

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-2
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Дмитро ЛОЗОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЄЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Антон СКОРКІН
(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. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

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 Дмитру ЛОЗОВСЬКОМУ

1. Тема «Підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання»

затверджена наказом по академії №4801-5/3345 від «12»__10__ 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «__10__»__12__ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проекту: аналіз сучасного стану роботи систем електропостачання; параметри мереж; вимоги до якості електроенергії, що постачається промисловим споживачам

4. Зміст роботи/проекту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ МІКРОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ; РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ МАЛОЇ ГЕНЕРАЦІЇ; РОЗДІЛ 3.ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ; ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

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 » _____ 10 _____ 2024_р.

Керівник

(підпис)

Ірина ПАНТЕЛЄЄВА

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Дмитро ЛОЗОВСЬКИЙ

(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 та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Дмитро ЛОЗОВСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання» магістрантом Дмитром ЛОЗОВСЬКИМ

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел ____.

Сучасна інфраструктура енергомереж часто не адаптована до роботи з децентралізованими джерелами енергії. Тому модернізація мереж є невід'ємною частиною оптимізації ДЕС. Інвестиції в оновлення кабелів, трансформаторів та систем автоматизації дозволяють знизити технічні втрати енергії та підвищити пропускну здатність мережі.

Важливою складовою підвищення ефективності є взаємодія з кінцевими споживачами. Заохочення використання домашніх систем зберігання енергії, впровадження програм управління попитом та інформування споживачів про можливості зниження енергетичних витрат сприяє створенню більш гнучкої та ефективної системи. Підвищення ефективності таких систем є важливим кроком на шляху до екологічно чистого, економічно вигідного та надійного енергопостачання майбутнього.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – розробка та обґрунтування підходів, методів і технологічних рішень для підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання шляхом оптимізації їхньої структури, впровадження інноваційних засобів управління енергетичними потоками, інтеграції сучасних технологій зберігання енергії та забезпечення гармонійної взаємодії із загальною енергетичною мережею.

Ключові слова: синхронний генератор, система електропостачання, математична модель, надійність електропостачання, міні-ТЕЦ

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Improving the efficiency of decentralized power supply systems" by master's student Dmitry LOZOVSKY

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, used literary sources_____.

Modern grid infrastructure is often not adapted to work with decentralized energy sources. Therefore, grid modernization is an integral part of DES optimization. Investments in upgrading cables, transformers and automation systems can reduce technical energy losses and increase network capacity.

An important component of increasing efficiency is interaction with end users. Encouraging the use of home energy storage systems, implementing demand management programs and informing consumers about the possibilities of reducing energy costs contributes to the creation of a more flexible and efficient system. Increasing the efficiency of such systems is an important step towards an environmentally friendly, cost-effective and reliable energy supply of the future.

The purpose of the master's qualification work is to develop and substantiate approaches, methods and technological solutions to increase the efficiency of decentralized power supply systems by optimizing their structure, implementing innovative means of managing energy flows, integrating modern energy storage technologies and ensuring harmonious interaction with the general power grid.

Keywords: synchronous generator, power supply system, mathematical model, power supply reliability, mini-CHP

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ
МІКРОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

- 1.1. Положення про формування генеруючих комплексів
- 1.2. Положення про формування генеруючих комплексів
- 1.3. Аналіз концепцій побудови систем електропостачання, які мають декілька джерел енергії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ МАЛОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

- 2.1. Комплексне моделювання електричних режимів в мережах підприємств з власною генерацією
- 2.2. Оцінка надійності зовнішнього електропостачання мереж 6 (10) кВ з джерелами розподіленої генерації

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

- 3.1. Автономні енергокомплекси, гібридні конструкції із застосуванням поновлюваних джерел енергії
- 3.2. Підвищення ефективності електричних мереж 6 – 35 кВ

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РГ – розподілена генерація

РЕ – розподілена енергетика

ДЕС – децентралізована електроенергетична система

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електрична станція

СЕС – сонячна електрична станція

АПК – агропромисловий комплекс

ФЕС – фотоелектрична станція

ТП – трансформаторна підстанція

ІЕС – інтелектуальна енергосистема

МКС – мультиконтактна комутаційна система

РГ – розподілена генерація

ГУ – генеруюча установка

ГТУ – газотурбінна установка

ГПУ - газо поршнева установка

ДСЕ – децентралізовані системи електропостачання

ВіЕС – віртуальні електричні станції

ВСТУП

Актуальність.

У сучасних умовах зростаючих потреб у стабільному, екологічно чистому та доступному енергопостачанні децентралізовані енергетичні системи (ДЕС) набувають все більшої актуальності. Традиційні централізовані моделі енергопостачання часто стикаються з низкою проблем, включаючи великі втрати електроенергії під час транспортування, обмежену гнучкість реагування на зміну споживчих потреб і високу залежність від викопних енергоресурсів.

Децентралізація енергетики передбачає використання локальних джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни, біогазові установки чи акумуляторні системи, розташованих ближче до споживачів. Це забезпечує зменшення втрат електроенергії, зниження навантаження на магістральні мережі та підвищення енергетичної стійкості. Такі системи є ключовим елементом для переходу до "зеленої" економіки. Використання відновлюваних джерел енергії в рамках децентралізованих мереж дозволяє скоротити викиди парникових газів, що є критично важливим для боротьби зі зміною клімату.

Крім того, ДЕС сприяють активному залученню кінцевих споживачів у процес виробництва та споживання енергії. Впровадження технологій "розумних" мереж (Smart Grids) дозволяє створювати інтерактивні моделі управління енергоресурсами, забезпечуючи ефективний обмін енергією між споживачами та постачальниками [1].

У контексті глобальних викликів і швидкої урбанізації децентралізовані енергетичні системи стають невід'ємною складовою сталого розвитку, сприяючи енергетичній незалежності, підвищенню рівня життя та зменшенню негативного впливу на довкілля.

Децентралізовані системи електропостачання відіграють ключову роль у сучасній енергетиці, особливо в умовах переходу до використання

відновлюваних джерел енергії та зменшення залежності від викопних палив. Для максимального розкриття їхнього потенціалу важливо забезпечити високу ефективність таких систем, що сприятиме зниженню витрат на енергопостачання, підвищенню надійності енергетичних мереж та інтеграції відновлюваних джерел у загальну енергетичну інфраструктуру.

Одним із важливих аспектів є оптимальне розташування генеруючих установок, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни та мікро-ТЕЦ, у безпосередній близькості до споживачів. Це дозволяє мінімізувати втрати енергії під час транспортування та забезпечити більш збалансований розподіл енергетичних ресурсів. Для досягнення цієї мети використовуються сучасні алгоритми оптимізації та математичні моделі, які враховують характеристики місцевої енергомережі та потреби споживачів.

Інтеграція технологій "розумних" мереж (Smart Grids) є ще одним важливим напрямом підвищення ефективності ДЕС. Використання автоматизованих систем управління, смарт-лічильників та програм прогнозування енергоспоживання дозволяє забезпечити моніторинг і контроль енергетичних потоків у реальному часі. Завдяки цьому стає можливим уникнення перевантажень у мережі та забезпечення оптимального використання генеруючої потужності.

Зберігання енергії є ключовим викликом для децентралізованих систем, особливо з огляду на змінність виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. Акумуляторні системи дозволяють накопичувати надлишкову енергію, що виробляється в періоди низького попиту, і використовувати її в години пікових навантажень. Це сприяє стабілізації роботи системи та підвищує її загальну ефективність.

Сучасна інфраструктура енергомереж часто не адаптована до роботи з децентралізованими джерелами енергії. Тому модернізація мереж є невід'ємною частиною оптимізації ДЕС. Інвестиції в оновлення кабелів, трансформаторів та систем автоматизації дозволяють знизити технічні втрати енергії та підвищити пропускну здатність мережі.

Важливою складовою підвищення ефективності є взаємодія з кінцевими споживачами. Заохочення використання домашніх систем зберігання енергії, впровадження програм управління попитом та інформування споживачів про можливості зниження енергетичних витрат сприяє створенню більш гнучкої та ефективної системи.

Застосування технологій прогнозування на основі штучного інтелекту та аналізу великих даних дає змогу точно оцінювати виробництво енергії та її споживання в короткостроковій і довгостроковій перспективах. Це забезпечує більш раціональне планування використання енергоресурсів, дозволяючи уникати надлишкового виробництва чи дефіциту.

Успішна інтеграція ДЕС у загальнонаціональні та регіональні енергосистеми вимагає скоординованої роботи всіх учасників ринку, включаючи розробку стандартів і протоколів для обміну даними та управління енергетичними потоками. Така міжсистемна координація є важливим фактором стабільної та ефективної роботи енергомереж.

Оптимізація роботи децентралізованих систем електропостачання забезпечує значні переваги. Зменшення втрат енергії, підвищення надійності постачання, скорочення викидів CO₂ завдяки інтеграції відновлюваних джерел та економічна вигода від зниження витрат на енергопостачання, створюють основу для сталого розвитку енергетичного сектору. Підвищення ефективності таких систем є важливим кроком на шляху до екологічно чистого, економічно вигідного та надійного енергопостачання майбутнього.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – розробка та обґрунтування підходів, методів і технологічних рішень для підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання шляхом оптимізації їхньої структури, впровадження інноваційних засобів управління енергетичними потоками, інтеграції сучасних технологій зберігання енергії та забезпечення гармонійної взаємодії із загальною енергетичною мережею.

Об'єкт дослідження – процес генерування децентралізованими системами, що є складовою сучасної енергетичної інфраструктури.

Предмет дослідження: методи, технології та підходи до підвищення ефективності функціонування децентралізованих систем електропостачання, включаючи оптимізацію розташування генеруючих елементів, управління потоками енергії та інтеграцію засобів зберігання енергії.

Задачі дослідження:

- виявити проблеми та особливості розподіленої та децентралізованої електроенергетики;
- встановити особливості малої та розподіленої генерації в інтелектуальній електроенергетиці;
- визначити принципи побудови генеруючих комплексів на основі відновлюваних джерел енергії;
- розробити комплексну модель системи електропостачання з джерелами малої генерації;
- встановити шляхи підвищення ефективності децентралізованих енергосистем.

Наукова новизна дослідження: пропонуються нові підходи до підвищення ефективності децентралізованих систем електропостачання шляхом оптимізації їхньої структури, інтеграції сучасних технологій управління потоками енергії та розглянуті методи прогнозування споживання і виробництва енергії.

Теоретичні результати:

- Розроблено концептуальну модель оптимізації роботи децентралізованих систем електропостачання.
- Удосконалено математичні методи для визначення оптимального розташування генеруючих елементів.
- Запропоновано підходи до прогнозування енергетичних процесів із використанням «розумної» мережі.

Практичні результати: розроблено рекомендації щодо інтеграції відновлюваних джерел енергії в децентралізовані системи; впроваджено

алгоритми управління енергопотоками в реальному часі для підвищення стабільності роботи мереж; запропоновано технічні рішення для зниження енергетичних втрат та забезпечення гнучкості енергопостачання.

Для дослідження теми були використані такі методи: аналіз і синтез (для систематизації існуючих підходів і розробки нових рішень щодо оптимізації роботи децентралізованих систем); математичне моделювання (для побудови моделей, що описують роботу ДЕС); методи оптимізації (для визначення оптимальних параметрів роботи систем, таких як розташування джерел енергії); комп'ютерне моделювання (для тестування запропонованих рішень та оцінки ефективності впровадження нових підходів); статистичний аналіз (для вивчення впливу різних факторів на роботу децентралізованих систем і обґрунтування прийнятих рішень); прогнозування (для оцінки змін в енергоспоживанні та виробництві енергії).

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ МІКРОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

1.1. Положення про формування генеруючих комплексів

Якщо у якості прикладу розглянути, енергопостачання об'єктів сільського господарства, то одразу можна виділити низку специфічних особливостей: розосередженість споживачів, мала одинична потужність, велика протяжність електричних, теплових та газових мереж, наявність великих територій, часто малонаселених, де сільськогосподарське виробництво ведеться, але централізоване електро- та теплопостачання відсутнє. Забезпечення надійного енергопостачання цих територій є завданням першорядної важливості, від вирішення якої значною мірою залежить успіх вирішення завдання щодо забезпечення продовольчої незалежності країни та відмови від імпорту продовольства з-за кордону. Надійність енергетичних мереж, мінімізація втрат у них енергії та висока економічна ефективність цих мереж відіграють значну роль [2,3].

Величезне значення для вирішення задачі сталого енергопостачання сільгоспвиробників має використання технології мікромереж, що формуються переважно на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – відносно нової форми реалізації концепції розподіленої енергетики.

Такі системи отримали досить широке застосування за кордоном і мають реальні перспективи для активного використання на практиці. Створення науково-методичної бази для організації на практиці мікро мережевих систем енергопостачання є одним з найбільш ефективних способів сприяння впровадженню в практику цього нового інноваційного підходу.

Спочатку необхідно проаналізувати структуру виробництва електроенергії в Україні (рис.1.1), структуру споживання електроенергії як в Україні (рис.1.2), так і в світі (рис.1.3) причому за типами енергоносіїв.

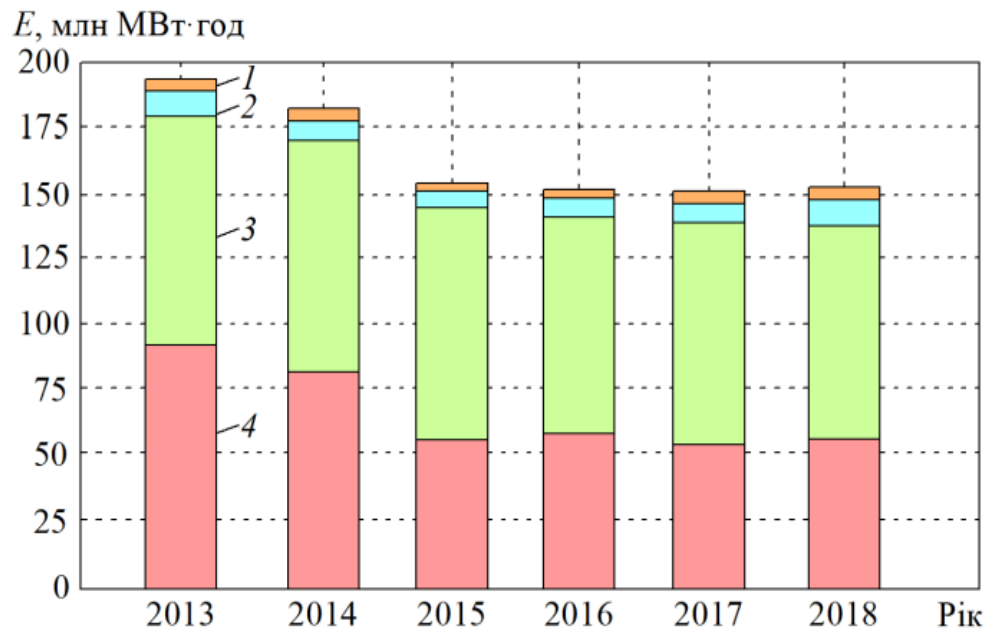


Рисунок 1.1 – Структура виробництва електроенергії електростанціями:
1 – блок-станції; 2 – ГЕС та ГАЕС; 3 – АЕС; 4 – ТЕС та ТЕЦ

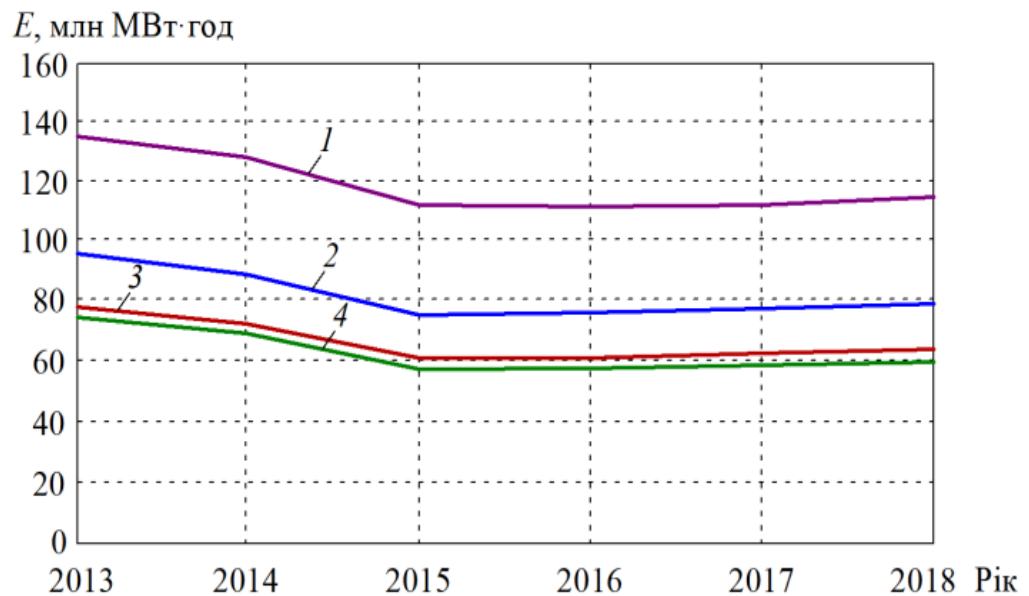


Рисунок 1.2 – Структура споживання електроенергії в Україні:
1 – населення; 2 – комунальне господарство; 3 – сільське господарство;
4 – промисловість, будівництво, транспорт

