

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження впливу сонячних електростанцій на
рівні відхилення напруги в системі
електропостачання промислового підприємства”

Виконала здобувачка вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Юлія КОЗЛИК
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Козлик Юлії Валеріївни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження впливу сонячних електростанцій на рівні
рівнем напруги в розподільних електричних мережах відхилення напруги в
системі електропостачання промислового підприємства

Investigation of the impact of solar power plants on voltage deviations in the
power supply system of an industrial enterprise

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою дослідження
виступає розробка комплексу технічних рішень та методологічних підходів,
спрямованих на досягнення оптимального рівня енергоефективності в
системах електропостачання промислових об'єктів з інтегрованими
відновлюваними джерелами енергії.. Завдання роботи: 1. Комплексний аналіз
та визначення ключових параметрів СЕС, що функціонують у складі СЕП
підприємства. 2. Проведення фундаментального теоретичного дослідження
впливу сонячних електростанцій на режимні параметри системи
електропостачання промислових об'єктів. 3. Розробка та реалізація
комп'ютерної імітаційної моделі для дослідження режимів роботи системи
електропостачання з інтегрованою СЕС.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Аналіз сучасних тенденцій застосування відновлюваних джерел енергії в Україні</i>	<i>12.10.2024</i>	
3	<i>Розроблення комбінованої системи електропостачання підприємства</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Теоретичне сонячних електростанцій на режим роботи системи електропостачання</i>	<i>05.11. 2024</i>	
5	<i>Комп'ютерне моделювання роботи системи електропостачання з сонячною електростанцією</i>	<i>12.11. 2024</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11. 2024</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>23.11. 2024</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11. 2024</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11. 2024</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Козлик Ю.В. Дослідження впливу сонячних електростанцій на рівні відхилення напруги в системі електропостачання промислового підприємства

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024 р.

Метою дослідження виступає розробка комплексу технічних рішень та методологічних підходів, спрямованих на досягнення оптимального рівня енергоефективності в системах електропостачання промислових об'єктів з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії.

Дослідження спрямоване на вивчення та оптимізацію електроенергетичних комплексів з впровадженням альтернативних енергетичних технологій. Центральним завданням є проектування електропостачальної системи для індустріального об'єкта та формування інтегрованої електричної платформи на базі сонячних електростанцій, реалізація якої дозволить мінімізувати витрати підприємства на електроресурси.

Для електроенергетичної системи виробничого підрозділу визначено оптимальну конфігурацію сонячної електростанції: розраховано необхідну площу розміщення фотоелектричних модулів, їхню кількість та потужнісні характеристики разом з допоміжним технологічним устаткуванням.

Комп'ютерне імітаційне моделювання експлуатаційних режимів та поглиблений техніко-економічний аналіз підтвердили економічну ефективність та перспективність запропонованого рішення.

Ключові слова: сонячна електростанція, система електропостачання, відхилення напруги

THE SUMMARY

Kozlyk Yu.V. Investigation of the impact of solar power plants on voltage deviations in the power supply system of an industrial enterprise

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the study is to develop a set of technical solutions and methodological approaches aimed at achieving the optimal level of energy efficiency in power supply systems of industrial facilities with integrated renewable energy sources.

The study is aimed at studying and optimizing power complexes with the introduction of alternative energy technologies. The central task is to design a power supply system for an industrial facility and form an integrated electrical platform based on solar power plants, the implementation of which will minimize the company's costs for electricity resources.

For the power system of the production unit, the optimal configuration of the solar power plant was determined: the required area for placing photovoltaic modules, their number and power characteristics together with auxiliary technological equipment were calculated.

Computer simulation modeling of operating modes and in-depth technical and economic analysis confirmed the economic efficiency and prospects of the proposed solution.

Keywords: solar power plant, power supply system, voltage deviation

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ	14
1.1 Аналітичний огляд існуючих підходів до побудови систем електропостачання з ВДЕ.....	14
1.2 Комбіновані системи з СЕС	32
1.3 Аналіз будови та принципу роботи СЕС	35
Висновки до розділу	42
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА.....	43
2.1 Розробка структури комбінованої системи електропостачання	43
2.2 Визначення оптимального кута нахилу сонячних панелей (для умов м. Кропивницького)	44
2.3 Визначення необхідної площі сонячних панелей СЕС	49
2.4 Вибір складових компонентів комбінованої системи електропостачання з СЕС.....	52
2.4.1. Визначення оптимальних параметрів СЕС.....	52
2.4.2. Вибір інверторів.....	53
Висновки до розділу	53
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА РІВНІ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	55
3.1 Особливості експлуатації РЕМ в умовах адресного електропостачання	56
3.2 Дослідження взаємовпливу СЕС та систем електропостачання	65
3.2.1. Аналіз впливу СЕС на параметри режиму роботи РЕМ	65
3.2.2. Розрахунок складових втрат потужності, що зумовлені наявністю СЕС в системах електропостачання.....	68

3.3 Алгоритм визначення складової втрат потужності в системах електропостачання від впливу СЕС	71
3.4 Визначення оптимального місця приєднання СЕС до системи електропостачання	72
3.4.1. Визначення множини можливих місць приєднання СЕС до системи електропостачання.....	73
3.4.2. Визначення місця приєднання СЕС до системи електропостачання за результатами аналізу чутливості	81
Висновки до розділу	84
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ	86
4.1 Математична модель СЕС	86
4.2 Комп'ютерні моделі системи електропостачання з СЕС.....	91
4.3 Комп'ютерне моделювання режимів роботи системи електропостачання з СЕС.....	96
4.4 Аналіз результатів моделювання режимів роботи системи електропостачання з СЕС.....	102
Висновки до розділу	105
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	106
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть світова спільнота демонструє безпрецедентне зростання інтересу до впровадження та розвитку альтернативних енергетичних технологій, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Це зумовлено комплексом взаємопов'язаних факторів, які можна розділити на локальні та глобальні аспекти сучасного економічного розвитку.

До локальних чинників належить насамперед стрімка динаміка подорожчання традиційних енергоресурсів на світових ринках, а також нестабільність їх поставок, що створює серйозні ризики для енергетичної безпеки багатьох країн. Особливо гостро ця проблема постала після енергетичної кризи 1970-х років та продовжує загострюватися в сучасних геополітичних умовах.

