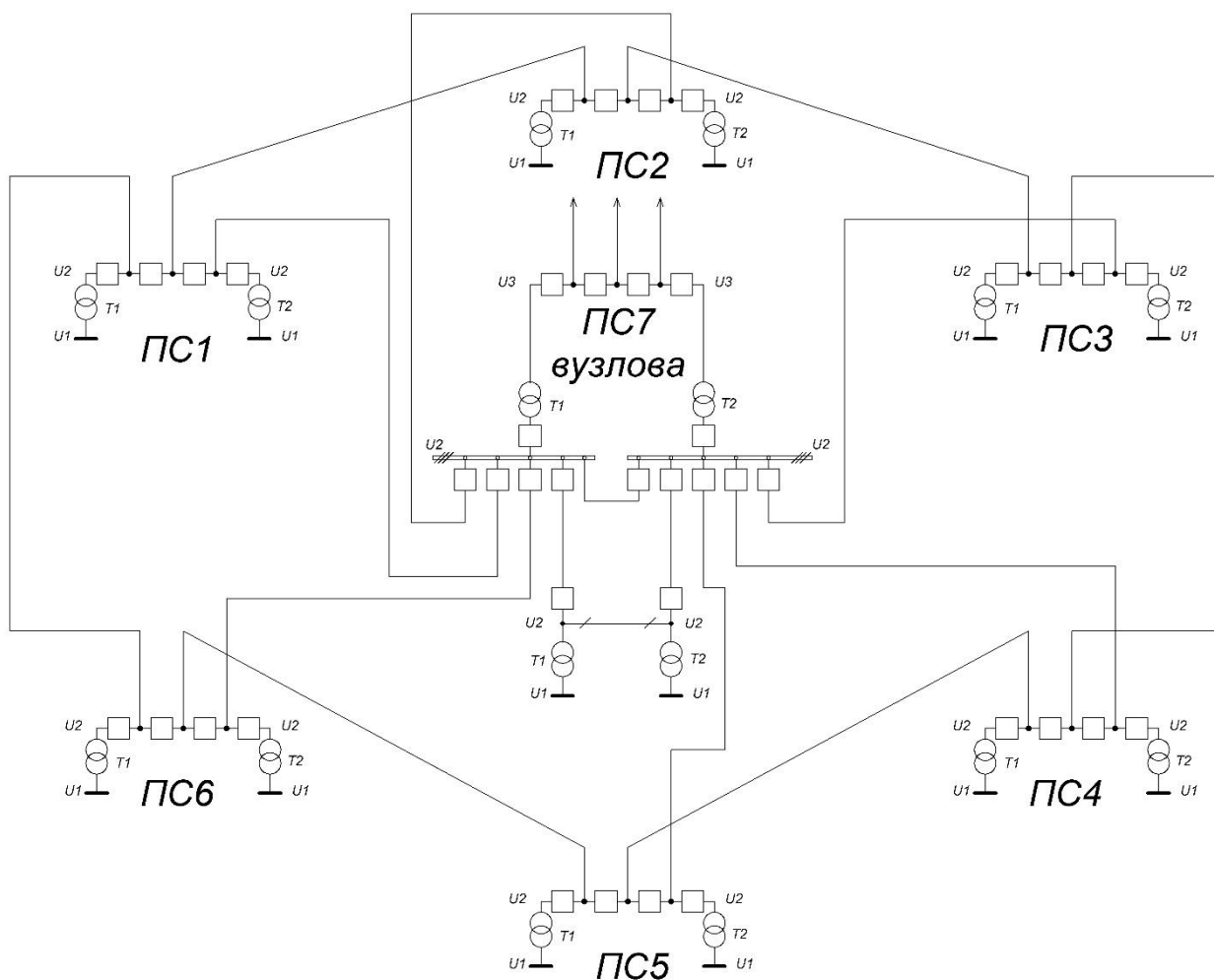


Рисунок 3.8 Схема електрична принципова мережі базового кластеру

Висновки до третього розділу

1. Запропоновано нову конфігурацію електричних розподільчих мереж, яка відповідає принципам розподіленої генерації.
2. Визначено основні структурно-геометричні параметри базового кластеру запропонованої фрактально-кластерної структури електричних мереж.
3. Визначено основні електроенергетичні показники базового кластеру.
4. Запропоновано відповідні схемні рішення вузлових уніфікованих підстанцій нової конфігурації мережі.