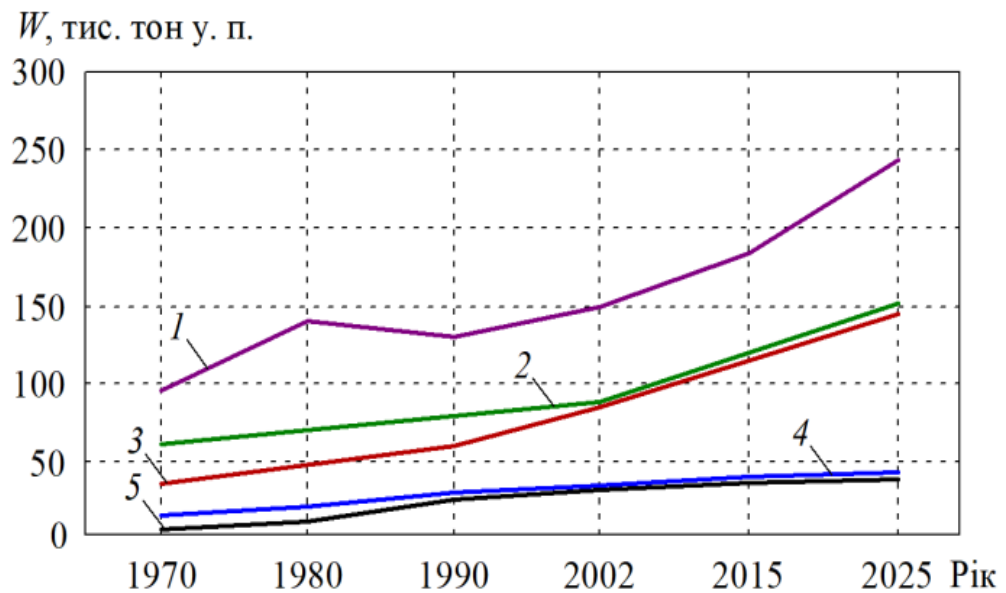


Рисунок 1.3 – Динаміка споживання енергії в світі за типами енергоносіїв: 1 – нафта; 2 – вугілля; 3 – газ; 4 – відновлювальні джерела; 5 – атом

Найбільш перспективними, з цієї точки зору, для побудови мікро мережами є сільські території, де доступ до відновлюваних джерел енергії в меншій мірі обмежений у порівнянні з урбанізованою місцевістю і де, як правило, є і інші місцеві енергоресурси.

На першому етапі роботи зі створення мікро мережі необхідно відповісти на наступні питання:

1. Наскільки великою ця система повинна (Може) бути?
2. Скільки ця система буде коштувати?
3. Чи дасть система прибуток у найближчому майбутньому?

Відповіді на ці питання дозволяють зрозуміти, наскільки розглянута мікро мережа буде прийнятною для інвестування.

Конфігурація мікро мережі, в першу чергу, визначається такими факторами, як:

- 1) склад споживачів та їх категорійність;
- 2) наявність споживачів, які потребують безперебійного живлення;

З) потенціал різних видів ВДЕ по території мікро мережі, насамперед, в першу чергу у місцях дислокації об'єктів-споживачів (тоді буде зручно керувати роботою генеруючого джерела).

В окремих випадках, при виявленні у будь-якому місці особливо сприятливих метеокліматичних умов та високого енергетичного потенціалу ВДЕ джерело генерації може бути розміщене і на окремому майданчику, бути самостійним суб'єктом мікро мережі та мати власного власника.

Для всіх споживачів складаються графіки навантажень (добові, сезонні, місячні, річні), а для джерел генерації будуються графіки вироблення всіх джерел з урахуванням потенціалу ВДЕ у місцях їх дислокації (при цьому місця для їх розміщення обираються з урахуванням забезпечення максимальної потужності).

Методом суперпозиції графіків споживання та графіків вироблення електроенергії для різного складу джерел генерації визначається таке їх поєднання, яке в максимальному розмірі забезпечить покриття навантажень усіх споживачів при мінімальній потужності акумулювання та резервування і, природно, при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах.

У разі можливості організувати роботу мікро мережі паралельно з централізованою мережею потреба в акумулюванні та резервуванні може бути мінімізована. При цьому робота з мережею може бути організована по декільком узгодженим схемам: в першому випадку, для покриття пікових навантажень мікро мережа приймає електроенергію з мережі та по відношенню до неї є регулярним споживачем; другий випадок - обмін електроенергією з мережею здійснюється за двома напрямками, тобто мікро мережа покриває свій дефіцит відбором енергії з мережі, а за наявності надлишкової потужності - передає електроенергію до мережі. При цьому основний обсяг виробленої та споживаної електроенергії реалізується в межах мікро мережі, тому підключення останньої до централізованої мережі великого впливу на неї не буде мати.

Важливе значення для ефективного функціонування мікро мережі має грамотно організована система управління, яка має виконувати наступні функції: в автономному режим підтримувати баланс потужності; комутувати генератори та накопичувачі енергії; керувати потужністю регульованих джерел енергії; підтримувати стабільність напруги та частоту мікро мережі; забезпечувати збір інформації, необхідної споживачам для «розумного» керування навантаженнями.

Автономну мікро мережу доцільно створювати у разі неможливості приєднання до централізованої мережі в регіонах з великими ресурсами ВДЕ. При цьому потужність накопичувачів енергії повинна бути розрахована з урахуванням тривалості ймовірних інтервалів часу без вітру та сонячної радіації. А ось можливість організувати роботу мікро мережі паралельно з централізованою мережею обернеться значною вигодою, оскільки знизить рівень капітальних витрат та експлуатаційних витрат.

Таким чином, при розробці проєктів зі створення мікро мережі в заданому районі передбачається рішення завдань на двох рівнях [4,5]. Перший рівень передбачає розгляд питань, що належать до мікро мережі загалом (вищий рівень). На цьому рівні розглядаються такі питання, як:

1. Розробка принципової схеми мікро мережі, що включає розробку структури розміщення споживачів, генераторів, систем акумуляування та резервних джерел живлення.

2. Визначення категорійності споживачів електроенергії, їх споживання (добове, сезонне, річне), ступінь необхідності забезпечення безперебійного енергопостачання та оцінки наслідків порушення режимів подання енергетичного ресурсу.

3. Оцінка потенціалу ВДЕ в різних точках території, підпадає під дію мікро мережі, в тому числі потенціалу ВДЕ в точках дислокації споживачів.

4. Розробка принципової схеми прив'язки джерел генерації, їх тип, вид використовуваного поновлюваного ресурсу.

5. Розробка можливих режимів функціонування мікро мережі з умовою надійного енергозабезпечення споживачів.

6. Оцінка можливості розвитку мікро мережі з точки зору включення нових споживачів та нових джерел генерації.

Необхідно враховувати, що у складі мікро мережі споживачі енергії в той же час можуть бути її виробниками, що експлуатують свої мікро електростанції або накопичувачі енергії. Інтеграція до мікро мережі вітрових електростанцій (ВЕС), сонячних станцій (СЕС) та інших джерел генерації на основі ВДЕ зустрічає значно менше бюрократичних перешкод, ніж приєднання їх до централізованих мереж.

7. Оцінка прийнятної форми власності мікро мережі та її організаційна структура (слід враховувати ту обставину, що володіти мікро мережею та експлуатувати її можуть власники житлових будинків (товариство власників житла), підприємства, ЗАТ, муніципальні освіти тощо.). При проведенні цієї роботи важливо враховувати, які споживачі плануються для включення до складу мікро мережі (вже існуючі або, що знову підключаються) і як вони функціонуватимуть у складі мікро мережі (у мікро мережі вироблена енергія, в основному, використовується місцевими споживачами, що забезпечує зниження втрат, пов'язаних з передачею та розподілом енергії з електричних мереж).

8. Оцінка наявності у безпосередньої близькості до території, що обслуговується, централізованої мережі та можливості технологічного приєднання до неї.

9. Розгляд питань надійності електропостачання споживачів у мікро мережі (надійність постачання електроенергією в аварійних випадках різного роду в рамках мікро мережі забезпечити суттєво легше, ніж у великих енергетичних системах; споживачі енергії у мікро мережі можуть брати участь у процесі балансування потужності шляхом регулювання своїх навантажень, генеруючи, накопичуючи та віддаючи електроенергію у мікро мережу).

10. Розгляд питань економіки мікро мережі та тарифів на вироблену та на ту, що постачається, електроенергію, а також терміну окупності проекту зі створення мікро мережі.

11. Забезпечення оптимального вибору системи керування роботою мікро мережі та її реалізація.

Другий рівень передбачає розгляд питань, що стосуються вибору елементів мікро мережі: тип та потужність генераторів, систем акумуляування, конструкцій інтерфейсних пристроїв передачі електроенергії від генераторів у мікро мережу та низку інших питань, що стосуються компонентів мікро мережі.

Правильний вибір елементів мікро мережі є важливим етапом у її формуванні в заданому районі з метою забезпечення надійності її функціонування, термінів окупності, вартості виробленого, та енергоресурсу, що поставляється. Тому цей етап роботи видається вкрай важливим.

Склад джерел генерації в такій мікро мережі визначається рядом факторів, основними з яких є такі, як склад споживачів, їх навантаження, а також потенціал ВДЕ різного типу, доступних для використання на території, де мікро мережа реалізується. На

Рис.1.4 наводиться принципова схема мікро мережі для енергопостачання сільських споживачів. Критерії відбору джерел генерації електроенергії для роботи в складі мікро мережі. Вироблення таких критеріїв створить сприятливі умови для розширення обсягів та потужності впроваджених у практику мікро мереж на основі ВДЕ, оскільки забезпечить працівників ефективним інструментом на вирішення цих задач. Для вибору та обґрунтування подібних критеріїв вкрай необхідна оцінка ефективності всіх можливих для використання джерел генерації, як традиційних, так і нетрадиційних, тобто поновлюваних. Це вимагає використання єдиного системного підходу до аналізу як окремих технологій перетворення енергії, так і комбінованих систем, а також облік багатьох супутніх факторів.

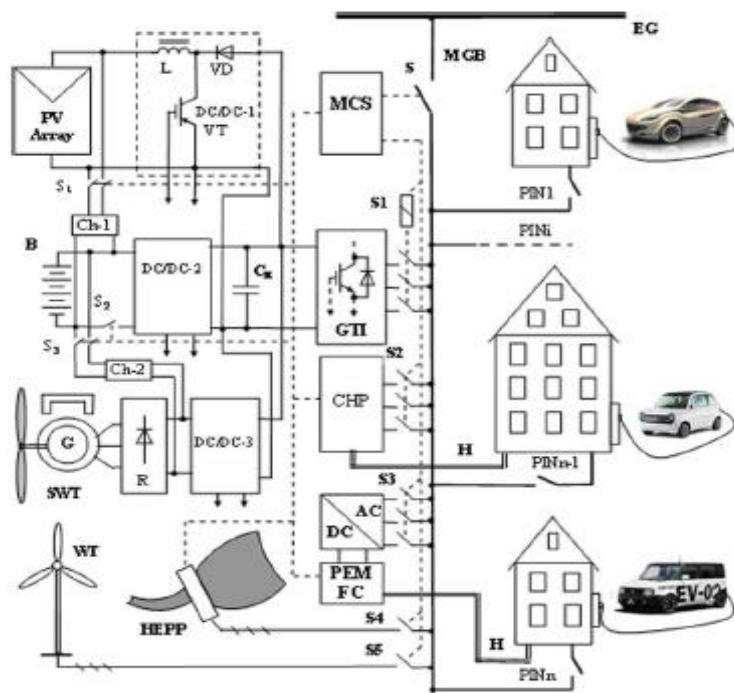


Рисунок 1.4 - Один із можливих варіантів локальної мікро мережі для сільських територій

Мікро мережі, як системи енергопостачання, створюються, зрештою, для виконання цілком певної мети – задоволення попиту споживачів, що входять до її складу, на енергію за мінімальної потреби в ресурсах, з найменшими витратами та з найменшим сумарною шкодою протягом певного періоду часу. Мірою досягнення цієї мети є ефективність системи, що характеризується одним або кількома параметрами. Ці параметри можна прийняти як критерії ефективності, які дозволяють вирішити основне завдання – вибір оптимального варіанту складу мікро мережі, а також проведення аналізу факторів, що визначають існування такого варіанту, та їх вплив на остаточне рішення.

Вибір ефективних варіантів енергопостачання споживачів, об'єднаних у мікро мережу – складна проблема системного аналізу, оскільки системи енергопостачання розрізняються за багатьма ознаками:

- по вигляду використовуваної технології виробництва енергії;
- за ступенем взаємозамінності та взаємодоповнюваності (компліментарності) джерел енергії;

- за передбаченими режимами експлуатації;
- за планованими термінами експлуатації створюваної мікро мережі;
- за ймовірним ступенем заміщення енергії, що виробляється традиційними генеруючими пристроями, зеленою, тобто, отриманої на основі ВДЕ, енергією;
- за наявністю енергетичного потенціалу в даному місці для даного конкретного виду ВДЕ;
- за режимами функціонування стосовно централізованих мереж вищого рівня;
- за рівнем автономності (можливості працювати в «острівному» режимі);
- по ряду економічних показників;
- за наявності в мережі споживачів, що вимагають забезпечення безперебійного енергопостачання, та їх співвідношенню з споживачами інших категорій;
- за ступенем сталості виробітку електроенергії даним генератором та можливості роботи у «базовому» режимі.

У загальному вигляді джерела можуть класифікуватися за такими критеріями: за погодно-кліматичними умовами (визначають потенціал даного джерела); за технічними характеристиками (комплекс параметрів, що визначаються типом установки, її характеристиками тощо); за економічними показниками (вартість одиниці встановленої потужності, експлуатаційні витрати, необхідність обслуговування тощо).

Найбільш поширеними на практиці є такі генеруючі системи: вітряні електростанції, сонячні електростанції, мікро-ГЕС та біогазові установки [6,7].

Частіше всього в таких мікро системах застосовують енергію сонця та вітру. У якості прикладу наведемо дані про річний виробіток електроенергії СЕС потужністю 30 кВт (для умов м. Каунас Литва) залежно від кута нахилу площини фотоелектричних модулів щодо до горизонтальної поверхні. При оптимальному куті нахилу для м. Каунас - 38 ° (рис.1.5). СЕС виробляє

максимальну кількість електроенергії (26,3 МВт·год на рік). Незначні відхилення від оптимального кута нахилу до $\pm 15\text{--}20^\circ$ великого впливу на зменшення кількості виробленої електроенергії не мають.

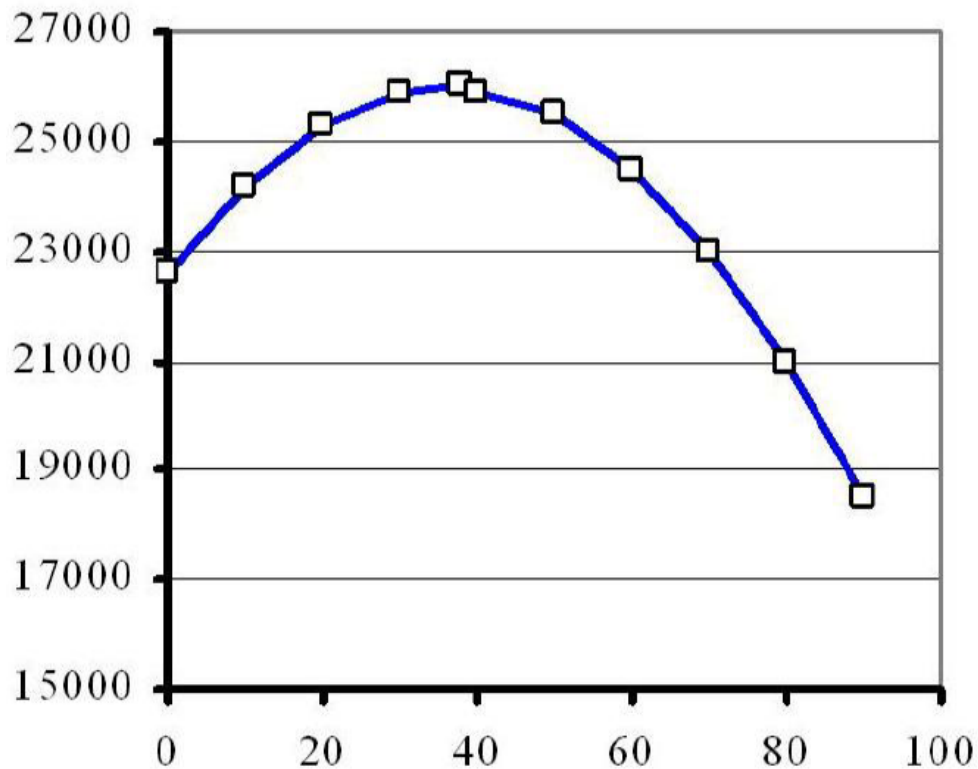


Рисунок 1.5 - Річний виробіток електроенергії СЕС потужністю 30 кВт залежно від кута нахилу фотоелектричних модулів

Генерація міні-ГЕС також дуже важлива у теперішній час. Як і для будь-якого іншого джерела генерації, першою та найважливішою умовою ефективного функціонування міні-ГЕС є потенціал, тобто, наявність річки або іншого водотоку з досить високим потенціалом з точки зору вироблення електричної енергії. Мала ГЕС, як будь-яка електростанція іншого типу, ефективно працює тоді, коли коефіцієнт використання первинного джерела енергії у ній відповідає сучасному світовому рівню або вище, а її негативний вплив на довкілля мінімальний. Ефективна робота малих ГЕС забезпечується під час виконання двох основних умов:

- вибір оптимально підходящої гідротурбіни для даних гідротехнічних умов з можливо максимальним ККД;
- максимальне використання гідроенергетичного потенціалу греблі.