Глобальні фактори охоплюють значно ширший спектр викликів. Стрімкий розвиток технологій та інновацій у сфері енергетики відкриває нові можливості для ефективного використання сонячної, вітрової, геотермальної енергії та біомаси. Важливим стимулом також виступає необхідність оптимізації структури енергетичного балансу держав, зменшення їх залежності від імпорту викопного палива.

Окремо варто відзначити екологічний аспект: забруднення довкілля традиційною енергетикою, глобальне потепління та зміна клімату змушують людство шукати більш екологічно чисті джерела енергії. За даними міжнародних організацій, енергетичний сектор відповідає приблизно за 73% глобальних викидів парникових газів, що робить перехід до ВДЕ критично важливим для досягнення цілей Паризької угоди щодо клімату.

Крім того, розвиток ВДЕ створює нові робочі місця, стимулює технологічні інновації та сприяє формуванню "зеленої" економіки. За прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), до

2050 року частка ВДЕ в світовому енергетичному балансі може досягти 90%, що дозволить значно знизити антропогенне навантаження на довкілля.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у системи електропостачання промислових об'єктів відкриває широкі перспективи для досягнення суттєвих економічних переваг та покращення екологічної ситуації. Виступаючи альтернативою традиційним викопним енергоресурсам, ВДЕ дозволяють суттєво скоротити залежність підприємств від імпортованих енергоносіїв.

Впровадження технологій відновлюваної енергетики створює потужний мультиплікативний ефект для розвитку різноманітних секторів економіки. Зокрема, це стимулює появу нових виробництв у промисловому секторі, відкриває інноваційні напрямки для аграрного бізнесу та сприяє технологічній модернізації існуючих підприємств. Важливо відзначити значний екологічний ефект - суттєве зниження емісії вуглекислого газу та інших шкідливих речовин у атмосферу.

За даними міжнародних досліджень, промислові підприємства, які впровадили ВДЕ, демонструють зниження викидів CO₂ на 40-60% порівняно з традиційними системами енергозабезпечення. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії сприяє поліпшенню якості повітря в промислових регіонах та зменшенню негативного впливу на здоров'я населення.

Однак існує ряд суттєвих бар'єрів, що стримують широкомасштабне впровадження ВДЕ в системах електропостачання промислових підприємств. Ключовими перешкодами виступають:

- значні капітальні витрати на початковому етапі впровадження технологій;
- тривалий період окупності інвестицій;
- недосконалість ринкових механізмів оцінки довгострокових переваг від використання ВДЕ;
- відсутність адекватної методології розрахунку екологічних та соціальних вигод;

- недостатній розвиток інфраструктури для ефективної інтеграції ВДЕ в існуючі енергосистеми;

Для подолання цих обмежень необхідна розробка комплексної державної політики підтримки ВДЕ, включаючи впровадження економічних стимулів, вдосконалення нормативно-правової бази та створення сприятливих умов для залучення інвестицій у розвиток "зеленої" енергетики.

Суттєвим технологічним викликом для масштабного впровадження відновлюваних джерел енергії в енергетичному секторі України залишається недостатня адаптованість наявної інфраструктури розподільчих мереж до інтеграції альтернативних джерел генерації. Особливо гостро ця проблема проявляється у контексті сонячної енергетики, яка демонструє найдинамічніший розвиток серед усіх видів ВДЕ на українських теренах.

Фотоелектричні станції характеризуються комплексним впливом на режимні параметри електромереж, що охоплює множину взаємопов'язаних факторів. Цей вплив проявляється через:

- нестабільність генерації залежно від погодних умов;
- зміну напрямків потоків потужності в мережі;
- коливання напруги в точках приєднання;
- модифікацію гармонічного складу струмів та напруг;
- вплив на системи релейного захисту та автоматики.

Ігнорування цих технічних аспектів під час проектних робіт та подальшої експлуатації електричних мереж з інтегрованими СЕС може спричинити ряд серйозних технічних проблем. Найбільш критичними наслідками такого підходу виступають:

- погіршення показників якості електричної енергії;
- зростання технологічних втрат активної потужності;
- порушення стійкості роботи мережі;
- зниження надійності електропостачання споживачів;
- передчасне зношення обладнання.

За даними досліджень, неоптимальна інтеграція СЕС може призвести до збільшення втрат електроенергії в мережах на 15-25% та відхилень напруги, що перевищують нормативні значення на 5-10%. Це особливо критично для промислових підприємств, де якість електроенергії безпосередньо впливає на технологічні процеси та якість продукції.

Тому комплексне дослідження особливостей впливу сонячних електростанцій на режимні параметри систем електропостачання промислових об'єктів набуває першочергового значення. Це дозволить розробити ефективні технічні рішення для мінімізації негативних наслідків та оптимізації режимів роботи електричних мереж з інтегрованими ВДЕ.

Актуальність даної проблематики підтверджується також міжнародним досвідом - країни з високим рівнем проникнення ВДЕ активно впроваджують інтелектуальні системи управління мережами (Smart Grid) та накопичувачі енергії для забезпечення стабільної роботи енергосистем з високою часткою відновлюваної генерації.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження виступає розробка комплексу технічних рішень та методологічних підходів, спрямованих на досягнення оптимального рівня енергоефективності в системах електропостачання промислових об'єктів з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії.

Задачі дослідження:

1. Комплексний аналіз та визначення ключових параметрів сонячних електростанцій, що функціонують у складі системи електропостачання промислового підприємства.
2. Проведення фундаментального теоретичного дослідження впливу сонячних електростанцій на режимні параметри системи електропостачання промислових об'єктів.
3. Розробка та реалізація комп'ютерної імітаційної моделі для дослідження режимів роботи системи електропостачання з інтегрованою СЕС.

Об'єктом дослідження виступає комплекс фізичних процесів та явищ, що виникають внаслідок інтеграції сонячних електростанцій у систему електропостачання та характеризують їх взаємодію з існуючою електричною мережею.

Предметом дослідження є специфічні характеристики режиму роботи системи електропостачання промислового підприємства з інтегрованими сонячними електростанціями.

Методи досліджень. Методологічна база дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні сучасних наукових підходів та інструментів, що включають: методи імітаційного моделювання, методи теорії електричних кіл, чисельні методи розв'язання задач. Інтеграція різних методів дослідження дозволяє всебічно проаналізувати взаємодію СЕС з системою електропостачання та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації їх спільної роботи.