ВИСНОВКИ

1. Проведено ґрунтовний критичний аналізу сучасного стану розподільчих електричних мереж України. Визначено їх незадовільну стійкість до впливу негативних факторів іосенного характеру
2. Розроблено концепцію реконструкції топології і конфігурації електричних мереж, яка базується на фрактально-кластерному принципі
3. Запропоновано нову конфігурацію електричних мереж та визначено їх основні параметри та геометричні співвідношення
4. Визначено оптимальні значення номінальних напруг ступенів розподільчих мереж нової конфігурації
5. Розроблено схемні рішення підстанцій та ліній електропередачі для розробленої фрактально-кластерної структури розподільчих електричних мереж
6. Намічено напрямки подальшої наукової роботи. До напрямків подальших досліджень відносяться:
 - Створення нових моделей електричних мереж і покращення наявних ідеалізованих моделей.
 - Аналіз фрактально-кластерних властивостей існуючих електричних мереж і визначення їх характеристик, таких як фрактальна розмірність, просторовий масштаб і самоподібність.
 - Оцінка впливу фрактально-кластерних властивостей електричних мереж на техніко-економічні показники.
 - Визначення кореляції між ідеалізованими моделями та реальними електричними мережами.
 - Розробка алгоритмів для розрахунку параметрів режимів роботи запропонованих моделей в умовах реальної експлуатації.

- Оцінка техніко-економічних показників запропонованих ідеалізованих моделей мереж у реальних умовах експлуатації (надійність, економічність, безпека тощо).
- Аналіз і вдосконалення схематичних рішень моделей мереж з метою визначення їх техніко-економічних показників.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Н. В. Новікова, О. В. Сагай, “Використання фракталів в математичному моделюванні складних природних систем”, Науковий журнал «ЛОГОС. Мистецтво наукової думки», no. 1, pp. 147-148, 2018
2. Б. Мандельброт, “Фрактальна геометрія природи / Бенуа Мандельброт”, Інститут комп’ютерних досліджень, 2002
3. J. A. Bossard, L. Lin, and D. H. Werner, “Evolving random fractal Cantor superlattices for the infrared using a genetic algorithm,” J. R. Soc. Interface, vol. 13, no. 114, p. 20150975, 2016.
4. Anupam Tiwari «Fractal applications in electrical and electronics engineering» International Journal Of Engineering Science & Advanced Technology Volume-2, Issue-3, 406 – 411
5. https://www.m0wwa.co.uk/page/M0WWA_fractal_antenna.html
6. Rajkumar, AnupamTiwari “On Design of CPW fed Apollonian Gasket multiband antenna” International Journal on microwave and Optical Letter. Vol-4, No-3 May 2009.
7. Shicai Lin, Tiesai Li and Xianglong Tang „” Achieving Low-Power Consumption by Using Fractal Coding in PVP” Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation
8. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія / І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. – Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. – 132 с
9. Чернюк А.М., Кирисов І.Г., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Енергетика Том 32 (71) № 3 2021 С. 239 – 246

10. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. В. Сікорська – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 195 с.
11. Budanov P.; Khomiak E.; Kyrysov I.; Brovko K.; Kalnouy S.; Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, № 8 (118), p. 60-70
12. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Vasyuchenko P., Homenko V. Improving The Reliability Of Information-Control systems At Power Generation Facilities Based on The Fractal-Cluster Theory. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2/9(82). 2018. P. 4 – 12.
13. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Метод фрактально-кластерного аналізу для виявлення порушень в роботі електроенергетичного обладнання енергооб'єктів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 187 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Харків: ХНТУСГ, 2017. С. 92-94.
14. Md. Nurujjaman, Ahammad Hossain, Dr. Payer Ahmed. A Review of Fractals Properties: Mathematical Approach. Science Journal of Applied Mathematics and Statistics. Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 98-105