Можна сказати, що розширення масштабів використання мікро мереж має гарну перспективу у зв'язку з можливостями подальшого зниження собівартості виробленої електроенергії, а також з дуже великими можливостями застосування технології електропостачання на основі мікро мереж з використанням ВДЕ для виробництва екологічно чистої сільськогосподарської продукції, потреба в якій на ринку безперервно зростає.

Серйозні перспективи мають мікро мережі для енергопостачання об'єктів малоповерхового будівництва, при створенні поселень на нових територіях або при освоєнні нових ділянок для дачного будівництва.

Застосування мікро мереж, кожна з яких є «енергетичним островом», відкриває великі можливості для організації енергопостачання великих територій. Кожна мікро мережа в цьому острові споживає всю вироблювану у її межах енергію, тому потоки не будуть значними, що суттєво розвантажить низьковольтні сільські мережі, підвищить їх пропускну здатність та надійність.

Запропонована та розвинена концепція мікро мережі на основі переважного використання поновлюваних джерел енергії, що представляє собою нову форму реалізації ідеології розподіленої енергетики, яка відкриває можливість ефективного застосування відновлюваних джерел енергії для вирішення задачі енергопостачання віддалених, насамперед, сільських територій, малоповерхового будівництва та автономного енергопостачання окремо розташованих одиничних об'єктів.

1.2. Положення формування генеруючих комплексів

Найбільш поширеними джерелами електроенергії віддалених споживачів є дизельні електростанції (ДЕС), якими виробляється близько 1,8

млрд кВт·г електроенергії при щорічній витраті палива – 6 млн. тон [5]. Встановлена потужність ДЕС визначається максимальною потужністю графіка навантаження об'єкта електропостачання. Нерівномірність споживання електроенергії призводить до суттєвого недовикористання встановленої потужності ДЕС. У результаті, ККД різко знижується, а питома витрата палива на вироблення 1 кВт·год електроенергії збільшується щодо їх паспортних даних. Подорожчання органічного палива, зростання транспортних тарифів на його доставку, неефективність режимів роботи існуючих ДЕС зумовлюють необхідність застосування поновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Повсюдне поширення, практично невичерпний потенціал і екологічна чистота – основні переваги ВДЕ. Однак практичне застосування обмежується їх мінливістю у просторі та часі, низькою щільністю енергетичних потоків.

Це призводить до нерівномірності вироблення електроенергії, появи коливань вихідної потужності, залежності електрогенерації від метеорологічних умов, що робить актуальним комбіноване використання ВДЕ. Однак, внаслідок нестабільності останніх, необхідно передбачати їх паралельну роботу з гарантованими джерелами.

Електропостачання сільськогосподарських підприємств та інших невеликих об'єктів агропромислового комплексу (АПК), з точки зору електроспоживання об'єктів може бути здійснено за різними альтернативними варіантами (рис.1.6).

Світовий досвід демонструє зростаючий інтерес до використання в сільському господарстві нетрадиційних, тобто відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові електростанції (ВЕС) та сонячні фотоелектричні станції (ФЕС). Це зумовлено низкою причин, серед яких основними є:

- зростання збитків, викликаних перебоями в електропостачанні від централізованих джерел;
- постійне підвищення тарифів на електроенергію від центральних енергосистем;

- обмеженість природних запасів викопного палива;
- посилення екологічних проблем через забруднення навколишнього середовища, спричинене традиційною енергетикою.

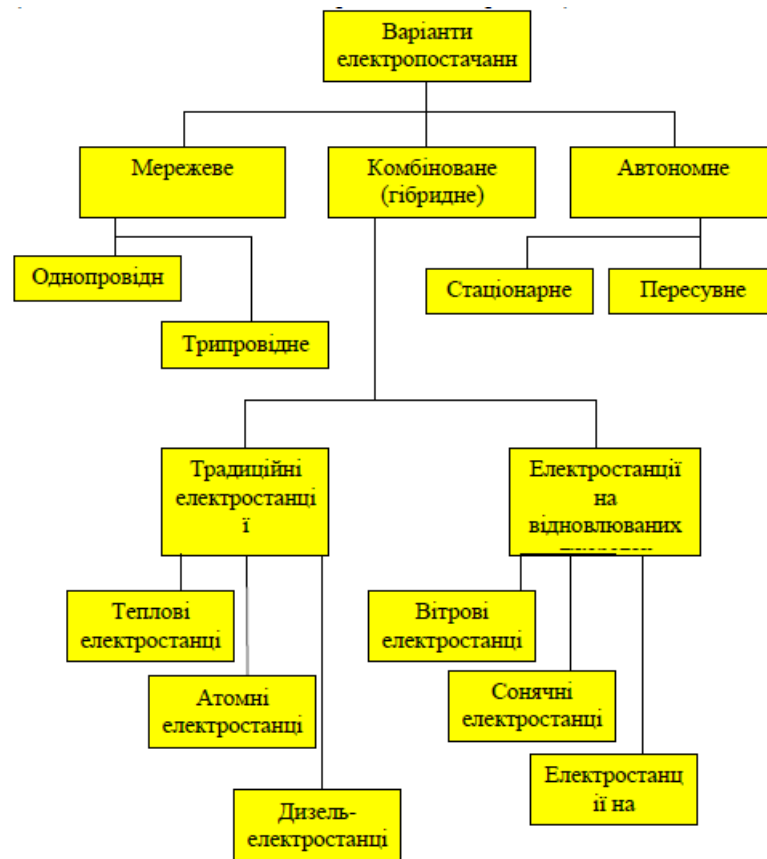


Рисунок 1.6 - Варіанти електропостачання

Попри відновлення інтересу до досліджень у сфері використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), системи електропостачання на їх основі вдосконалюються досить повільно. Це значною мірою пояснюється тим, що більшість досліджень зосереджена на розвантаженні великих енергетичних систем, зокрема паливних електростанцій та ТЕЦ у централізованих енергомережах.

Великі вітрові та сонячні електростанції мають тривалий термін окупності, і навіть успішні проєкти не призводили до помітного зниження тарифів на електроенергію. Це робить менш потужні установки неефективними для комбінованого чи автономного застосування.

До того ж автономні та комбіновані електростанції працюють в умовах, які суттєво відрізняються від тих, що характерні для централізованих мереж. Тому методи проектування мережевих електростанцій на базі ВДЕ не можуть бути використані без значних адаптацій для створення автономних чи комбінованих систем електропостачання.

За кордоном системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії функціонують в умовах, які значно відрізняються від українських реалій.

По-перше, зарубіжні автономні об'єкти характеризуються значно більшою встановленою потужністю електроприймачів, що дозволяє забезпечувати ефективну роботу навіть за високих енергетичних потреб.

По-друге, у розвинених країнах існують механізми, які дозволяють власникам автономних електростанцій продавати надлишок виробленої електроенергії в централізовані мережі. Це забезпечується завдяки спеціальним програмам підтримки, таким як "зелений тариф", який стимулює розвиток відновлюваної енергетики. Така практика робить автономні системи більш економічно привабливими та фінансово вигідними.

По-третє, у цих країнах розвиток відновлюваної енергетики ведеться з урахуванням розширення ринку її реалізації. Уряди активно впроваджують політики для стимулювання використання чистої енергії, зокрема через фінансові стимули, гранти та субсидії на встановлення обладнання, а також створюють сприятливі умови для інтеграції таких систем у загальні енергомережі.

Крім того, технології та обладнання, які використовуються в закордонних автономних електростанціях, є більш сучасними, що забезпечує їх високу ефективність і надійність. Такий підхід дозволяє країнам з розвинутою економікою не лише задовольняти внутрішні енергетичні потреби, але й експортувати енергію або технологічні рішення для її виробництва в інші регіони світу [9].

Світова зацікавленість у використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) свідчить про їх значний потенціал і перспективи подальшого впровадження.

Природні та кліматичні умови південних регіонів України, зокрема Запорізької області, яка є одним із провідних сільськогосподарських регіонів країни, створюють сприятливі передумови для широкого застосування вітрових (ВЕС) і сонячних електростанцій (ФЕС). Висока сонячна активність і наявність відкритих просторів дозволяють ефективно використовувати потенціал цих джерел енергії.

У зв'язку з цим особливо актуальним стає розвиток і вдосконалення невеликих електростанцій на основі ВДЕ, які можуть функціонувати в комбінованих або автономних системах електропостачання. Такі системи здатні забезпечити енергонезалежність і стабільність постачання електроенергії для місцевих споживачів, зокрема у сільській місцевості.

Розробка та впровадження подібних рішень вимагають детального наукового аналізу роботи енергетичних установок, побудованих на основі ВДЕ, а також врахування специфічних умов їх експлуатації. Зокрема, через значну зонально-кліматичну варіативність, властиву відновлюваним джерелам енергії, дослідження мають бути адаптовані до конкретних кліматичних зон.

Окрім технічних аспектів, важливо також враховувати соціально-економічні фактори, такі як доступність обладнання, рівень інвестиційної привабливості проєктів і підтримка з боку держави. Саме інтеграція наукових підходів із практичними рішеннями дозволить розкрити повний потенціал ВДЕ та сприяти сталому розвитку енергетики в регіонах із високим ресурсним потенціалом.

1.3. Аналіз концепцій побудови систем електропостачання, які мають декілька джерел енергії

Основними джерелами живлення – центрами живлення (ЦЖ) у розподільчій електричній мережі є:

- підстанції з номінальними класом напруги 220/35/10/6, 110/35/10/6, 35/10/6 кВ;
- районні електричні станції великої та середньої встановленої потужності, що застосовують традиційні види органічного палива, газові та дизельні електричні станції малої потужності рідше застосовуються як джерела живлення.

Мало представлені:

- об'єкти розподіленої генерації;
- гідравлічні електричні станції;
- електричні станції, що використовують нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Практично відсутні електричні накопичувачі великої потужності.

Схема мережі визначає спосіб комутації ліній електропередачі (ЛЕП), умови резервування окремих елементів, електричні режими роботи, особливості конструктивного виконання трансформаторних підстанцій (ТП), а також використовуваний захист і автоматику. Вибір схеми електропостачання залежить від категорії електроприймачів. Основними видами конфігурації розподільчої електричної мережі 6-20 кВ є радіальні та магістральні мережі.

Відповідно до технічних вимог, у розподільчих мережах 6–20 кВ мають застосовуватися такі схеми електропостачання:

- тупикова;
- двопроменева петлева;
- автоматизована двопроменева.

Схеми наведені на рис.1.7.

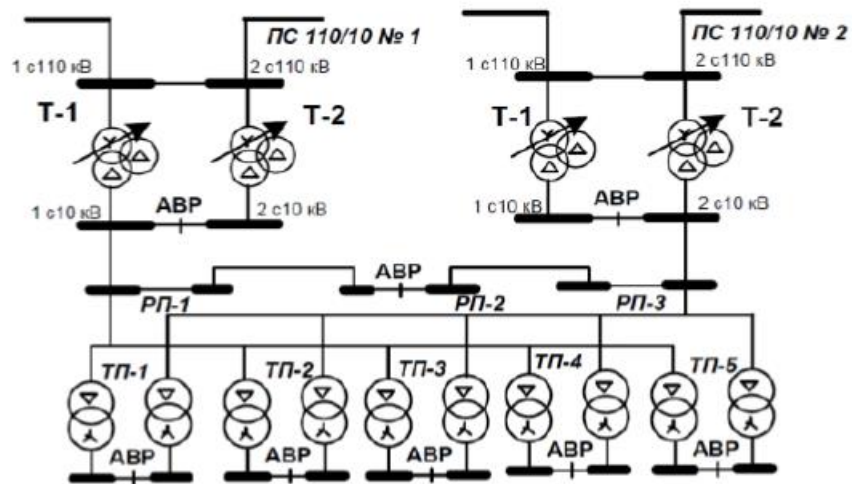


Рисунок 1.7 – Автоматизована двопроменева схема

Найчастіше в розподільчих електричних мережах 6–20 кВ присутні кілька джерел живлення, що взаємно резервують один одного, однак відсутні замкнуті транзитні зв'язки з великим рівнем струмів короткого замикання та транзитною конфігурацією мереж 35–220 кВ.

Слід зазначити, що на початковому етапі розвитку електроенергетики в нашій країні було споруджено велику кількість сільських гідравлічних електричних станцій на малих річках. Пізніше у процесі розвитку єдиної енергетичної системи (ЄЕС) електропостачання сільських споживачів стали забезпечувати від державних розподільчих електричних мереж. Останнім часом у зв'язку з високим ступенем зносу обладнання розподільчих електричних мереж і, як наслідок, високими показниками аварійності на обладнанні розподільчих електричних мереж [10] спостерігаються нові введення об'єктів розподіленої генерації, як правило на основі дизельних та газо-поршневих генеруючих установок.

Однією з причин є прагнення власників підприємств забезпечити резервне живлення найбільш відповідальних груп електроприймачів при аваріях в енергосистемі, в тому числі з виділенням їх на ізольовану роботу [11], із збереженням показників якості електричної енергії відповідно. У процесі проєктування, спорудження та експлуатації об'єктів розподіленої генерації

виникає ряд проблем, пов'язаних з роботою об'єктів РГ у складі енергосистеми відповідно, а саме:

- первинне регулювання частоти;
- регулювання напруги та перетоків реактивної потужності;
- забезпечення стійкої роботи синхронних машин при нормативних збуреннях (короткі замикання, відключення електричного зв'язку).

Розглянемо варіанти підключення об'єктів РГ до електричних мереж. Варіанти приєднання об'єктів розподіленої генерації наведені на рис.1.8.

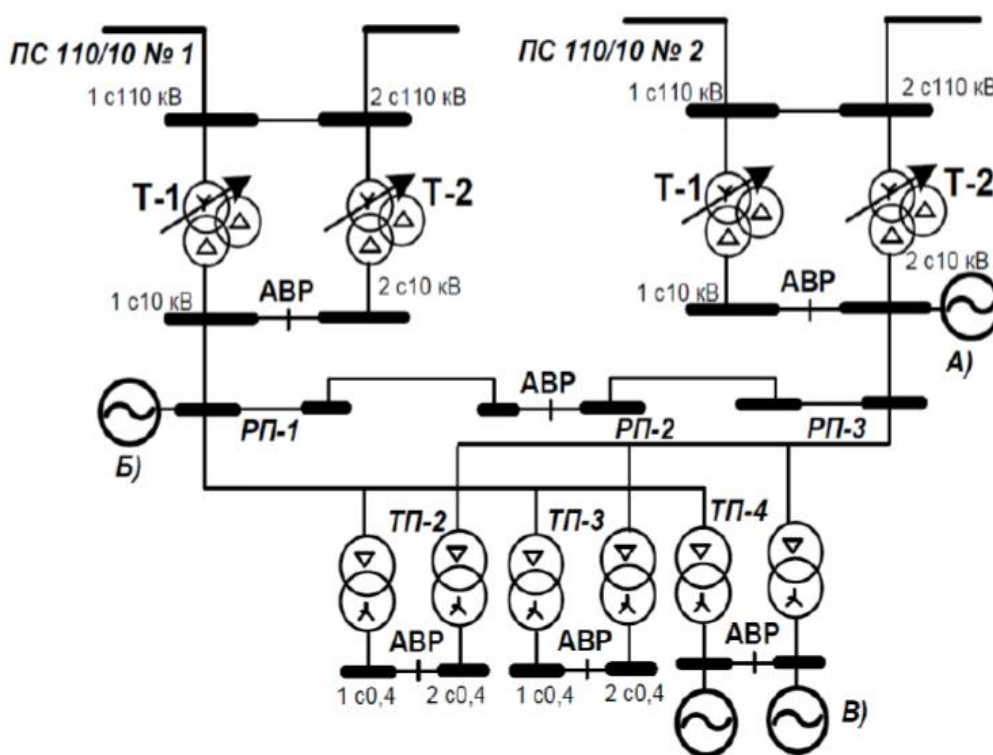


Рисунок 1.8 - Варіанти підключення об'єктів розподіленої генерації до електричних мереж

Об'єкти розподіленої генерації (РГ) можуть підключатися за варіантами:

1. Варіант А – до шин 6–20 кВ підстанцій високовольтних електричних мереж.
2. Варіант Б - до шин 6-20 кВ РП, ТП розподільчих електричних мереж.
3. Варіант В - до шин 0,4 кВ ТП розподільних електричних мереж.