Наукова цінність представленої роботи визначається розробкою та теоретичним обґрунтуванням інноваційної методології оптимізації інтеграції сонячних електростанцій у системи електропостачання промислових об'єктів. Ключова наукова новизна полягає у створенні комплексного підходу до визначення оптимальних точок приєднання СЕС, що забезпечує мінімізацію їх негативного впливу на режимні параметри мережі. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для подальшого розвитку методів проектування та оптимізації систем електропостачання з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії.

Практична цінність роботи реалізується через комплекс технічних рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу сонячних електростанцій на функціонування систем електропостачання промислових підприємств. Отримані результати можуть бути безпосередньо використані при проектуванні та модернізації систем електропостачання промислових підприємств з інтегрованими сонячними електростанціями.

Структура роботи: Кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 115 сторінок. Основна частина викладена на 106 сторінках друкованого тексту, містить 41 рисуноків та таблиць. Список використаних джерел містить 29 джерел та викладений на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

1.1 Аналітичний огляд існуючих підходів до побудови систем електропостачання з ВДЕ

Електроенергетика України сьогодні здебільшого спирається на централізоване постачання, яке часто не відповідає вимогам сучасного технологічного устаткування щодо якості та надійності енергозабезпечення. На відміну від розвинених країн, де перерви в електропостачанні становлять лише 0,1% від загального часу роботи, в Україні цей показник сягає приблизно 10% річного технологічного часу.

За даними фахівців галузі, у 2021 році обсяг недоотриманої споживачами електроенергії в українських системах електропостачання досяг 17,60 млн. кВт×год. Це свідчить про значні втрати як для економіки в цілому, так і для окремих споживачів.

Крім того, спостерігаються суттєві проблеми з якістю напруги. Нерідко фіксуються відхилення напруги на клеммах електроприймачів, які в 3-4 рази перевищують нормативно допустимі межі. Особливо гостро ця проблема стоїть для сільськогосподарських споживачів, які змушені працювати з електроенергією зниженої якості майже 40% від загального часу експлуатації обладнання.

Для покращення ситуації в енергетичному секторі України необхідно впроваджувати сучасні технології та модернізувати інфраструктуру. Зокрема, перспективним напрямком є розвиток розподіленої генерації та смарт-грид технологій, які дозволяють підвищити надійність і якість електропостачання.

Важливо також зазначити, що проблеми в електроенергетиці України посилилися внаслідок російської агресії, яка почалася у 2014 році і переросла

у повномасштабне вторгнення у 2022 році. Численні атаки на енергетичну інфраструктуру призвели до ще більших перебоїв у постачанні електроенергії та погіршення її якості в багатьох регіонах країни.

Рівень розвитку електроенергетичної галузі дійсно є одним з ключових індикаторів науково-технічного поступу країни. Масштаби генерації електричної енергії непрямо відображають економічний потенціал держави та ступінь її господарського розвитку.

Глобальне споживання енергоресурсів демонструє стійку тенденцію до зростання. Серед найбільших споживачів електроенергії виділяються:

1. США - 24,6%
2. Росія - 11,3%
3. Китай - 10%
4. Німеччина (ФРН) - 7,2%
5. Японія - 2,5%

Цікаво відзначити, що енергоспоживання України, яке становить приблизно 3%, є співставним з показниками таких розвинених країн, як Великобританія, Канада, Франція, а також з показником Індії - країни, що стрімко розвивається.[1].

Енергетичний сектор України характеризується значною неефективністю використання ресурсів. Експерти виділяють низку ключових факторів, що призводять до такої ситуації:

1. Домінування енергоємних виробництв у структурі промисловості.
2. Застаріла технічна база підприємств, розрахована на епоху дешевих енергоносіїв.
3. Брак культури енергозбереження серед населення та бізнесу.
4. Суттєві втрати енергії під час її транспортування через зношеність інфраструктури.

Порівняння з окремими державами демонструє ще більший контраст. За ефективністю використання умовного нафтового палива Україна відстає від:

- Польщі - у 2,4 рази;
- Словаччини - у 1,95 рази;
- Угорщини - у 2,9 рази;
- Франції - у 3,1 рази;
- Італії - у 4,3 рази.

Особливо тривожним є той факт, що показники енергоефективності України поступаються навіть великим країнам, що розвиваються, таким як Китай, Індія та Бразилія.

Для подолання цих викликів Україні необхідно розробити та впровадити комплексну стратегію підвищення енергоефективності, яка охоплюватиме всі сектори економіки. Це дозволить не лише зменшити енергоємність ВВП, але й підвищити конкурентоспроможність української продукції, покращити екологічну ситуацію та зміцнити енергетичну безпеку країни.

Альтернативні енергетичні ресурси представляють собою природні резерви субстанцій та матеріалів, придатних для генерації енергії нестандартними методами.

Нетрадиційні джерела мають ряд переваг: вони є відновлюваними, мають менший вплив на довкілля порівняно з викопним паливом, та сприяють енергетичній незалежності країн.

Навколишнє середовище постійно генерує потоки відновлюваної енергії, і сучасна енергетика, що базується на альтернативних джерелах, повинна фокусуватися на ефективному використанні наявних природних ресурсів, а не прагнути створювати нові. Ключовим завданням перед впровадженням технологій на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є точна оцінка потенціалу цих ресурсів. Важливо зазначити, що розвиток

енергетики на базі ВДЕ повинен ґрунтуватися на ретельному аналізі існуючих ресурсів, а не на створенні нових.

Енергоспоживання характеризується значними часовими флуктуаціями. Зокрема, попит на електроенергію сягає піку вранці та ввечері, тоді як вночі спостерігається мінімальне навантаження на енергосистему. Традиційні теплові електростанції (ТЕС) мають змогу адаптуватися до цих коливань попиту шляхом регулювання обсягу спалюваного палива.

Що стосується якості джерела енергії, її можна визначити як частку енергії, яка може бути ефективно перетворена в корисну механічну роботу.

Класифікація ВДЕ за якістю енергії дозволяє розділити їх на три основні категорії:

1. Джерела механічної енергії: Ця група включає гідроенергетику, вітроенергетику, хвильову та приливну енергетику. Їх особливістю є безпосереднє перетворення кінетичної енергії природних потоків у механічну роботу.
 - Вітрова енергія: Якість складає близько 30%.
 - Гідроенергія: Має якість близько 60%.
 - Хвильова і приливна енергія: Досягає якості 75%.
2. Теплові ВДЕ: До цієї групи належать біопаливо та теплова енергія сонця. Ці джерела характеризуються термодинамічними обмеженнями при перетворенні тепла в механічну роботу.
 - Біопаливо: Включає тверду біомасу, біогаз та рідке біопаливо. Ефективність перетворення тепла в механічну роботу становить близько 50%.
 - Сонячна теплова енергія: Використовується в сонячних колекторах для нагріву води та в концентрованих сонячних електростанціях. Для парових турбін, що працюють на сонячному теплі, ефективність досягає 35%.