При цьому режими роботи об'єктів генерації за варіантами Б і В щодо паралельної роботи із зовнішніми електричними мережами можуть бути:

- 1) ізольованими (автономними) від зовнішніх електричних мереж;
- 2) змішаними. У нормальному режимі ізольовано, а в аварійному режимі від зовнішніх електричних мереж;
- 3) паралельними із зовнішніми електричними мережами.

Крім цього, при створенні об'єктів малої генерації виникає потреба:

- в організації оперативно-технологічного управління об'єктом;
- у наборі персоналу високої кваліфікації, здатного здійснювати якісне оперативне та ремонтне обслуговування;
- в організації взаємовідносин з системним оператором.

Основною відмінністю концепцій побудови перспективних інтелектуальних розподільчих електричних мереж від існуючих концепцій побудови - це підхід до забезпечення надійного та якісного постачання кінцевому споживачу. Існуючий підхід – це централізоване виробництво електричної енергії на великих електростанціях, торгівля електричною енергією на оптовому ринку електричної енергії та потужності, централізоване оперативне управління процесом передачі та розподілу електричної енергії по високовольтних мережах державних електромережових компаній та забезпечення надійного електропостачання шляхом розвитку та збільшення кількості зв'язків в існуючих розподільних електричних мережах.

Перспективний підхід – це уникнення централізованого виробництва електричної енергії на великих електростанціях шляхом створення об'єктів розподіленої генерації в безпосередній близькості до вузлів споживання, розвиток роздрібних ринків електричної енергії, а також розвиток локальних центрів оперативного управління процесом передачі та розподілу електричної енергії.

Основною функціональною властивістю, яку необхідно забезпечити в результаті створення інтелектуальних розподільчих електричних мереж, є оптимальна інтеграція електростанцій і систем акумулювання електроенергії г

різних типів і потужності шляхом підключення їх до енергосистеми за стандартизованими процедурами технічного приєднання та перехід до створення «мікро енергосистем (мікро мереж)».

При розвитку інтелектуальних розподільних мереж виділяють три основні напрями розвитку це:

- розвиток розподіленої генерації;
- розвиток мікро мереж;
- розвиток багаторівневої ієрархічної мультиагентної системи управління виробництвом, розподілом та споживанням електричної енергії.

Розподілена генерація в інтелектуальних розподільчих мережах передбачає:

- розподіл генеруючих джерел по мережі загального призначення, при якому вони наближені до вузлів споживання електроенергії;
- наявність багатьох споживачів, які виробляють електричну енергію для власних потреб, направляючи її надлишки в загальну мережу;
- координоване управління генеруючими джерелами, що використовує можливості ІЕС з метою підвищення надійності та якості електропостачання всієї сукупності споживачів з урахуванням їх індивідуальних вимог.

Концепція побудови інтелектуальних електричних мереж на основі застосування мультиконтактних комутаційних систем (МКС) дозволяє вирішити значну частину проблем підключення до електричних мереж відновлюваних джерел енергії, так як дозволяє гнучко змінювати конфігурацію мережі. Застосування різних типів МКС, оснащених системами моніторингу режимів роботи мережі, системами управління, контролю та обліку, в мережі дає можливість роботи мережі таким чином, що ВДЕ або малі генератори, накопичувачі енергії працюють окремо від централізованої енергосистеми, хоча можлива і їхня паралельна робота з системою.

Така мережа оснащується пристроями моніторингу, обліку, контролю та управління не тільки на МКС, але і у джерел генерації, і у споживачів, що дозволяє своєчасно реагувати як на зміну вироблюваної генераторами енергії,

так і на зміну потреби в ній у споживачів. Відбувається обмін даними між усіма елементами мережі та єдиним інформаційним центром мережі, що, у свою чергу, дає можливість реалізовувати принципи SMART GRID [12,13].

Однак при реалізації концепції мікромереж для організації систем електропостачання сільських споживачів виникає і низка проблем:

- визначення схем видачі потужності і складу генеруючого обладнання, здатного забезпечити стійку роботу при різних видах нормативних збурень у прилеглий мережі;

- оптимізація та управління режимами паралельної роботи мікро мереж, що містять у собі об'єкти розподіленої генерації, що використовують різні види енергії та існуючих розподільчих електричних мереж державних електромережових компаній;

- необхідність реконструкції та модернізації існуючих об'єктів розподільчих електричних мереж, а також пристроїв релейного захисту та автоматики, що використовуються там;

- відсутність окремих нормативних документів визначальних вимог до генеруючого обладнання об'єктів розподіленої генерації та підключення їх до єдиної енергосистеми.

Актуальним залишається завдання розробки засобів управління та оптимізації режимів роботи інтелектуальних систем електропостачання (Smart Grid) сільських споживачів, що містять мультиконтактні комутаційні системи та об'єкти розподіленої генерації, що дозволить у значній мірі вирішувати зазначені вище проблеми організації інтелектуальних електричних мереж.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Розширення масштабів використання мікро мереж має гарну перспективу у зв'язку з можливостями подальшого зниження собівартості виробленої електроенергії, а також з дуже великими можливостями застосування технології електропостачання на основі мікро мереж з використанням ВДЕ для виробництва екологічно чистої сільськогосподарської продукції, потреба в якій на ринку безперервно зростає.

Серйозні перспективи мають мікро мережі для енергопостачання об'єктів малоповерхового будівництва, при створенні нових поселень.

Запропонована та розвинена концепція мікро мережі на основі переважного використання поновлюваних джерел енергії, що представляє собою нову форму реалізації ідеології розподіленої енергетики, яка відкриває можливість ефективного застосування відновлюваних джерел енергії для вирішення задачі енергопостачання віддалених, насамперед, сільських територій, малоповерхового будівництва та автономного енергопостачання окремо розташованих одиничних об'єктів.

Особливо актуальним в наш час стає розвиток і вдосконалення невеликих електростанцій на основі ВДЕ, які можуть функціонувати в комбінованих або автономних системах електропостачання. Такі системи здатні забезпечити енергонезалежність і стабільність постачання електроенергії для місцевих споживачів, зокрема у сільській місцевості.

Розроблена концепція побудови інтелектуальних електричних мереж на основі застосування мультиконтактних комутаційних систем (МКС) дозволяє вирішити значну частину проблем підключення до електричних мереж відновлюваних джерел енергії. Застосування таких МКС, дає можливість роботи мережі таким чином, що ВДЕ або малі генератори, працюють окремо від централізованої енергосистеми, хоча можлива і їхня паралельна робота з системою.

РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ МАЛОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

У даному розділі пропонується підхід, що дозволяє скорочувати провали напруги в системах електропостачання з джерелами малої генерації за рахунок накопичувачів та джерел електричної енергії. Важливими залишаються і питання стійкості джерел розподіленої генерації та зовнішньої мережі [8], і навіть їх впливом на режимну надійність [9]. У зазначених системах повинні бути забезпечені підвищені вимоги до пристроїв релейного захисту та автоматики.

У цій роботі описано загальний підхід до створення комплексної моделі системи електропостачання з джерелами малої потужності. Система розглядається як сукупність власних малих джерел потужності, зовнішніх джерел, споживачів та елементів електричних мереж. Окремі моделі елементів системи спроектовані для вирішення оптимізаційного завдання, яке направлене на пошук найкращого джерела електроенергії (як зовнішнього, так і місцевого) з використанням методу динамічного програмування.

Загалом оптимізаційне завдання має такий вигляд:

$$\min (3) = \min \left(\beta \cdot P + C_{\Delta W} + (\alpha_{(1)} + \alpha_{(2)} + \alpha_{(3)}) Y \right),$$

де: β – тариф на електроенергію від конкретного постачальника, грн/кВт·год; P – необхідна споживачеві потужність, чи потужність від зовнішнього джерела, кВт; $C_{\Delta W}$ – вартість втрат електроенергії у системі електропостачання, грн; $\alpha(1)$, $\alpha(2)$, $\alpha(3)$ – коефіцієнт надійності зовнішнього джерела електричної енергії, власних генераторів системи та елементів передачі потужності відповідно; Y – економічний збиток від перерви електропостачання, грн.

На цільову функцію накладаються обмеження, які відображають баланс потужності в системі електропостачання та допустимість параметрів режиму її елементів. Система обмежень має такий вигляд:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{ист}} + \sum P_{G_N} = P_{\text{нагрузки}} + \Delta P_{\text{сэс}}, \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, \\ S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max}, \end{cases}$$

де: $\sum P_{\text{ист}}$ – сумарна потужність джерел розподіленої генерації, кВт; $\sum P_{G_N}$ – активна потужність, що виробляється власними джерелами системи електропостачання, кВт; $P_{\text{нав}}$ – навантаження системи електропостачання з розподіленою генерацією, кВт; $\Delta P_{\text{сэс}}$ – втрати активної потужності в системі електропостачання з урахуванням потужності, що приймається від зовнішнього джерела, кВт; $U_{i\min}$, $U_{i\max}$ – гранично допустимі втрати напруги у вузлі ($\pm 10\%$ від номінального значення), кВ; $S_{i\min}$, $S_{i\max}$ – мінімальне та максимально допустиме значення потужності, що протікає по елементам електричної мережі, визначається навантажувальною здатністю, кВА.

Моделі окремих елементів системи електропостачання доцільніше представляти в табличному вигляді, що забезпечить спрощення введення вихідних даних і реалізацію алгоритму оптимізації, заснованого на методі динамічного програмування.

Моделі елементів системи електропостачання представлені у табл.2.1 – 2.4.

Таблиця 2.1 - Модель зовнішнього джерела електроенергії

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
ΔP , кВт	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	...	ΔP_n
$\alpha_{(1)}$	$\alpha_{(1)1}$	$\alpha_{(1)2}$	$\alpha_{(1)3}$	...	$\alpha_{(1)n}$

Таблиця 2.2 - Модель власних джерел електроенергії

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
$\alpha_{(2)}$	$\alpha_{(2)1}$	$\alpha_{(2)2}$	$\alpha_{(2)3}$	...	$\alpha_{(2)n}$

Таблиця 2.3 - Модель споживача

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
$З$, руб.	$З_1$	$З_2$	$З_3$	...	$З_n$

Таблиця 2.4 - Модель постачальника електроенергії

P , кВт	P_1	P_2	P_3	...	P_n
β , руб./кВт·ч	β_1	β_2	β_3	...	β_n
ΔP , кВт	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	...	ΔP_n
$\alpha_{(3)}$	$\alpha_{(3)1}$	$\alpha_{(3)2}$	$\alpha_{(3)3}$	...	$\alpha_{(3)n}$

Наведено комплексну модель системи електропостачання з джерелами малої генерації, кожен з елементів якої (джерело, навантаження, розподільні мережі) представлений у вигляді залежності, що дозволяє створити модель ринку мікрогенерації, а також здійснювати контроль та аналіз параметрів окремих елементів системи електропостачання як з економічної, так і з технічної точки зору.

Модель дозволяє здійснювати завдання пошуку споживачами електроенергії від оптимальних (економічно вигідних і надійних, з точки зору споживачів) постачальників та джерел енергії.

Важливим також є застосування цієї моделі при проектуванні нових та реконструкції існуючих систем електропостачання з джерелами малої генерації, що забезпечує вже на етапі проектування оптимальну конфігурацію мережі, що враховує надійність та економічність передачі електроенергії

2.1. Комплексне моделювання електричних режимів в мережах підприємств з власною генерацією

В останні роки спостерігається зростання числа аварій з повним чи частковим порушенням електропостачання електроприймачів першої категорії надійності, включаючи особливу групу, мають місце при каскадних процесах. Дані аварії, як правило, починаються з відключення джерела

живлення в мережах зовнішнього електропостачання і завершуються наступною або одночасною нерозрахунковою та некоректною роботою обладнання систем гарантованого та безперебійного електропостачання в мережах внутрішнього електропостачання споживачів, що призводить до економічних втрат.

Потреба у моделювання таких режимів обумовлена тим, що внаслідок накопичення ефектів від малих змін, що відбуваються в ході перманентного оновлення обладнання розподільних електричних мереж, поступової зміни їх конфігурації еволюції технологій і структури електроспоживання, фактичне схемно-режимне середовище зазнало і зазнає суттєві кількісні зміни. Ці зміни полягають в появі вищих гармонійних складових в режимних параметрах, динамічної несиметрії, збільшенні швидкості і інтенсивності реакції електроустановок споживачів на збурення в електричній мережі і тому подібне. Вказане положення приводить, у підсумку, до прийняття некоректних технічних рішень по складу, кількості і алгоритмам роботи устаткування, пристроях релейного захисту і автоматики і, як наслідок, зниженню надійності електропостачання споживачів.

Крім того, стали з'являтися на підприємствах об'єкти розподіленої генерації (РГ). Об'єктами РГ є електростанції з однією або декількома генеруючими установками (ГУ), сумарною встановленою потужністю, як правило, до 25 МВт, що підключаються до мереж внутрішнього електропостачання підприємства і виконаних на базі газотурбінних (ГТУ), газопоршневих (ГПУ), або дизель-генераторних (ДГУ) генеруючих установках.

Запобігання виникненню подібних аварій, а також своєчасне виявлення фактичних причин некоректного функціонування окремих елементів систем зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємств [14], як на стадії проєктування енергооб'єкту, так і при проведенні енергетичних обстежень неможливо без комплексного математичного моделювання електричних режимів, які потрібно робити з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

За результатами енергетичних обстежень, що включають натурні випробування і виміри, та комплексного математичного моделювання електричних режимів були виявлені проблемні аспекти, що впливають на надійність електропостачання споживачів електроенергії, а саме:

- виникнення незгасаючих коливань параметрів електричного режиму унаслідок несумісності алгоритмів роботи локальних систем автоматичного регулювання (САР) активних енергетичних установок;

- асиметрія трифазної напруги і струмів, а також нелінійність навантаження, а саме, що викликають вібрацію і додатковий нагрів електричних машин;

- неуспішні пуски великих високовольтних електродвигунів в різних схемно-режимних ситуаціях;

- виникнення порушень ДГУ при ліквідації віддалених трифазних КЗ дією максимально-струмового захисту з витримкою часу при роботі в ізолюваному режимі;

- відключення ДГУ захистом від перегріву генератора з погашенням електропостачання всіх електроприймачів з причини наявності значних гармонійних спотворень в струмі навантаження;

- відмова в спрацьовуванні вбудованих захистів автоматичних вимикачів унаслідок неправильного вибору системи збудження ДГУ;

- неселективна робота автоматичних вимикачів в мережі внутрішнього електропостачання при живленні навантаження від ДГУ в ізолюваному режимі.

На рис.2.1 представлені осцилограми прямого пуску компресора кондиціонера при роботі системи внутрішнього електропостачання від ДГУ. Видно, що процес від початку і до кінця супроводжується коливаннями параметрів електричного режиму, є несиметричним і нелінійним, про що свідчить поява значного струму в робочому нейтральному дроті, що носить характер незгасаючих коливань з діапазоном від 10–15 до 50 А.

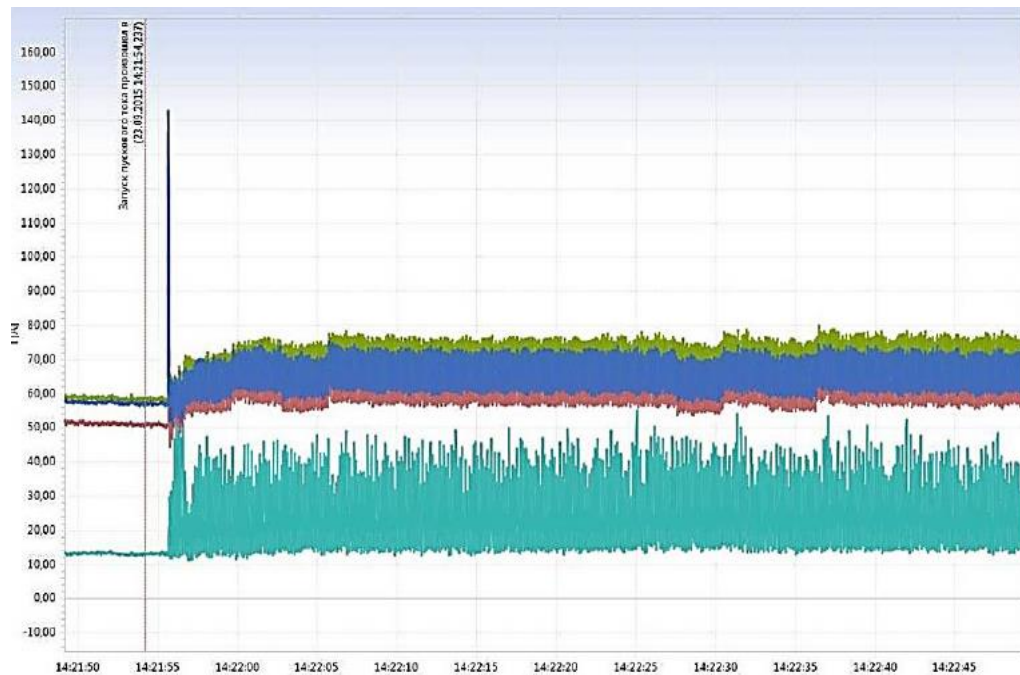


Рисунок 2.1 - Струми (фазні і в нульовому дроті) в процесі прямого пуску електричного компресора кондиціонера ($P_{ном}=10$ кВт) при роботі від ДГУ ($P_{ном}=120$ кВт)

Аналогічне явище спостерігалось в той же самий час на джерелі безперебійного живлення (ДБЖ). Взаємний аналіз струмів і напруги дозволяє визначити діапазон коливань повної потужності ДГУ, супроводжуючих роботу компресора, яка складає близько 10 кВт (100% потужності компресора).

Для запобігання виникненню описаних режимів необхідно при проектуванні або енергетичному обстеженні проводити аналіз стійкості функціонування САР активних енергетичних установок в різних схемно-режимних ситуаціях із застосуванням засобів математичного моделювання і, в разі необхідності, розробляти і реалізовувати заходи, що забезпечують їх коректну роботу [15].

Загострення проблемних аспектів з виникненням в мережах асиметрії і нелінійності навантаження почалося з широкого поширення комп'ютерної

техніки – електричних споживачів з нелінійним навантаженням [16], як це представлено на рис.2.2.

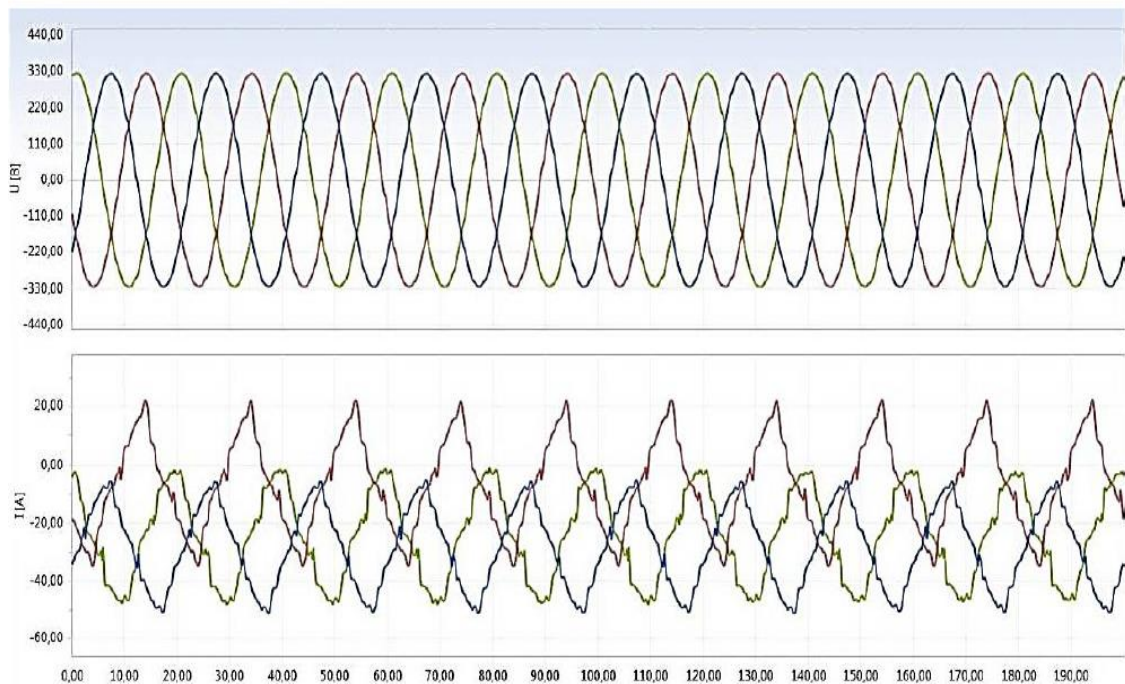


Рисунок 2.2 - Осцилограма виміряної напруги (зверху) і струмів (знизу) в електричній мережі, що живить комп'ютерну техніку

На рисунку видно, що при ідеальній формі кривої 3-фазної напруги струми в комп'ютерному навантаженні носять яскраво виражений несинусоїдальний і асиметричний характер. Нелінійність фазних струмів в 4-провідній електричній мережі, навіть в разі рівності їх значень (симетричності навантаження фаз), що діють, приводить до появи значних струмів в нейтральному дроті з амплітудою приблизно рівною амплітудам фазних струмів, але при істотно вищому діючому значенні струму в нейтралі.

Враховуючи, що нульові дроти зазвичай мають менший перетин, чим фазні, нелінійність навантаження може створювати реальну загрозу їх перегріву і навіть спалаху [17]. Факт перевантаження нейтралі може залишатися непоміченим експлуатаційним персоналом в тому випадку, якщо в мережах не застосовуються системи сигналізації і захисту, що працюють на диференціальному принципі.

В процесі обстеження було виявлено також, що успішному запуску крупних електродвигунів напругою 6 кВ можуть передувати декілька неуспіхів, що підсилює ризики відключення генераторів на об'єкті РГ із-за виникаючих провалів напруги і сприяє прискореному зносу устаткування, по якому протікають пускові струми.

На рис.2.3 представлені фактичні виміряні профілі провалу діючого значення лінійної напруги на шинах 6 кВ.

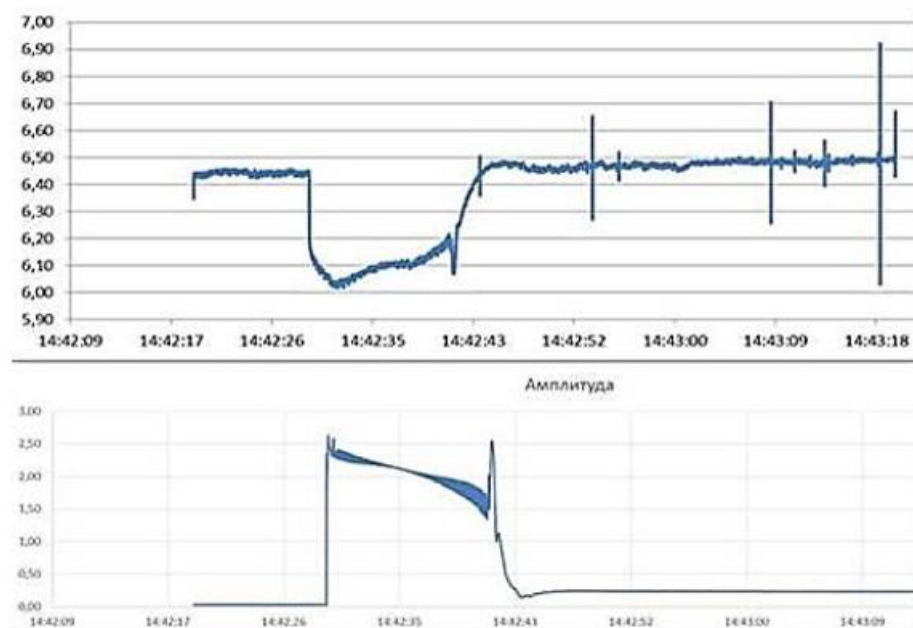


Рисунок 2.3 - Профілі провалу лінійної напруги на шинах 6 кВ (зверху) і сплеску струму (знизу) при пуску електродвигуна

З даної причини на підприємстві введена заборона на самозапуск великих відповідальних електродвигунів, хоча, якщо забезпечити прийнятні умови, самозапуск міг би бути у край корисний для запобігання зупинці основного виробничого процесу при провалах напруги, навіть при роботі об'єкту РГ в острівному режимі. Ефективно протидіяти динамічним провалам напруги можна за рахунок вживання динамічних компенсаторів реактивної потужності.

Виявлений ризик порушення електропостачання споживачів унаслідок внесення ДБЖ максимально можливих спотворень в показники якості

електроенергії в мережі внутрішнього електропостачання при живленні від ДГУ, оскільки фактичне завантаження ДБЖ, як правило, не перевищує 30%. На рис.2.4 представлена залежність коефіцієнта гармонійних спотворень по струму (THDi) або «коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму» від завантаження ДБЖ.

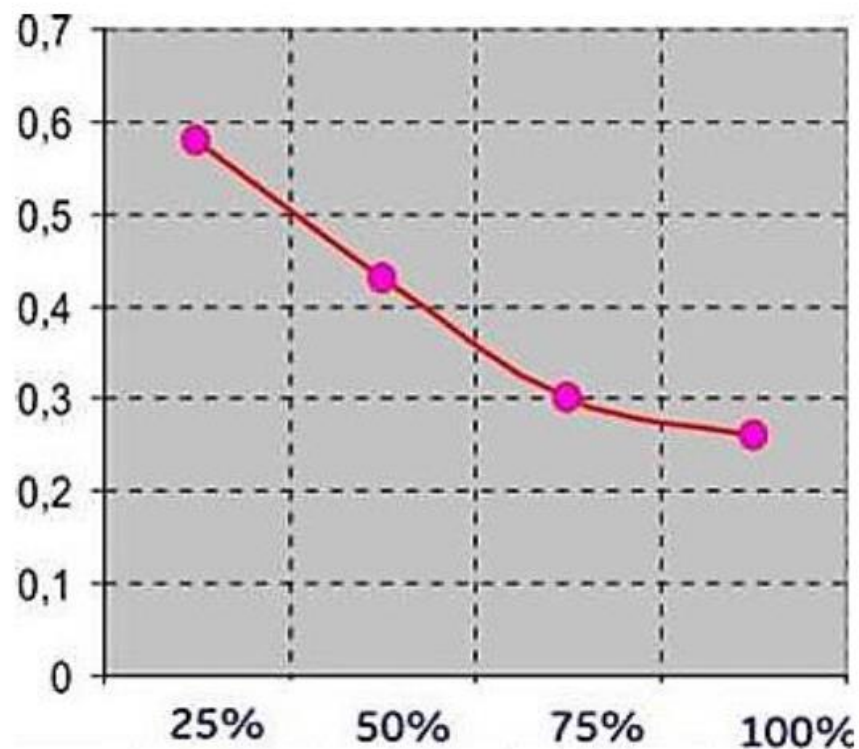


Рисунок 2.4 - Залежність величини THDi від завантаження ДБЖ (%)

Впровадження об'єктів РГ в схеми внутрішнього електропостачання вимагає виконання всього комплексу розрахунків електричних режимів (сталих, струмів короткого замикання, електромеханічних перехідних процесів, показників якості електроенергії), як це прийнято для мереж високої напруги.

Понизити вірогідність виникнення аварій з порушенням електропостачання споживачів можливо лише за рахунок комплексного підходу до рішення виявлених при обстеженні проблемних аспектів засобом реалізації намічених організаційних і технічних заходів.

2.2. Оцінка надійності зовнішнього електропостачання мереж 6 (10) кВ з джерелами розподіленої генерації

Зростання числа джерел малої генерації приводить до створення систем електропостачання з активними споживачами і появи ринку малої генерації. Вже зараз ведуться дослідження по створенню моделі ринку мікрогенерації.

Для того, щоб дані системи надійно і економічно функціонували, необхідно вже на етапі проектування визначати їх оптимальну конфігурацію і необхідність підключення до зовнішньої мережі.

У даній роботі представлений метод, що забезпечує оптимальну конфігурацію мережі для досягнення мінімальних втрат потужності в мережі. Цей розділ присвячений пошуку найкращого варіанта підключення до зовнішнього джерела системи електропостачання 6-10 кВ з джерелами малої генерації, враховуючи при цьому надійність і економічність електропостачання.

Одним з критеріїв вибору оптимальної точки підключення до зовнішньої мережі є мінімум збитку від перерви електропостачання. Як вже наголошувалося вище, точками підключення для розподільних мереж 6-10 кВ є головні знижувальні підстанції.

Таким чином, необхідно здійснити оцінку економічного збитку від перерви електропостачання схем розподільних пристроїв головних знижувальних підстанцій. Крім того, при розрахунках необхідно враховувати наявність резервного джерела.

Якщо в системі електропостачання відсутнє резервне джерело – виникає збиток Z_1 , величина якого визначатиметься збитком від недовідпустки електроенергії постачальником електроенергії і збитком, що виникає у споживачів, за наявності підприємств в системі електропостачання:

$$Y_1 = \beta_1 P_{\text{спож}} T_{\text{в}} + y_0 P_{\text{спож}} T_{\text{в}} \quad (3.1)$$

де β_1 – тариф на електроенергію основного джерела, грн./кВт·г; $P_{\text{спож}}$ – потужність споживачів, кВт; T_v – річна тривалість аварійних відключень, г; y_0 – питомий збиток споживачів, грн/кВт·г.

Якщо в системі електропостачання є резервні джерела, що повністю покривають навантаження споживачів, то збиток Y_2 визначається додатковими витратами, що виникають унаслідок зміни тарифу і втрат електроенергії в розподільних мережах при підключенні до резервного зовнішнього джерела:

$$Y_2 = (\beta_2 - \beta_1) P_{\text{потр}} T_v + (\beta_2 \Delta W_{\text{ИП(рез)}} - \beta_1 \Delta W_1),$$

де Y_2 – тариф на електроенергію резервних джерел, грн/кВт·г; $\Delta W_{\text{ИП(рез)}}$ – втрати електроенергії в лініях електропередачі при передачі потужності від резервного джерела за час T_v , МВт·г; ΔW_1 – втрати електроенергії в лініях електропередачі при передачі потужності від даного джерела за час T_v , кВт·г.

Як приклад приведена структурна схема «Дві робочі системи шин», яка представлена на рис.2.5. Для елементів схем розподільних пристроїв введені умовні позначення елементів: W – повітряна лінія електропередачі, QS – роз'єднувач, TA – трансформатор струму, TV – трансформатор напруги, Q – вимикач, RU – обмежувач перенапруги, T – силовий трансформатор.

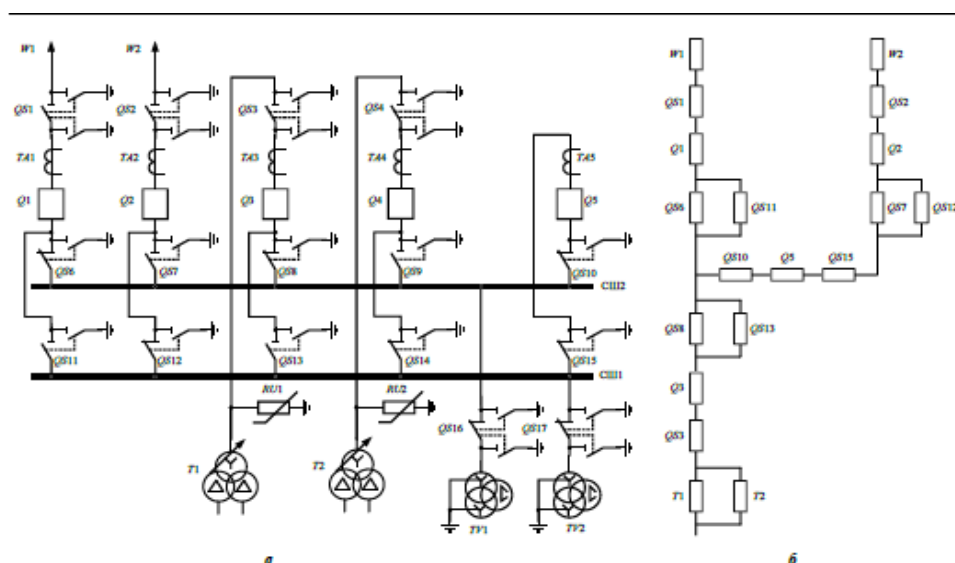


Рисунок 2.5 - Дві робочі системи шин - схема: а – однолінійна схема; б – структурна схема надійності

При складанні схеми було враховано, що необхідна установка на кожному приєднанні другого шинного роз'єднувача, що дозволяє підвищити надійність всіх приєднань. Резервування живильних ліній здійснюється за рахунок урахування надійності інших ліній та елементів шиноз'єднувального вимикача. Також враховано резервування трансформаторів.

Логічне з'єднання елементів структурної схеми надійності для схеми РП «Дві робочі системи шин» має такий вигляд:

$$(C) - (QS \parallel QS) - Q - QS - (T1 \parallel T2);$$

$$C = (W1 - QS - Q - (QS \parallel QS)) \parallel$$

$$\parallel (W2 - QS - Q - (QS \parallel QS) - QS - Q - QS).$$

На підставі розробленого програмного забезпечення та алгоритму оцінки надійності на прикладі схеми з двома робочими системами шин та схеми з двома робочими та обхідною системами шин здійснений розрахунок основних показників надійності при умові встановлення трансформаторів різної потужності.

Результати розрахунку наведено у табл.2.5.