3. Джерела енергії на основі фотонних процесів: Ця група охоплює технології, що базуються на фотосинтезі та фотоелектричних явищах.

- Фотоелектричні перетворювачі: Сонячні панелі з ККД 15% вважаються ефективними для комерційного використання.

Відновлювані та традиційні енергетичні ресурси суттєво відрізняються за характеристиками щільності енергетичного потоку. Альтернативні джерела енергії зазвичай мають початкову густину потоку близько 1 кіловата на квадратний метр. Натомість, невідновлювані ресурси демонструють значно вищі показники - на декілька порядків більші. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) досягають оптимальної ефективності при великомасштабних установках. Проте, розподіл виробленої ними енергії вимагає значних інвестицій у інфраструктуру. З іншого боку, невідновлювані ресурси проявляють високу ефективність навіть при невеликих потужностях окремих установок.

Різноманітність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) підкреслює відсутність універсального рішення в енергетиці. Ефективне планування енергетичних систем на базі ВДЕ вимагає комплексного підходу, що враховує як особливості навколишнього середовища, так і специфіку енергоспоживання конкретного регіону.

Важливо підкреслити, що не існує універсального методу планування енергетики на ВДЕ, який би підходив для всіх країн чи навіть регіонів однієї країни. Кожен випадок вимагає індивідуального підходу, що враховує локальні особливості, ресурси та потреби.

Прийняття рішень щодо впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) базується на ґрунтовному аналізі довготривалих спостережень за екологічними умовами конкретної місцевості. Цей процес моніторингу є критично важливим для збору всебічної інформації, необхідної для проектування ефективних енергетичних систем на базі ВДЕ.

Важливо підкреслити, що процес оцінки потенціалу ВДЕ є комплексним завданням, яке вимагає значних людських та матеріальних ресурсів. Проте, ретельний моніторинг та аналіз даних є ключовим фактором для успішного впровадження відновлюваної енергетики, мінімізації ризиків та максимізації ефективності енергетичних систем на базі ВДЕ.

Розвиток технологій моніторингу та аналізу даних про ВДЕ є важливим напрямком наукових досліджень, який може значно підвищити точність оцінок та ефективність планування в галузі відновлюваної енергетики.

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у енергетичній галузі призводить до суттєвих соціально-економічних змін, серед яких особливо помітне переформатування демографічної картини регіонів. Одним з ключових наслідків є децентралізація населення. Це зумовлено специфікою ВДЕ: енергетичні потоки характеризуються низькою щільністю та просторовою дисперсією.

Україна володіє вражаючими можливостями для впровадження та розширення сектору відновлюваної енергетики. Це твердження справедливе і щодо інших альтернативних та конвенційних енергоресурсів, серед яких варто виокремити метан вугільних пластів, торф'яні родовища, поклади бурого вугілля, а також енергетичний потенціал комунальних і виробничих стічних вод. Кожен регіон нашої держави має свої унікальні перспективи для освоєння нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ).

Однак, незважаючи на ухвалення численних законодавчих актів, державних програм, нормативних документів та інших регуляторних ініціатив, процес впровадження НВДЕ в Україні відбувається незадовільно повільними темпами. Внесок цих джерел до загального енергетичного балансу країни залишається мізерним.

Існує чимало факторів, що зумовлюють поточну ситуацію. Ключовими серед них є брак ефективних економічних стимулів для переходу на відновлювані джерела енергії (ВДЕ), формальність законодавчих актів без

конкретних механізмів реалізації, а також недостатня виконавча дисципліна на всіх рівнях. Не можна стверджувати, що Україна цілком ігнорує цю проблему, проте вжиті заходи виявляються недостатніми для протидії негативним тенденціям. Серед них - глобальне підвищення вартості енергоресурсів, зростання енергетичної залежності держави та посилення екологічного навантаження.

Ігноруючи впровадження інноваційних джерел відновлюваної енергії та нехтуючи інвестиціями в передові технології, держава ризикує законсервувати своє технологічне відставання. Така бездіяльність може поставити під загрозу шанси країни на повноцінну інтеграцію до європейської спільноти.

Ряд чинників стимулює розвиток невичерпних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) в Україні. Серед ключових факторів варто виділити:

- динаміка цін на традиційні енергоресурси;
- посилення екологічних вимог;
- фінансові інструменти Кіотського протоколу;
- перспективи євроінтеграції;
- модернізація застарілої інфраструктури.

Україна має значний потенціал для розвитку різноманітних видів невичерпних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ). Серед найперспективніших напрямків, які можуть успішно розвиватися вже зараз, варто виділити біоенергетику, малу гідроенергетику, вітроенергетику, сонячна енергетика, геотермальна енергетика.

Окрім цього, варто звернути увагу на використання низькопотенційної енергії довкілля, перетвореної на високопотенційну за допомогою теплових насосів. Ця технологія може значно підвищити енергоефективність у комунальному секторі та промисловості.

У довгостроковій перспективі Україна має шанс стати лідером у сфері водневої енергетики. Ця галузь розглядається світовою спільнотою як основа

майбутньої технологічної революції. Варто зазначити, що українські науковці вже мають вагомий напрацювання в цій сфері, що створює міцну основу для подальшого розвитку.

Глобальна практика демонструє, що численні держави та регіони успішно вирішують енергетичні виклики, спираючись на розвиток відновлюваної енергетики. Для стимулювання широкого впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) ці країни запроваджують законодавчо закріплені преференції для генераторів "зеленої" енергії. Однак, ключовим фактором тріумфу відновлюваної енергетики є її конкурентоспроможність порівняно з більш традиційними на сьогодні установками, що працюють на викопному паливі.

Отже, світовий досвід показує, що комбінація законодавчої підтримки та технологічного прогресу робить відновлювану енергетику все більш конкурентоспроможною та привабливою альтернативою традиційній енергетиці. Це створює сприятливі умови для подальшого розвитку та впровадження ВДЕ у глобальному масштабі.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) демонструють низку суттєвих переваг порівняно з традиційними енергоресурсами на основі органічного палива. Ключовими аспектами їхньої привабливості є фактично невичерпні запаси, широка доступність багатьох видів, відсутність необхідності в паливі для генерації енергії та мінімальний вплив на довкілля через відсутність шкідливих викидів.