Таблиця 2.5 - Типові значення показників надійності для схеми 13Н-110/220

Номер схеми	Параметри надійності	Потужність трансформатора, більше 80 МВА
13-110	$\Omega_{\text{ЕКВ}}, 1/p$ $K_{\text{ВЕКВ}}$ $T_{\text{В}_{\text{ЕКВ}}}, Г$	1,3314 53,768 40,3838
13Н - 110	$\Omega_{\text{ЕКВ}}, 1/p$	1,6038

	$K_{\text{ВЕКВ}}$	54,2176
	$T_{\text{в екв, г}}$	33,8045
13 -220	$\Omega_{\text{ЕКВ, 1/р}}$	0,39
	$K_{\text{ВЕКВ}}$	7,8231
	$T_{\text{в екв, г}}$	20,0566

Отримані значення можуть бути використані при оцінці надійності схеми розподільних мереж, враховуючи при цьому надійність схеми розподільного пристрою. Крім того, на підставі даних значень можна визначити величини економічного збитку для заданої системи електропостачання.

У роботі пропонується підхід щодо оцінки збитків від перерви електропостачання зовнішнього джерела розподільних мереж 6-10 кВ. Розроблений алгоритм дозволяє визначати збитки від перерви електропостачання для можливих варіантів конфігурації мережі: без додаткового резервування системи електропостачання; з повним або частковим резервуванням потужності від зовнішнього джерела.

З метою пошуку тривалості відновлення створені алгоритми оцінки структурної надійності можливих схем розподільчих пристроїв головних знижувальних підстанцій, що враховують надійність розподільних пристроїв високої та низької напруги, а також основних елементів підстанції: ліній живлення ВН і СН, роз'єднувачів, вимикачів та силових трансформаторів.

Це дослідження дозволить здійснити розробку алгоритму пошуку оптимальної точки підключення до зовнішньої мережі з урахуванням фактору надійності, а також визначити необхідність зовнішнього електропостачання в умовах аналізованої системи електропостачання з джерелами малої генерації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Розроблено комплексну модель системи електропостачання з джерелами малої генерації, кожен з елементів якої (джерело, навантаження, розподільні мережі) представлений у вигляді залежності, що дозволяє створити модель ринку мікро генерації, а також здійснювати контроль та аналіз параметрів окремих елементів системи електропостачання як з економічної, так і з технічної точки зору.

Модель дозволяє здійснювати завдання пошуку споживачами електроенергії від оптимальних (економічно вигідних і надійних, з точки зору споживачів) постачальників та джерел енергії.

Важливим також є застосування цієї моделі при проєктуванні нових та реконструкції існуючих систем електропостачання з джерелами малої генерації, що забезпечує вже на етапі проєктування оптимальну конфігурацію мережі, що враховує надійність та економічність передачі електроенергії.

Оцінений вплив об'єктів РГ в схеми внутрішнього електропостачання, що вимагає виконання всього комплексу розрахунків електричних режимів (сталих, струмів короткого замикання, електромеханічних перехідних процесів, показників якості електроенергії), як це прийнято для мереж високої напруги.

Понизити вірогідність виникнення аварій з порушенням електропостачання споживачів можливо лише за рахунок комплексного підходу до рішення виявлених при обстеженні проблемних аспектів засобом реалізації намічених організаційних і технічних заходів.

У розділі пропонується підхід щодо оцінки збитків від перерви електропостачання зовнішнього джерела розподільних мереж 6-10 кВ. Розроблений алгоритм дозволяє визначати збитки від перерви електропостачання для можливих варіантів конфігурації мережі: без додаткового резервування системи електропостачання; з повним або частковим резервуванням потужності від зовнішнього джерела.

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

У децентралізованих системах джерела РГ переважно застосовуються для електропостачання лише прилеглих (власних) споживачів. Багато енергоустановок працюють з частковим завантаженням, оскільки надлишки генерації не можуть бути корисно використані. З цієї ж причини розробки, спрямовані на підвищення ККД та поліпшення параметрів окремих енергоустановок, виявляються не досить результативними.

Для децентралізованих систем електропостачання (ДСЕ) актуальним є розвиток принципово нових напрямків, що поєднують останні досягнення в електротехніці, електроніці, ІТ-технологіях та системах управління. Нові розробки можуть бути дорогі та складні у реалізації. Однак у перспективі на 10-15 років наперед їх використання дозволить здійснювати електропостачання енергетично віддалених споживачів на якісно новому рівні, забезпечить конкурентоспроможність вітчизняної малої енергетики та зробить цю галузь привабливою для інвесторів, що стане драйвером продовження розвитку. Таким напрямом є так звані «віртуальні електростанції» (ViEC).

Під ViEC розуміють інтелектуальну, керовану мікро мережу, що об'єднує джерела РГ, накопичувачі електроенергії та регульовані споживачі шляхом обміну інформацією та потоками електроенергії [19,20]. Особливістю ViEC є можливість передачі надлишків власної генерації сусіднім об'єктам та можливість взаємодії кількох джерел РГ як єдиного генеруючого об'єкта з більшою енергосистемою.

В даний час дослідженнями технологій ViEC займаються вчені всіх розвинутих країн світу. Як правило, найбільша увага приділяється системам управління та механізмам продажу/купівлі електроенергії. Однак не менш важливим є рішення технічних питань об'єднання кількох ДСЕ в єдину

електричну мережу, зокрема, актуальний вибір оптимальної топології такої електричної мережі.

Для створення методологічної бази об'єднання ДСЕ в єдину електричну мережу можуть бути адаптовані методи, що широко використовуються при проєктуванні традиційних енергосистем високої напруги. Так, складна структура електричної мережі, що об'єднує кілька ДСЕ, може бути представлена у вигляді графів [21]. Приклад графа електричної мережі, що об'єднує три ДСЕ, наведено на рис.3.1.

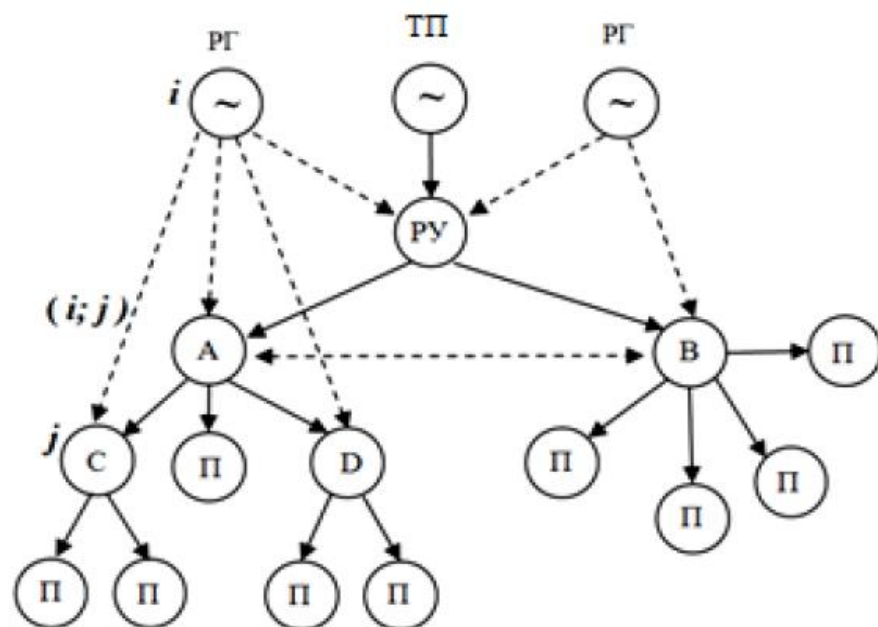


Рисунок 3.1 - Приклад графа електричної мережі, що об'єднує ДСЕ:

i, j - вузли графа; $(i ; j)$ - гілка графа між i -й і j -й вершинами

Вузлами графа є компоненти ДСЕ: розподільні пристрої (РП), розграничні пункти (А-Д), джерела (РГ, ТП) та споживачі електроенергії (П). Вузли характеризуються потужністю джерел та навантаження. Гілки графа – лінії електропередачі.

Гілки характеризуються напрямом передачі потужності, питомим опором, протяжністю, витратами передачі електроенергії. Пунктирними

лініями на рис.3.1 показані всі можливі варіанти об'єднання вузлів ДСЕ з джерелами живлення та споживачами електроенергії.

При об'єднанні ДСЕ спочатку слід встановити свідомо недоцільні або малоефективні шляхи передачі електроенергії. Це проводиться шляхом оцінки гілок та вузлів графа за низкою обмежуючих критеріїв. Для вузлів обов'язковим є оцінка відхилення напруги. Гілки графа можна оцінити за низкою критеріїв:

- пропускна здатність ЛЕП;
- найбільшій доцільній відстані передачі потужності з урахуванням втрат;
- найбільшій доцільній відстані передачі потужності з урахуванням економічних витрат;
- іншим критеріям.

Для вибору остаточної топології електричної мережі запропоновано порівнювати можливі топології (можливі графи) щодо їх структурно-топологічних властивостей. Для цього визначено перелік структурно-топологічних характеристик, розрахунок яких слід проводити для кожного графа:

- зв'язність структури z (чим вище значення пов'язаності, тим більше потенційно більше надійною є топологія електричної мережі);
- структурна надмірність R (найекономічніша топологія повинна мати міні-кількість надлишкових електричних зв'язків);
- нерівномірність розподілу зв'язків ε_2 (характеризує недовикористання можливостей заданої топології у досягненні максимальної зв'язності);
- структурна компактність Q (чим менше Q , тим менше зв'язків, що розділяють, у топології, і тим самим топологія більш компактна);
- ступінь централізації у структурі δ (високе значення δ пред'являє підвищені вимоги до пропускної спроможності центрального елемента в топології електричної мережі).

Сукупний облік всіх структурно-топологічних характеристик запропоновано здійснювати за допомогою інтегрального показника оцінки порівнюваних топологій за допомогою методу зважених сум критеріїв [21,22] за виразом:

$$K_j = \sum_{i=1}^M k_i P_{ij}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N,$$

де N - кількість порівнюваних топологій; M – кількість порівнюваних структурно-топологічних характеристик; P_{ij} - наведена оцінка i-ї характеристики j-ї топології; k_i – середньозважений коефіцієнт цінності i-ї характеристики, який визначається за допомогою методу зважених сум критеріїв.

З точки зору структурно-топологічного аналізу найбільш оптимальної топології електричної мережі відповідатиме максимальне значення критерію K_j .

Функціонування електричної мережі, що об'єднує ДСЕ, спрямоване на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання всього потенціалу розподіленої генерації. Тому як критерій, що дозволяє оцінити правильність вибору тієї чи іншої топології електричної мережі, може бути використана величина «звільненої» потужності. Під «звільненою» потужністю слід розуміти потужність джерел живлення, яка після об'єднання ДСЕ може бути корисно використана в цій електричній мережі (для живлення нових споживачів) або передана в іншу електричну мережу (за наявності такої можливості). Для наведеного на рис.3.1 графа «звільнена» потужність може бути розрахована за виразом:

$$P_{\text{осв}} = P_{\text{ТП}}^{\text{до}} - P_{\text{ТП}}^{\text{после}} = \sum_{i=1}^m (P_{\Gamma i} - \Delta P_{\Gamma i}) = \sum_{i=1}^m \left(P_{\Gamma i} - \frac{P_{\Gamma i}^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \sum_{j=1}^k (r_{0j} \cdot l_j) \right),$$

де $P_{ТП\ до}$, $P_{ТП\ після}$ - потужність, що споживається від ТП до і після об'єднання ДСЕ в електричну мережу; m – кількість вузлів із надлишком генерації; $P_{Гі}$ - надмірна потужність i -го вузла електричної мережі; $\Delta P_{Гі}$ – втрати при передачі потужності від i -го вузла з надмірною генерацією.

Найбільшої ефективності буде досягнуто при максимальному значенні даного критерію, коли вся потужність, вироблена джерелами РГ, буде використана споживачами або передана через ТП в іншу електричну мережу.

Наведені результати дослідження електричної мережі, що об'єднує децентралізовані системи електропостачання з використанням технологій «віртуальної електростанції». Розглянуто питання визначення оптимальної топології такої електричної мережі. Основна ідея полягає в оцінці ефективності та надійності топології електричної мережі за допомогою структурно-топологічного аналізу її графа. Сукупний облік структурно-топологічних характеристик графа (зв'язок структури, структурна надмірність та ін.) запропоновано здійснювати за допомогою інтегрального показника оцінки методом виважених сум критеріїв.

3.1. Автономні енергокомплекси, гібридні конструкції із застосуванням поновлюваних джерел енергії

Автоматичне секціонування та резервування розподільчих електричних мереж 10 кВ носить обмежений характер [9].

Тому електричні мережі сільській місцевості мають нижчу надійність електропостачання приєднаних до них споживачів проти мережами інших рівнів напруги. У умовах актуальною є завдання підвищення надійності розподільних електричних мереж 10 кВ за її реконструкції та технічному переозброєнні з мінімізацією витрат за здійснення цих заходів. При цьому необхідно враховувати, що надійність розподільних електричних мереж досягається не тільки використанням сучасних конструктивних рішень, наприклад, використання високонадійних ізольованих проводів СІП-3, але й

можливостями управління нею в ремонтних режимах і в режимах, що настають після виникнення стійких пошкоджень, що може бути досягнуто застосуванням автоматичного секціонування та резервування ПЛ 10 кВ.

При будівництві об'єкта, застосування альтернативних джерел вимагатиме певних витрат, особливо в тому випадку, якщо ці джерела будуть основними. Проте зрозуміло, що використання енергії сонця навіть в обмеженій кількості дозволить скоротити експлуатаційні витрати, а також підвищити надійність енергопостачання. Пропонується розглянути варіант застосування альтернативного джерела – встановлення сонячних панелей. В автономному енергокомплексі найбільш універсальним рішенням може бути варіант "Автономний SG2", а в енергокомплексі з використанням промислової або локальної електромережі - варіант "Мережевий MS2". Для їх реалізації буде потрібна мінімальна кількість коштів, що витрачаються, проте через те, що основним джерелом електроенергії є електроагрегат або мережа, а не сонячна батарея, експлуатаційні витрати не будуть мінімальними. Надалі, у міру накопичення досвіду використання гібридних систем, накопичення коштів експлуатуючими організаціями, можна буде збільшувати потужності сонячних батарей, а також включати до складу генеруючого обладнання (ГО) вітрогенераторні установки (ВГУ). При цьому при розробці енергокомплексів їх конструкції має бути врахована можливість подальшої установки додаткового ГО.

Прикладом такого комплексу може бути ЕНЕРГО-К14/2М5.2.G60-2,5, розроблений для розміщення технологічного обладнання та автономного електроживлення об'єктів радіорелейної лінії зв'язку протягом 12 міс. без дозаправки та технічного обслуговування при середньорічному навантаженні від 2,5 кВт. Зовнішній вигляд енергокомплексу представлений на рис.3.2.



Рисунок 3.2 – Автономний енергокомплекс

Після аналізу та реалізації вимог споживача в результаті проектування вийшов автономний енергокомплекс, в якому основним первинним джерелом електроенергії є електроагрегати, а сонячної електростанції (СЕС) відведено роль додаткового джерела енергії. При введення енергокомплексу в експлуатацію через віддаленість об'єкта не забезпечується щорічна доставка необхідного запасу палива для роботи виробу на розрахункове навантаження, у зв'язку з цим було обмежено навантаження до величини, яка вдвічі менша за розрахункову. В результаті енергокомплекс типу «Автономний SG2» наближений до типу «Автономний SG1». Для виведення роботи енергокомплексу на розрахункове навантаження виконано проєкт на встановлення додаткових сонячних панелей з урахуванням щорічної витрати палива. Це дозволяє говорити про переваги використання поновлюваних джерел енергії та відчувати ефект від впровадження альтернативної енергетики.

При проектуванні енергокомплексів з використанням відновлюваних джерел електроенергії найбільші труднощі викликає підбір БЕУ. З упевненістю можна сказати, що правильні розрахунки та підбір БЕУ можливі тільки за наявності статистичних даних за вітровими характеристиками

конкретної території, де передбачається застосування ВЕУ, у період тривалістю щонайменше 1 г.

Набагато простіше вирішуються проблеми при проектуванні гібридних енергокомплексів із застосуванням СЕС.

Один із прикладів комплексного рішення енергопостачання автономного об'єкта з використанням гібридної електроустановки, СЕС та ВЕУ типу «Мережевий MGWS1» показано на рис.3.3. Сьогодні важко знайти достатнє матеріальне забезпечення для розвитку альтернативної енергетики на невеликих автономних об'єктах, тому пропонується розглянути наступний варіант комплектації під час будівництва об'єкта:

- енергокомплекс у блок-контейнері ЕНЕРГО-К6 із встановленим у ньому обладнанням запасом потужності для розвитку енергокомплексу та з розміщеним на конструкції контейнера максимальною кількістю сонячних панелей (24 шт. 4,3 кВт);
- доповнення енергокомплексу батареєю з 48 панелей (по 8,6 кВт), розміщених на уніфікованих блоках із контейнерних металоконструкцій;
- після проведення моніторингу вітрової активності протягом 1–2 років, встановлення вітрогенератора або додаткової сонячної батареї.