Проте, ВДЕ мають певні обмеження. Зокрема, вони зазвичай потребують значних початкових інвестицій. Крім того, їхня частка у загальному енерговиробництві України залишається незначною, за винятком гідроелектростанцій, які вже тривалий час є важливою складовою енергетичного комплексу країни.

З огляду на механізм трансформації первинних джерел енергії в електричну та її подальше використання, доцільно класифікувати

відновлювану енергетику на дві категорії: автономну та інтегровану до масштабної електроенергетичної мережі. У випадку автономних систем, баланс енергії в децентралізованій мережі електропостачання визначається взаємозв'язком між графіком споживання електроенергії та динамікою потенціалу відновлюваного енергоресурсу.

Вищезгадані обставини зумовлюють потребу в гармонізації роботи установок відновлюваної енергетики з потребами споживачів. Процес такої гармонізації передбачає вирішення низки ключових завдань:

1. Оптимізація використання відновлюваних джерел енергії.
2. Балансування виробництва та споживання електроенергії.
3. Управління режимами роботи та якістю електроенергії.

Для вирішення зазначених завдань використовується широкий спектр схемних рішень для енергоустановок. (рис. 1.1).

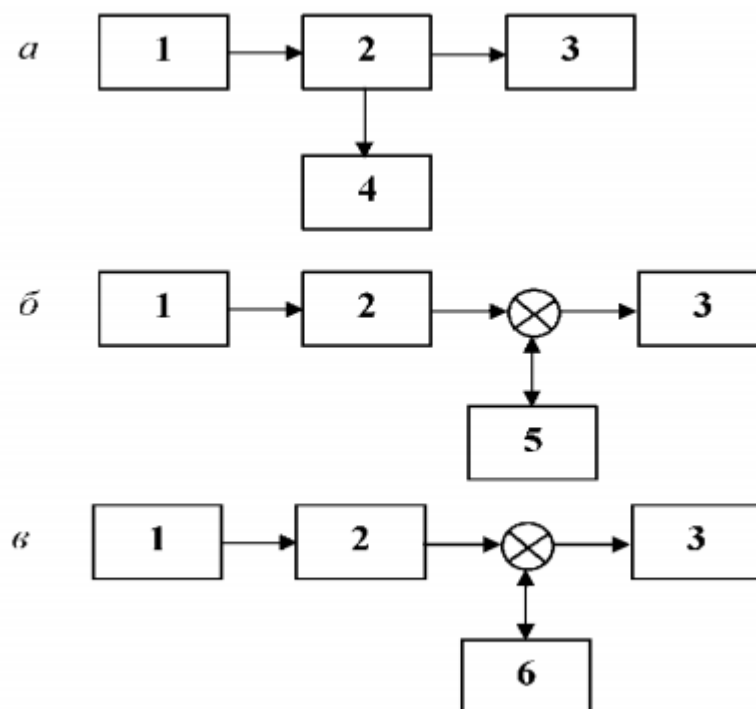


Рис. 1.1. Структурні схеми, що ілюструють механізм узгодження ВДЕ зі споживачами електроенергії.

Система скидання надлишків енергії (рис. 1.1-а). Метод узгодження потужності між відновлюваними джерелами енергії та споживачами, що передбачає скидання надлишкової енергії, вирізняється своєю винятковою простотою. Суть цього підходу полягає у використанні лише тієї частки потенціалу первинного енергоносія, яка необхідна для забезпечення поточних потреб споживача. При цьому надлишкова енергія від відновлюваного джерела залишається невикористаною. Такий принцип роботи знайшов широке застосування у різноманітних енергетичних системах. Зокрема, його можна спостерігати у функціонуванні гідроелектростанцій, де надлишок води скидається через водоскиди. Аналогічно, вітроелектростанції зі змінним кроком лопатей регулюють кут атаки для оптимізації виробництва енергії відповідно до потреб. У системах сонячного опалення керовані заслінки дозволяють контролювати кількість сонячного випромінювання, що надходить до колекторів.

Системи з акумулюванням енергії (рис. 1.1-б). Коли первинне джерело енергії генерує надлишок потужності відносно поточних потреб, цей надлишок можна зберігати для подальшого використання. Це особливо актуально в періоди, коли потенціал відновлюваного ресурсу недостатній для забезпечення наявного навантаження. Для акумулювання енергії застосовують різноманітні технології: від гідроакумулюючих електростанцій до інерційних накопичувачів та хімічних батарей.

Гідроакумулюючі системи працюють за принципом накачування води у верхній резервуар під час надлишку енергії та її спуску через турбіни при потребі. Маховики зберігають кінетичну енергію обертання, яку можна швидко перетворити назад в електричну. Акумуляторні батареї, особливо літій-іонні, стали популярними завдяки високій щільності енергії та тривалому терміну служби.

Системи з контролем навантаження (рис. 1.1-в). Забезпечують максимальну утилізацію первинного енергоресурсу шляхом динамічного

управління потужністю, що споживається. Цей підхід дозволяє ефективно використовувати всю доступну енергію, адаптуючись до змін у її виробництві.

Процес регулювання навантаження зазвичай відбувається автоматично за допомогою сучасних напівпровідникових систем автобаласту. Ці інтелектуальні пристрої здатні миттєво перерозподіляти енергію між різними споживачами залежно від їх пріоритетності та поточної доступності енергоресурсу. В якості баластних навантажень низького пріоритету часто використовуються теплові пристрої

Варто підкреслити, що системи з регулюванням навантаження мають додаткові переваги, які виходять за межі оптимального використання первинного енергоресурсу. Ці інноваційні рішення надають можливість ефективно контролювати режим роботи первинного перетворювача енергії, а також, у певних випадках, управляти характеристиками вихідної напруги.

Електрогенеруючі об'єкти, які функціонують на основі відновлюваних джерел енергії та підключені до централізованої мережі, можуть обійтися без накопичувачів електроенергії та резервних систем. Розвинена енергосистема спроможна повноцінно інтегрувати весь обсяг виробленої такими станціями електроенергії. Більше того, потужна мережа має можливість ефективно регулювати режими роботи електростанцій, які синхронізовані з нею.

Зазначені характеристики певною мірою спрощують конструкцію та знижують вартість установок відновлюваної енергетики, інтегрованих у мережу, порівняно з їхніми автономними аналогами. Однак, зростання частки потужностей на основі відновлюваних джерел у загальній структурі енергосистеми породжує виклики, подібні до тих, що виникають при балансуванні автономних систем.

Зокрема, постає завдання оптимізації розподілу навантаження між традиційними тепловими електростанціями та об'єктами відновлюваної

енергетики. Метою такого перерозподілу є мінімізація споживання викопного палива при збереженні стабільності енергопостачання.

В зв'язку з цим принципово можливе використання електростанцій на основі відновлюваних джерел енергії в трьох основних режимах електропостачання: автономному, вибіркового і паралельному.

Електростанції, що функціонують на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), демонструють значну гнучкість у застосуванні. Їх експлуатація можлива в трьох ключових режимах електропостачання, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування:

1. Автономний режим: У цьому випадку електростанція на основі ВДЕ працює незалежно від централізованої енергомережі. Вона самостійно забезпечує енергопостачання локальних споживачів.
2. Вибірковий режим: При такому підході станція на ВДЕ може функціонувати як автономно, так і в синхронізації з загальною енергосистемою, залежно від поточних умов та потреб.
3. Паралельний режим: У цьому випадку електростанція на ВДЕ постійно працює синхронно з централізованою енергомережею, доповнюючи її потужності.

Автономний режим часто застосовується у віддалених або ізольованих регіонах, де підключення до централізованої мережі економічно недоцільне або технічно неможливе. Цей режим вимагає наявності систем накопичення енергії (наприклад, акумуляторних батарей) та резервних джерел живлення для забезпечення стабільного електропостачання при змінній генерації ВДЕ.

Вибірковий режим є особливо корисним у регіонах з нестабільним електропостачанням. Він дозволяє перемикатися між автономною роботою та синхронізацією з мережею, забезпечуючи безперервне електропостачання. Цей режим вимагає складних систем управління та комутації.

Паралельний режим найбільш поширений у розвинених енергосистемах. Він дозволяє максимально ефективно використовувати

потенціал ВДЕ, при цьому забезпечуючи стабільність електропостачання за рахунок балансування з традиційними джерелами енергії.

Характерні особливості функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та специфіка графіків електричного навантаження унеможливають їх автономне застосування без належних резервних систем. Без такого резервування ВДЕ не спроможні гарантувати стабільне та безперервне постачання електроенергії споживачам. Враховуючи методи забезпечення резерву, ВДЕ можна класифікувати на дві основні категорії:

1. ВДЕ з резервуванням від централізованої енергосистеми
2. ВДЕ з власними системами акумуляції енергії

При виборі конфігурації та схем відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) для трансформації альтернативної енергії в електричну, ключовими аспектами для розгляду виступають:

1. Характеристики генерованої електроенергії:
 - змінна напруга з варіативною або сталою частотою;
 - постійна напруга.
2. Специфіка використання виробленої енергії:
 - застосування акумуляторних систем;
 - альтернативні методи накопичення енергії;
 - інтеграція з мережею змінного струму енергосистеми.

Сучасні технології пропонують широкий спектр рішень для конвертації різних видів енергії в електричну. Серед них:

- фотоелектричні системи, що перетворюють сонячне випромінювання напругу в постійний струм;
- вітрогенератори з постійними магнітами, які виробляють електроенергію постійного струму;
- турбогенератори на основі асинхронних або синхронних машин, що генерують змінний струм.

Прогрес у галузі акумулювання енергії, зокрема вдосконалення літій-іонних систем, інноваційних проточних батарей та передових водневих паливних елементів, створює перспективні умови для оптимізації застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх безперебійного впровадження у наявні енергетичні мережі.

На даний момент в Україні електропостачання переважно забезпечується єдиною енергетичною системою (ЄЕС) країни. Виробництво електроенергії здійснюється здебільшого за допомогою усталених методів генерації. Однак, протягом останнього десятиліття спостерігається стрімке зростання використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). ВДЕ можуть функціонувати як самостійні установки для вироблення електроенергії, так і в поєднанні з класичними способами генерації. Це дозволяє створювати гібридні системи, які поєднують переваги обох підходів.

У глобальному масштабі, витрати на генерацію електрики з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вже наблизилися до рівня традиційних методів виробництва. Зокрема, електроенергія з малих гідроелектростанцій (міні- та мікро-ГЕС) демонструє нижчу собівартість порівняно з конвенційними джерелами. Вартість кіловат-годин, отриманих за допомогою вітрових турбін, майже зрівнялася з показниками найефективніших традиційних систем - газотурбінних установок комбінованого циклу.

Однак, незважаючи на значний прогрес, фотоелектричні сонячні станції все ще генерують енергію, яка в 4-5 разів дорожча за традиційну. Втім, експерти прогнозують, що завдяки стрімкому технологічному розвитку та масштабуванню виробництва, ціна на "зелену" електрику може зрівнятися з традиційними джерелами вже протягом наступного десятиліття.

Варто зауважити, що вартість електроенергії з традиційних джерел має тенденцію до зростання. Це зумовлено кількома факторами: старінням обладнання теплових та атомних електростанцій, збільшенням витрат на його

обслуговування та ремонт, а також подорожчанням паливних ресурсів, які використовуються для генерації.

Розглянемо функціонування вітрових електричних станцій (ВЕС) як важливого компонента сучасних комбінованих систем електропостачання:

ВЕС – це інноваційні установки, що ефективно трансформують кінетичну енергію повітряних мас в електрику. Цей процес відбувається у два етапи: спочатку енергія вітру перетворюється на механічну енергію обертання ротора, а потім - на електричну.

Сучасні вітрогенератори вражають своєю потужністю та ефективністю. Їх потужність варіюється від компактних 5 кВт моделей до промислових гігантів на 4500 кВт. Завдяки технологічному прогресу, новітні установки здатні генерувати електроенергію навіть при слабкому вітрі швидкістю від 4 м/с.

ВЕС можуть успішно інтегруватися в приватні незалежні електростанції. Це відкриває можливість для власників не лише забезпечувати власні потреби, але й продавати надлишок енергії державі за вигідним "зеленим тарифом".

Особливо цінними ВЕС стають для віддалених та ізольованих об'єктів, забезпечуючи їх автономним та надійним джерелом енергії. Це вирішує проблему енергопостачання в місцях, де підключення до централізованої мережі ускладнене або економічно недоцільне.