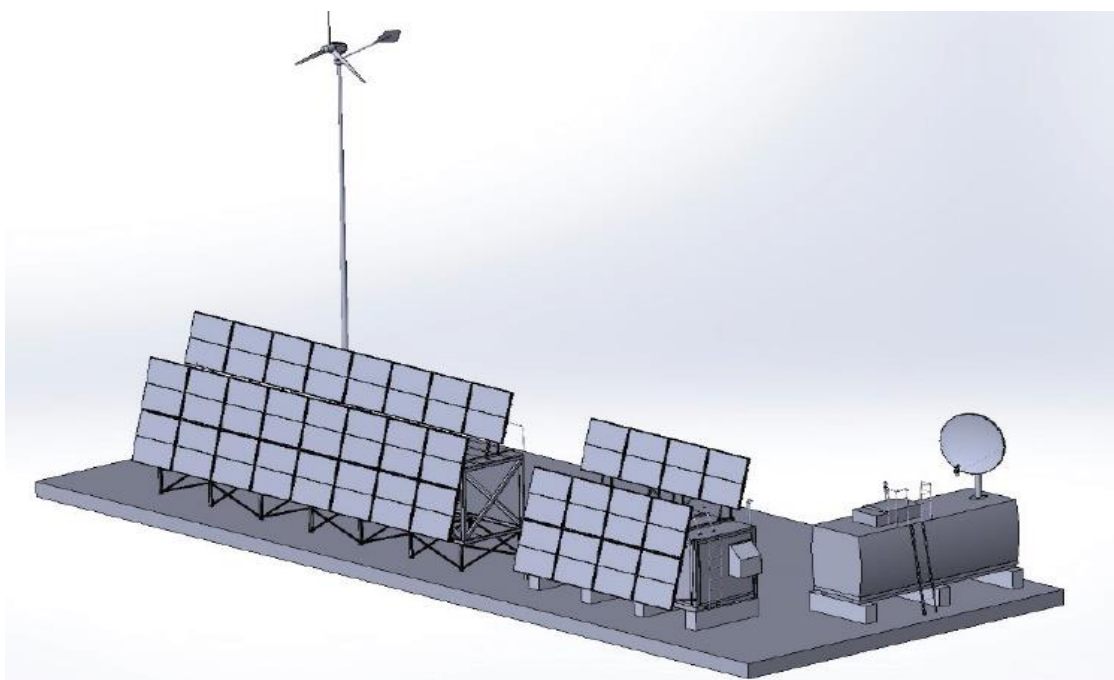


Рисунок 3.3 - Приклад комплексного рішення енергопостачання автономного об'єкта з використанням гібридної електроустановки, СЕС та ВЕУ

Проаналізувавши роботу автономних енергокомплексів та можливість подальшого їх досконалості з урахуванням досліджень з вивчення попиту на подібну продукцію, можна зробити наступні висновки:

1) автономні енергокомплекси, подібні до вищеописаних, мають стійкий попит у різних галузях економіки України. Найбільшу увагу привертають автономні енергокомплекси, що застосовуються на об'єктах із відсутністю централізованого енергопостачання. Проте збільшується інтерес до проблеми скорочення витрат на оплату електроенергії;

2) найбільшого поширення набули автономні гібридні електроустановки, до складу яких входять сонячні батареї. Причинами цього є недолік вибору ВЕУ і відсутність актуальних кадастрів вітрової активності.

3.2. Підвищення ефективності електричних мереж 6 – 35 кВ

Підвищення ефективності розподілених електричних мереж напругою 6-35 кВ є важливим завданням для забезпечення надійності енергопостачання та зниження експлуатаційних витрат. Одним із ключових напрямків у цьому процесі є впровадження сучасних технологій автоматизації та цифровізації, що дозволяють підвищити рівень моніторингу та управління мережею. Системи автоматичного обліку електроенергії, датчики стану обладнання та інтелектуальні пристрої дозволяють швидко реагувати на аварійні ситуації та оптимізувати режими роботи мережі.

Також важливим фактором є зменшення технологічних втрат електроенергії. Це досягається завдяки модернізації обладнання, такому як трансформатори з підвищеною енергоефективністю та проводи з меншими втратами на нагрів. Оптимізація режимів роботи мережі, включаючи

регулювання напруги та перерозподіл навантаження, сприяє більш раціональному використанню енергетичних ресурсів.

Розвиток розподіленої генерації, зокрема інтеграція відновлюваних джерел енергії, відкриває нові можливості для підвищення ефективності мереж. Однак це вимагає впровадження засобів координації та управління, які забезпечують стабільність системи в умовах змінних потоків потужності. Важливу роль у цьому відіграють програмно-апаратні комплекси, здатні прогнозувати навантаження та адаптувати роботу мережі до реальних умов.

Підвищення ефективності неможливе без удосконалення систем захисту та ізоляції, які забезпечують безперебійність роботи навіть у складних умовах. Крім того, впровадження нових стандартів надійності й екологічності сприяє довготривалій експлуатації мереж із мінімальним впливом на довкілля.

Системний підхід до оптимізації розподілених мереж передбачає використання математичних моделей і методів аналізу, які дозволяють визначати найефективніші шляхи модернізації. Поєднання інноваційних рішень, технічного переоснащення та управлінських підходів створює умови для підвищення енергоефективності, економічності та стійкості розподілених мереж напругою 6-35 кВ.

На рис.3.4 проілюстрований концептуальний підхід до розподіленої мережі 6-35 кВ. Він підкреслює сучасні технології, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, систем зберігання, ілюстровані потоки енергії та індикатори ефективності.

Децентралізація енергетичних мереж напругою 6-35 кВ є також одним із ключових напрямків підвищення їх ефективності. Вона передбачає перехід від централізованого управління до інтеграції розподілених джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, і локальних систем зберігання енергії. Це дозволяє зменшити навантаження на центральні вузли, покращити гнучкість мережі та скоротити втрати під час передачі електроенергії. Завдяки децентралізації споживачі можуть не лише використовувати електроенергію, але й виробляти її, утворюючи енергетичні мікромережі, які взаємодіють із

загальною системою. Такий підхід сприяє створенню більш стійкої, ефективної та адаптивної енергетичної інфраструктури.



Рисунок 3.4 – Концептуальний підхід до розподіленої мережі 6 – 35 кВ

3.3. Принципи створення систем електропостачання з локальними джерелами енергії

Наразі в Україні переважає модель централізованої генерації електроенергії, що характеризується такими основними особливостями:

- Функціонування великих електростанцій із встановленою потужністю від 500 до 6000 МВт, які забезпечують основну частину виробництва електроенергії.

- Передача значних обсягів електроенергії через магістральні мережі високої напруги на великі відстані, що дозволяє охоплювати широкі регіони.

- Використання потужних вузлових підстанцій, які виконують функцію перерозподілу електроенергії між різними районами споживання.

Ця модель є ефективною для забезпечення централізованого енергопостачання, однак вона має низку викликів, пов'язаних із втратами під час транспортування енергії, залежністю від великих енергооб'єктів та обмеженими можливостями інтеграції розподілених джерел енергії..

Сьогодні енергетична система України здебільшого побудована на принципах централізованої генерації електроенергії. Її основними характеристиками є:

- Експлуатація великих електростанцій із потужністю від 500 до 6000 МВт, які забезпечують основний обсяг виробництва електроенергії в країні.
- Передача значної кількості електроенергії через високовольтні магістральні мережі на далекі відстані, що дає змогу покривати потреби віддалених регіонів.
- Застосування великих вузлових підстанцій, які виконують роль ключових об'єктів для розподілу електроенергії між споживачами в різних областях.

Цей підхід залишається основою енергетичної інфраструктури, але водночас створює певні виклики, пов'язані з оптимізацією енергетичних потоків та інтеграцією нових технологій..

Централізована модель енергопостачання демонструє високу ефективність у масштабному забезпеченні електроенергією, проте супроводжується певними труднощами. Серед них – значні втрати під час передачі енергії на великі відстані, залежність від крупних енергооб'єктів, а також обмежені можливості інтеграції децентралізованих джерел енергії.

Прикладом масштабного генераційного об'єкта є Ботієвська вітроелектростанція ДТЕК, розташована на узбережжі Азовського моря, з проектною потужністю 300–500 МВт. Це один із ключових джерел відновлюваної енергії в регіоні.

Розосереджена генерація поступово набирає обертів, сприяючи зростанню загальної потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх частки у структурі генерації. Формуються локальні системи електропостачання, де вагомую частину електроенергії виробляють ВДЕ, такі як сонячні та вітрові електростанції. Це створює дедалі більшу потребу у впровадженні систем накопичення електроенергії, які забезпечують балансування енергетичних потоків і стабільність роботи таких систем.

15 лютого 2022 року було ухвалено Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії» № 2046-IX, який вніс корективи до Закону України «Про ринок електричної енергії». Зокрема, додано новий розділ IV «Зберігання енергії» та ряд нових положень. Одним із ключових є пункт 99, що визначає «зберігання енергії» як діяльність, пов'язану з вилученням електроенергії для її зберігання в іншій формі енергії та подальшого перетворення назад в електроенергію. Така енергія може передаватися в системи передачі, розподілу, мережі електростанцій або споживачів у момент, відкладений від часу її виробництва.

Хоча українські компанії не розкривають вартості будівництва своїх систем зберігання енергії, за оцінками експертів, створення 1 МВт потужності energy storage в Україні коштує від 500 до 800 тисяч євро..

Інтелектуальні електричні системи базуються на створенні інформаційно-енергетичної структури, яка спирається на сучасні силові та інформаційні технології.

На 44-й сесії СІГРЕ було визначено основні технічні аспекти, які є ключовими для створення інтелектуальних електричних мереж. До них віднесено такі напрямки:

- Впровадження активних розподільних мереж, що забезпечують двонаправлені потоки енергії.
- Розвиток системи вимірювань та обміну інформацією для покращення моніторингу та управління.
- Використання високовольтних ліній передачі постійного струму для ефективнішого транспортування електроенергії.
- Масове впровадження систем накопичення електроенергії як необхідного елемента для стабільності мережі.
- Розробка нових концепцій систем управління та захисту, які враховують взаємодію різних типів генерацій.
- Створення інноваційних інструментів для технічної оцінки роботи електричних мереж.

Ці напрями визначають основні виклики та пріоритети для впровадження інтелектуальних мереж у сучасних енергосистемах.

Інтелектуальна електрична мережа – це система нового покоління, яка побудована на основі мультиагентного підходу для організації та управління її функціонуванням і розвитком. Така мережа забезпечує оптимальне використання ресурсів для забезпечення надійного, ефективного та високоякісного енергопостачання споживачів, застосовуючи передові технології. Вона інтегрує всі компоненти в єдину інтелектуальну ієрархічну систему управління, що дозволяє здійснювати моніторинг та коригування роботи мережі в реальному часі [24,25].

Потужні електричні станції та підстанції являють собою основу централізованих електричних систем (рис.3.5).

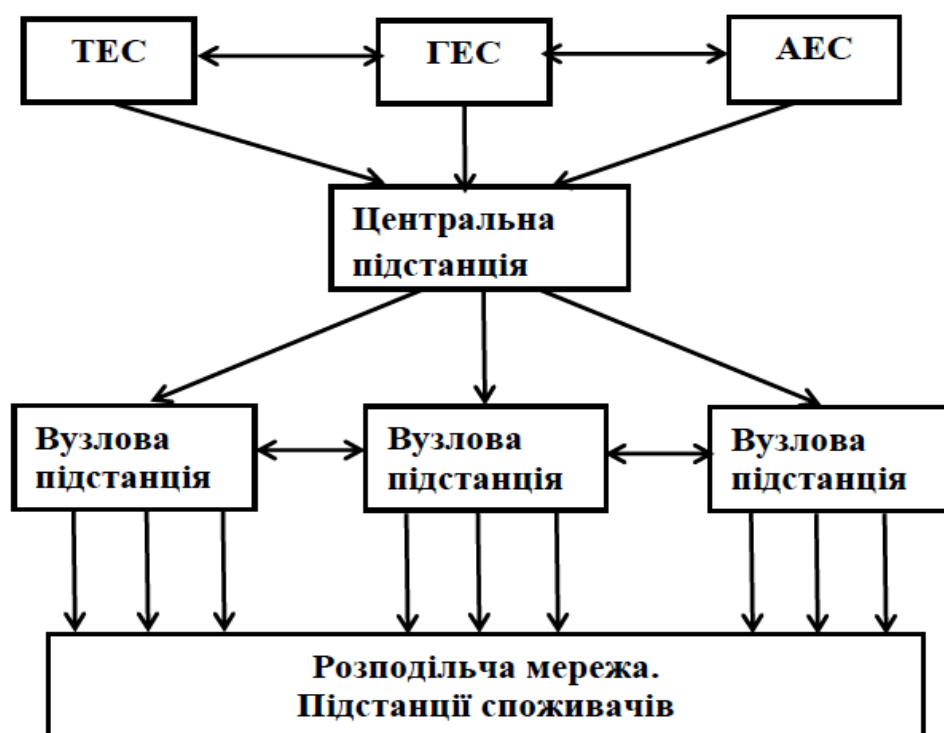


Рисунок 3.5 - Спрощена схема централізованої електричної системи

На рис.3.6 приведені варіанти розосередженої електричної системи.

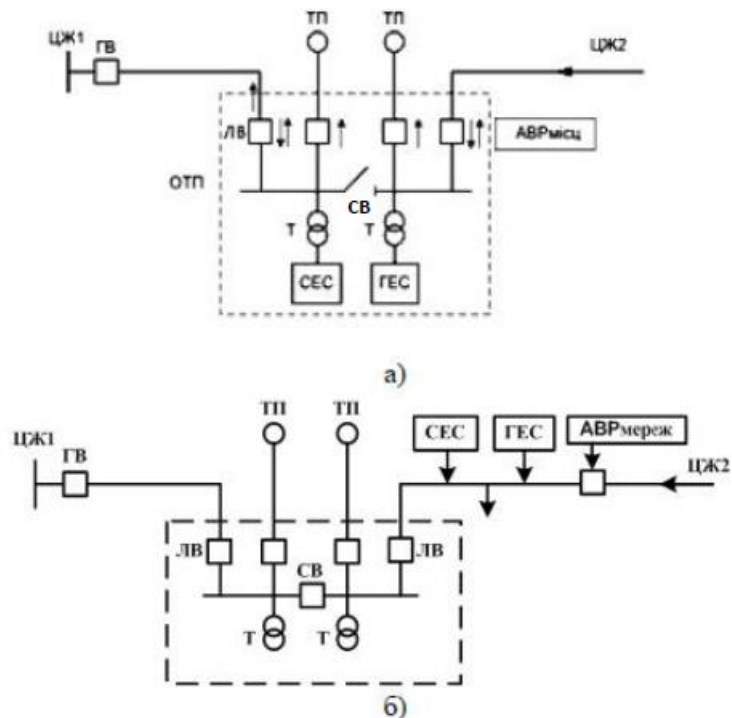


Рисунок 3.6 - Варіанти схем розосереджених локальних електричних систем з опорними трансформаторними підстанціями з місцевим а) і мережевим б) АВР

Де: ОТП- опорні трансформаторні підстанції; ЦЖ – центр живлення; ГВ, СВ, ЛВ – головний, секційний та лінійний вимикач.

Приєднання джерел ВДЕ до існуючих електричних систем виконується за різними схемами. Одним із варіантів є Mikro Grid.

Mikro Grid є електричною системою малої потужності зазвичай до 100 МВт, основою якої є джерела розосередженої генерації і навантаження. Mikro Grid може приєднуватись до централізованої енергосистеми або функціонувати в ізолюваному режимі (рис.3.7) [23].

У таблиці 3.1 приведена класифікація Mikro Grid за рівнем генерації електроенергії.

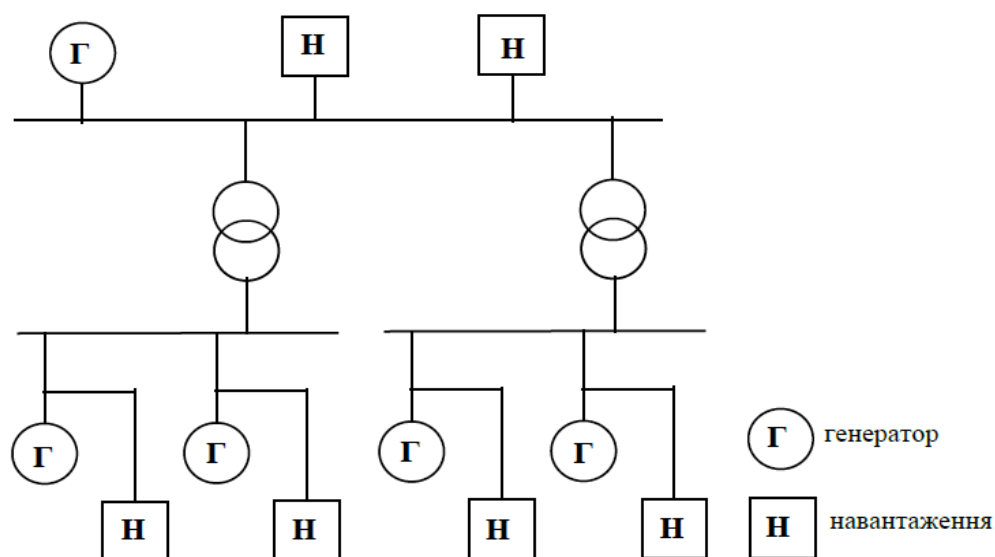


Рисунок 3.7 - Радіальна архітектура Micro Grid

Таблиця 3.1 - Класифікація Micro Grid за рівнем генерації електроенергії

№	Назва	Рівень генерації	Приклад використання розосередженої генерації	Номинальне значення напруги в системі	Типова площа, км ²
1	Системи електрифікації сільських районів	до 100 МВт	Системи генерації сільської місцевості у віддалених географічних районах	34,5 кВ	15-90
2	Підстанція	5-20 МВт > 20 МВт	Районні підстанції енергосистем з дизельними станціями	13,2 кВ	5-30
3	Об'єкт з декількома навантаженнями	< 2 МВт, 2-5 МВт	Підстанції в лікарнях, школах, готельних комплексах	4,8 кВ	1-10
4	Енергетичний вузол розосередженої генерації	До 100 кВт	Підстанції в окремих приватних будинках населених пунктів	480 В	< 0,1

У таблиці 3.2 – наведені можливі види генераторів у Micro Grid

Таблиця 3.2 – Види генераторів у Micro Grid

	Види генераторів	Потужність
1	Двигуни внутрішнього згорання	Від 10 кВт до 100 МВт
2	Газові турбіни	Від 0,5 до 50 МВт
3	Мікротурбіни	Від 20 до 500 кВт
4	Паливні елементи	Від 1 кВт до 10 МВт
5	Сонячні батареї	Від 5 Вт до 5 МВт
6	Вітрогенератори	Від 30 Вт до 10 МВт

У таблиця 3.3 приведені характеристики генераторів енергії та типи напівпровідникових перетворювачів Micro Grid

Таблиця 3.3 - Характеристики генераторів енергії та типи напівпровідникових перетворювачів Micro Grid

	Генератори енергії	Капітальні витрати, дол./кВт	Вартість електроенергії, дол./кВт	Можливе порушення вимог	Сфера використання	Тип перетворювача видів енергії	Тип перетворювача параметрів енергії
1	Двигуни внутрішнього згорання	300-900	0,07-0,15	Шум, постачання палива, викиди	Житлові, комерційні та промислові райони	Синхронний генератор	Випрямляч, безпосередній перетворювач частоти, матричний перетворювач
2	Газові турбіни	500-1000	0,05-0,15				
3	Мікротурбіни	700-1000	0,09-0,15				
4	Вітрогенератори	700-1200	0,04-0,2	Ресурсодоступність, шум, складність обслуговування	Енергетичні вузли Micro Grid за наявності накопичувача		
5	Сонячні батареї	5000-8000	0,2-0,4			Фотоелементи	Широтно-імпульсний перетворювач, інвертор
6	Паливні елементи	4000-50000	0,15	постачання палива	Житлові, комерційні та промислові райони		

Порівняння даних табл. 3.3 вказує на те, що серед найбільш розповсюджених джерел розосередженої генерації найменші капітальні витрати у вітрогенераторів, у сонячних батарей майже на порядок вище й у

паливних елементів ще більше майже на порядок. У той же час вартість електричної енергії вказаних джерел приблизно однакова.

Проектувальники та дослідники стикаються з проблемами оцінки режимів роботи складних електричних систем, визначення параметрів режиму для вибору електричного обладнання, перевірки правильності роботи релейного захисту та ін. Доволі часто останнім часом для розв'язання вказаних проблем використовують тестові схеми інституту IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Тестові схеми відрізняються кількістю вузлів, джерел живлення, конфігурацією та ін. На рис.3.8. наведено приклад тестової електричної схеми мережі IEEE з 39-ти збірних шин [23].

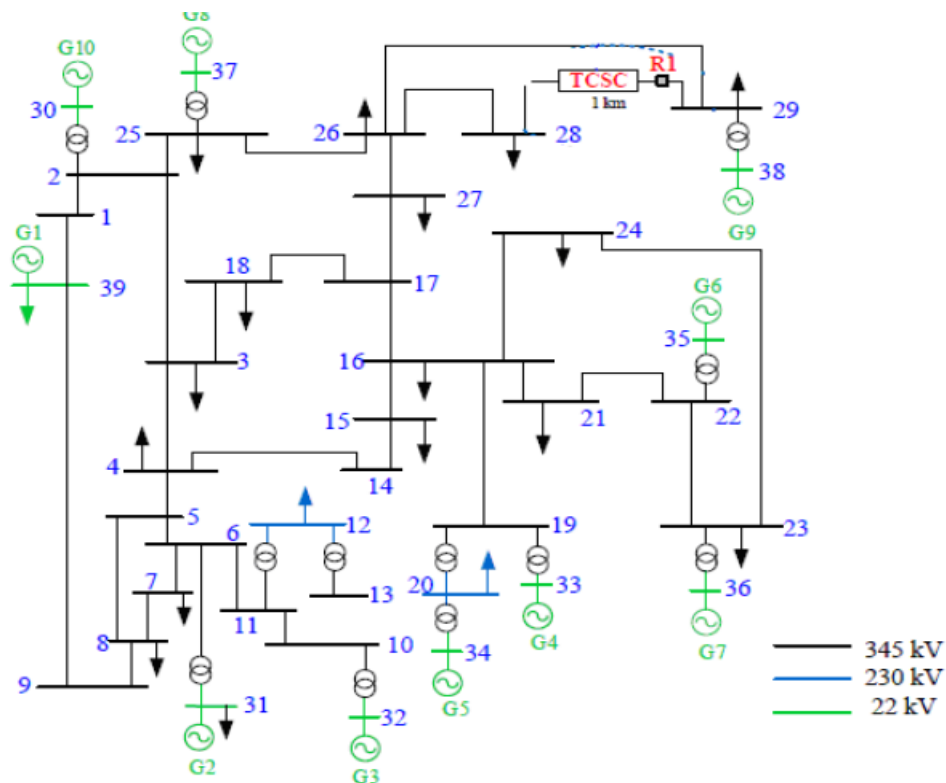


Рисунок 3.8 - Тестова електрична схема мережі системи Нової Англії
IEEE з 39-ти збірних шин

Інтелектуальні електричні мережі, побудовані на мультиагентному підході, забезпечують ефективне використання ресурсів для надійного та якісного енергопостачання, інтегруючи передові технології та єдину систему управління для оптимізації їх роботи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Наведені результати дослідження електричної мережі, що об'єднує децентралізовані системи електропостачання з використанням технологій «віртуальної електростанції». Розглянуто питання визначення оптимальної топології такої електричної мережі. Основна ідея полягає в оцінці ефективності та надійності топології електричної мережі за допомогою структурно-топологічного аналізу її графа. Сукупний облік структурно-топологічних характеристик графа (зв'язок структури, структурна надмірність та ін.) запропоновано здійснювати за допомогою інтегрального показника оцінки методом виважених сум критеріїв.

Проаналізувавши роботу автономних енергокомплексів та можливість подальшого їх досконалості з урахуванням досліджень з вивчення попиту на подібну продукцію, можна зробити наступні висновки:

1) автономні енергокомплекси, подібні до вищеописаних, мають стійкий попит у різних галузях економіки України. Найбільшу увагу привертають автономні енергокомплекси, що застосовуються на об'єктах із відсутністю централізованого енергопостачання. Проте збільшується інтерес до проблеми скорочення витрат на оплату електроенергії;

2) найбільшого поширення набули автономні гібридні енергоустановки, до складу яких входять сонячні батареї. Причинами цього є недолік вибору ВЕУ і відсутність актуальних кадастрів вітрової активності.

Розглянуті інтелектуальні електричні мережі, побудовані на мультиагентному підході, які забезпечують ефективне використання ресурсів для надійного та якісного енергопостачання, інтегруючи передові технології та єдину систему управління для оптимізації їх роботи.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розширення масштабів використання мікро мереж має гарну перспективу у зв'язку з можливостями подальшого зниження собівартості виробленої електроенергії, а також з дуже великими можливостями застосування технології електропостачання на основі мікро мереж з використанням ВДЕ для виробництва екологічно чистої сільськогосподарської продукції, потреба в якій на ринку безперервно зростає.

Серйозні перспективи мають мікро мережі для енергопостачання об'єктів малоповерхового будівництва, при створенні нових поселень.

Запропонована та розвинена концепція мікро мережі на основі переважного використання поновлюваних джерел енергії, що представляє собою нову форму реалізації ідеології розподіленої енергетики, яка відкриває можливість ефективного застосування відновлюваних джерел енергії для вирішення задачі енергопостачання віддалених, насамперед, сільських територій, малоповерхового будівництва та автономного енергопостачання окремо розташованих одиничних об'єктів.

Особливо актуальним в наш час стає розвиток і вдосконалення невеликих електростанцій на основі ВДЕ, які можуть функціонувати в комбінованих або автономних системах електропостачання. Такі системи здатні забезпечити енергонезалежність і стабільність постачання електроенергії для місцевих споживачів, зокрема у сільській місцевості.

Розроблена концепція побудови інтелектуальних електричних мереж на основі застосування мультиконтактних комутаційних систем (МКС) дозволяє вирішити значну частину проблем підключення до електричних мереж відновлюваних джерел енергії. Застосування таких МКС, дає можливість роботи мережі таким чином, що ВДЕ або малі генератори, працюють окремо від централізованої енергосистеми, хоча можлива і їхня паралельна робота з системою.

Розроблено комплексну модель системи електропостачання з джерелами малої генерації, кожен з елементів якої (джерело, навантаження, розподільні мережі) представлений у вигляді залежності, що дозволяє створити модель ринку мікро генерації, а також здійснювати контроль та аналіз параметрів окремих елементів системи електропостачання як з економічної, так і з технічної точки зору.

Модель дозволяє здійснювати завдання пошуку споживачами електроенергії від оптимальних (економічно вигідних і надійних, з точки зору споживачів) постачальників та джерел енергії.

Важливим також є застосування цієї моделі при проектуванні нових та реконструкції існуючих систем електропостачання з джерелами малої генерації, що забезпечує вже на етапі проектування оптимальну конфігурацію мережі, що враховує надійність та економічність передачі електроенергії.

Оцінений вплив об'єктів РГ в схеми внутрішнього електропостачання, що вимагає виконання всього комплексу розрахунків електричних режимів (сталих, струмів короткого замикання, електромеханічних перехідних процесів, показників якості електроенергії), як це прийнято для мереж високої напруги.

Понизити вірогідність виникнення аварій з порушенням електропостачання споживачів можливо лише за рахунок комплексного підходу до рішення виявлених при обстеженні проблемних аспектів засобом реалізації намічених організаційних і технічних заходів.

Пропонується підхід щодо оцінки збитків від перерви електропостачання зовнішнього джерела розподільних мереж 6-10 кВ. Розроблений алгоритм дозволяє визначати збитки від перерви електропостачання для можливих варіантів конфігурації мережі: без додаткового резервування системи електропостачання; з повним або частковим резервуванням потужності від зовнішнього джерела.

Наведені результати дослідження електричної мережі, що об'єднує децентралізовані системи електропостачання з використанням технологій

«віртуальної електростанції». Розглянуто питання визначення оптимальної топології такої електричної мережі. Основна ідея полягає в оцінці ефективності та надійності топології електричної мережі за допомогою структурно-топологічного аналізу її графа. Сукупний облік структурно-топологічних характеристик графа (зв'язок структури, структурна надмірність та ін.) запропоновано здійснювати за допомогою інтегрального показника оцінки методом виважених сум критеріїв.

Проаналізувавши роботу автономних енергокомплексів та можливість подальшого їх досконалість з урахуванням досліджень з вивчення попиту на подібну продукцію, можна зробити наступні висновки:

1) автономні енергокомплекси, подібні до вищеописаних, мають стійкий попит у різних галузях економіки України. Найбільшу увагу привертають автономні енергокомплекси, що застосовуються на об'єктах із відсутністю централізованого енергопостачання. Проте збільшується інтерес до проблеми скорочення витрат на оплату електроенергії;

2) найбільшого поширення набули автономні гібридні енергоустановки, до складу яких входять сонячні батареї. Причинами цього є недолік вибору ВЕУ і відсутність актуальних кадастрів вітрової активності.

Розглянуті інтелектуальні електричні мережі, побудовані на мультиагентному підході, які забезпечують ефективне використання ресурсів для надійного та якісного енергопостачання, інтегруючи передові технології та єдину систему управління для оптимізації їх роботи.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Slowe, J. Micro-CHP: Global Industry Status and Commercial Prospects // 23rd World Gas Conference (Amsterdam, 2016). – P. 9.
2. Laria A. et. al. Survey on microgrids: analysis of technical limitations to carry out new solutions // 13th European Conference on Power Electronics and Applications 2019 (EPE'19) (September 8–10, 2019). – P. 1–8.
3. Добровольська Л. Н. Проблеми надійності електропостачання сільськогосподарських об'єктів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2015. № 164. С. 56-57.
4. Bardi, U., Asmar, T. El, & Lavacchi, A. (2013). Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. Journal of cleaner production, 53, 224-231.
5. Michael T. Burr. «Reliability demands drive automation investments», Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department, Nov. 1, 2017. [Електроний ресурс]. Режим доступа: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor>.
6. Grid Modernization and the Smart Grid. [Електроний ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid>.
7. Research on distributed generation source placement /Z. Jun-fang, D. Si-min, H. Yin-li, H. Guang // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5347869 .
8. Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems /J. Baba, S. Suzuki, S. Numata, T. Yonezu // European Conference on Power Electronics and Applications. 2015. Pp. 10. doi: 10.1109/EPE.2015.219399
9. The impact of distributed generation and its parallel operation on distribution power grid / Z. Kai, L. Kexue, Y. Naipeng, J. Yuhong, L. Wenjun, Q.

Lihaan // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2015. Pp. 2041-2045. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432575.

10. Business model status of distributed power supply and its concerns in future development / Q. Zhang, J. Zhang, X. Han, X. Jin, H. Fu, T. Zang // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2017.8245542.

11. Setiawan D.K., Megantara Y., Syah B.N. Three phase inverter of UPS control system for harmonic compensator and power factor correction using modified synchronous reference frame // The Proceedings of the 2016 International Electronics Symposium (IES), 2016, Surabaya, Indonesia.

12. IEEE standard 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Date of Publication: 26 Aug. 2016.

13. Method for minimax optimization of power system operation / M. Valdm, M. Keel, O. Liik, H. Tammoja // IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. 2023. Vol. 2. Pp. 1–6. doi: 10.1109/PTC.2023.1304670

14. Gopiya, N.S. Optimal Allocation of Distributed Generation in Distribution System for Loss Reduction / N.S. Gopiya, D.K. Khatod, M.P. Sharma // IPCSIT. – 2022. – V. 28. – P. 42–46.

15. Ivanecký J. Accelerated Particle Swarm Optimization for Controlling Virtual Power Plant Consisting of Renewable Energy Sources / J. Ivanecký, D. Hropko, M. Kováč // Journal of Energy and Power Engineering. – 2018. – V. 7. – P. 1408–1414.

16. Lombardi, P. Optimal Operation of a Virtual Power Plant / P. Lombardi, M. Powalko, K. Rudion // Power & Energy Society General Meeting. – Calgary (Canada). – 2019. – P. 1–6.

17. Othman M.M. Operation of Virtual Power Plant in Unbalanced Distribution Networks / M.M. Othman, Y.G. Hegazy, A.Y. Abdelaziz // Electric Power Components and Systems. 2016.V. 44 (14). P. 1620–1630.

18. Razmjoo A., Shirmohammadi R., Davarpanah A., Pourfayaz F., Aslani A. Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation // Energy Reports. 2019. Vol. 5. Pp. 231–241. DOI: 10.1016/j.egy.2019.01.010.
19. Electricity Network Plan to Launch London's First 'Virtual Power Station'<https://www.ukpowernetworks.co.uk/internet/en/newsand-press/first-virtual-power-station.html>.
20. Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // Applied Energy. 2017. Vol. 137. P. 511–536. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.081
21. Mejorando la Eficiencia Energética de la Ciudades Inteligentes a Través del Amplio uso deDispositivos de Almacenamiento de Energía / O. Novykh, J.A. Méndez Pérez, B. González-Díaz, // IV Congreso Ciudades Inteligentes. Libro de Comunicaciones y Proyectos, 2018. P. 222–227.
22. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
23. Totally Integrated Power. Planning of Electric Power Distribution. Technical Principles. Siemens AG Energy Management Medium Voltage & Systems. Mozartstr. 31c 91052 Erlangen Germany. 2018 Siemens AG Berlin and Munich. siemens.com/
24. Abo-Hamad, G.M.; Ibrahim, D.K.; Aboul Zahab, E.; Zobaa, A.F. Dynamic Quadrilateral Characteristic-Based Distance Relays for Transmission Lines Equipped with TCSC. Energies 2021, 14, 7074. <https://doi.org/10.3390/en1421707>
25. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії // Монографія, – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 174 с.