Принцип роботи ВЕС базується на взаємодії вітру з лопатями турбіни. Потік повітря, проходячи через турбіну, змушує її обертатися. На валу турбіни виникає механічна енергія, пропорційна силі вітру - чим потужніший вітер, тим більше енергії генерується.

Далі енергія передається по валу ротора. У деяких конструкціях використовується мультиплікатор для збільшення швидкості обертання. Однак, варто зазначити, що більш ефективними вважаються конструкції без

мультиплікатора. Це пояснюється тим, що відсутність додаткового механізму зменшує втрати енергії та підвищує загальну ефективність системи.

Завершальним етапом є робота генератора, який перетворює механічну енергію обертання в електричну.

Для кращого розуміння структури автономної ВЕС, розглянемо її схематичне зображення на рис. 1.2. Ця схема наочно демонструє взаємозв'язок між різними компонентами системи та допомагає зрозуміти послідовність перетворення енергії.

Важливо додати, що сучасні ВЕС часто оснащуються передовими системами керування та моніторингу. Вони дозволяють оптимізувати роботу установки залежно від погодних умов, забезпечуючи максимальну ефективність використання вітрової енергії.

Крім того, розвиток технологій акумулювання енергії значно підвищив практичність ВЕС. Інтеграція високоємнісних батарей дозволяє зберігати надлишок енергії, виробленої в періоди сильного вітру, для використання в безвітряну погоду.

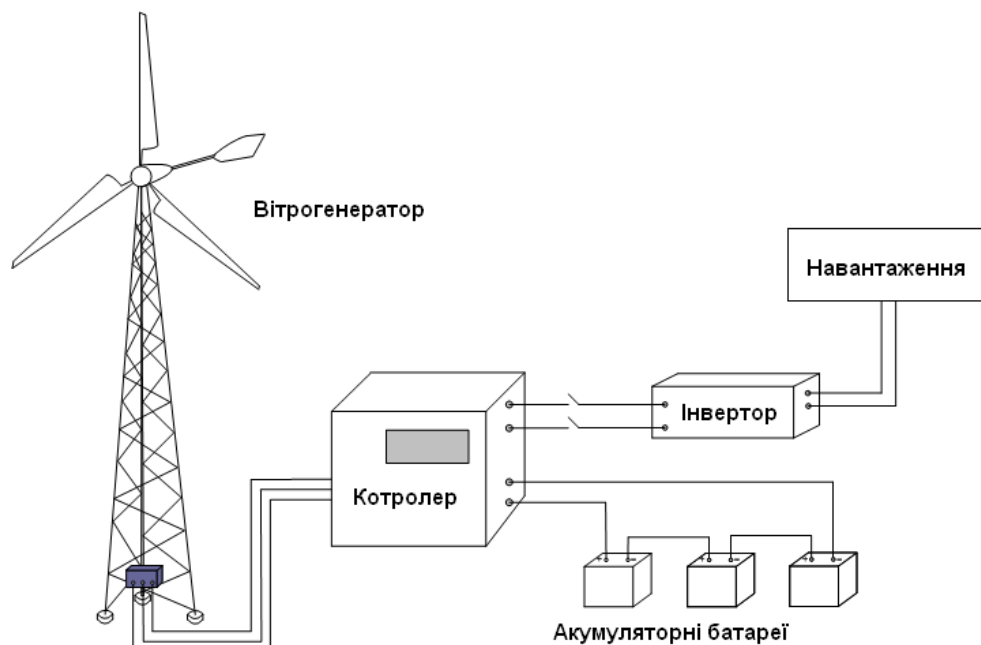


Рис.1.2. Схема автономної ВЕС

Переваги ВЕС:

- невичерпність ресурсу;
- екологічність;
- гнучкість розміщення;
- ефективне використання земельних ресурсів;
- економічна вигода;
- енергетична незалежність;
- масштабованість;
- створення робочих місць.

Недоліки ВЕС:

- акустичне забруднення
- висока початкова вартість
- тривалий період окупності
- нестабільність генерації
- вплив на екосистему
- візуальне забруднення
- обмеження по швидкості вітру
- потреба в резервних джерелах
- складність транспортування.

Функціонування фотоелектричних модулів базується на феномені внутрішнього фотоефекту. Коли світло падає на напівпровідникові матеріали, воно генерує вільні носії заряду – позитивно заряджені "дірки" та негативно заряджені електрони. Ці носії починають рухатися впорядковано під впливом електричних полів, створюючи постійний електричний струм.

Операційний принцип такої станції наступний: за ясної погоди будівля отримує електроенергію безпосередньо від фотоелектричних панелей. У цей період лічильник електроенергії не реєструє споживання з централізованої мережі, оскільки воно призупиняється. Однак, коли рівень освітленості стає

недостатнім для генерації необхідної кількості струму, відновлюється споживання з загальної електромережі.

Автоматичне перемикання між різними джерелами енергії в автономній системі забезпечується мережевим інвертором. Головне завдання інвертора полягає у трансформації постійного струму, що генерується фотоелектричними панелями, у змінний струм, який використовується в побутових та промислових електромережах. При цьому вихідний струм має відповідати стандартним параметрам мережі, зокрема за частотою та діючою напругою.

Головні переваги СЕС:

- безшумна експлуатація;
- довготривалість роботи, фотоелектричні елементи характеризуються надзвичайно тривалим терміном служби;
- ефективне перетворення сонячної енергії, основний механізм генерації електрики в СЕС базується на використанні фотоелектричних елементів;
- автономність енергопостачання, можуть слугувати додатковим і основним джерелом електроенергії для приватних будинків ;
- економічний стимул, можливість отримати "зелений" тариф.



Рис.1.3. Схема автономної СЕС

Ключові проблеми, пов'язані з використанням фотоелектричних систем :

- залежність від географічних та метеорологічних умов;
- вимоги до значних територій для встановлення.

Проаналізувавши спектр доступних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), можна дійти висновку, що сонячні електростанції (СЕС) виявляються найбільш оптимальним вибором для промислових об'єктів. Цей висновок ґрунтується на низці переваг, які вирізняють СЕС серед альтернативних ВДЕ.

Однак, варто визнати, що СЕС мають певні обмеження, зокрема залежність від погодних умов та добових циклів. Для подолання цих викликів рекомендується впровадження гібридної (комбінована) системи електропостачання.

1.2 Комбіновані системи з СЕС

Для стабільної та ефективної роботи фотоелектричних панелей використовуються додаткові компоненти системи: кабелі, контролери заряду, інвертори та інші елементи.

Зазвичай таку конструкцію називають фотоелектричною установкою на сонячній енергії або просто сонячною електростанцією. Існують три головні різновиди подібних систем, що використовують енергію сонця:

- незалежні установки для індивідуальних користувачів.
- установки, інтегровані в енергомережу.
- резервні фотоелектричні комплекси.

1. *Незалежні сонячні установки* зазвичай встановлюються у місцевостях, позбавлених доступу до централізованих електромереж. Для забезпечення енергією в нічні години або за умов недостатньої сонячної активності використовуються акумуляторні системи. Цей варіант енергозабезпечення найчастіше застосовується для автономного живлення

окремих осель. Системи меншої потужності зазвичай забезпечують базові потреби, як-от освітлення, роботу телевізора та холодильника. Потужніші установки здатні підтримувати функціонування ширшого спектру побутових приладів, включаючи водяні насоси, кондиціонери та інше енергоємне обладнання.

Система включає сонячну панель, контролер, акумулятор, кабелі та опорну конструкцію (рис. 1.4).

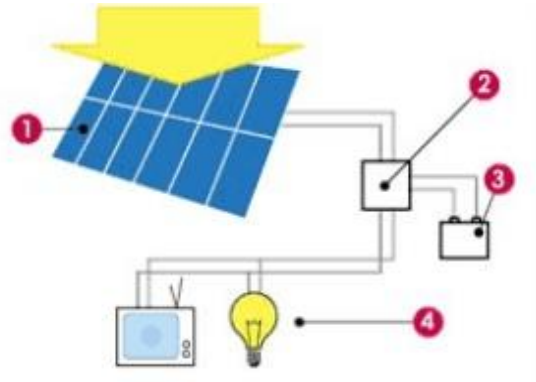


Рис. 1.4. Схема автономної СЕС

2. *Фотоелектричні установки*, інтегровані в загальну мережу, функціонують у тандемі з традиційною електромережею. За наявності достатньої кількості сонячних модулів, значна частка споживачів може отримувати енергію від сонячних джерел. Типова конфігурація такої системи включає один або декілька фотоелектричних модулів, інвертор, необхідну кабельну мережу, опорні конструкції та власне споживачів електроенергії.

Ключовим елементом виступає інвертор, який забезпечує сумісність сонячних панелей з електромережею, трансформуючи постійний струм у змінний з параметрами 220В/380В та частотою 50Гц.

На рисунку 1.5 представлена схема комбінованої системи електропостачання з використанням фотоелектричних установок (ФЕУ).

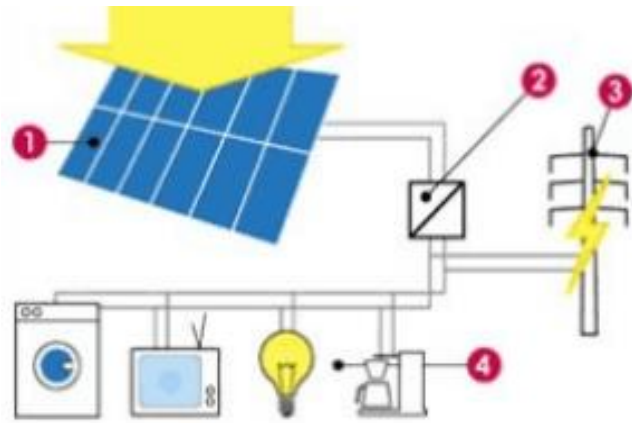


Рис. 1.5. Схема комбінованої СЕС

3. *Альтернативні фотоелектричні установки застосовуються в умовах ненадійного централізованого електропостачання. Вони забезпечують енергією споживачів під час перебоїв у основній мережі. Компактні резервні сонячні системи зазвичай живлять найважливіше обладнання: освітлювальні прилади, обчислювальну техніку та комунікаційні пристрої (мобільні телефони, радіоприймачі, факсимільні апарати тощо). Потужніші установки здатні також підтримувати роботу холодильного обладнання при відключеннях електроенергії. Розмір та потужність фотоелектричної системи прямо залежать від енергоспоживання критично важливих приладів та тривалості можливих перерв у електропостачанні. Система включає наступні елементи: фотоелектричні модулі, контролер заряду, акумуляторна батарея, кабельна мережа, інвертор, навантаження і опорна конструкція.*

На рис. 1.6 наведено схему аварійної системи з ФЕУ.

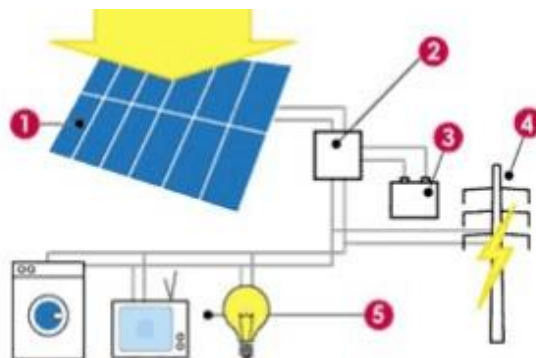


Рис. 1.6. Схема аварійної системи з ФЕУ

1.3 Аналіз будови та принципу роботи СЕС

Сонячна фотоелектрична система представляє собою інноваційну електростанцію, яка застосовує метод безпосереднього перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну. Ключовим елементом такої станції є набір сонячних модулів, також відомих як фотоелектричні панелі. Ці високотехнологічні пристрої зазвичай монтують на спеціально розробленій опорній конструкції або інтегрують у покрівлю будівлі для оптимального поглинання сонячної радіації. Сонячні панелі відіграють фундаментальну роль у створенні фотоелектричних систем, оскільки саме вони здійснюють первинне перетворення світлової енергії в електричну. Конструкція сонячних панелей базується на з'єднанні окремих фотоелектричних елементів, принцип дії яких ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекту в напівпровідникових матеріалах. Для виготовлення фотоелектричних перетворювачів найчастіше використовується кремній з додаванням інших елементів, що формують структуру з р-п-переходом. Цікаво відзначити, що товщина напівпровідникового шару в таких елементах надзвичайно мала і не перевищує 0,2-0,3 міліметра, що дозволяє економити матеріали та зменшувати вагу панелей. Варто виділити два основні типи фотоелектричних систем: автономні та підключені до електричної мережі. Станції другого типу мають перевагу в тому, що можуть віддавати надлишки виробленої електроенергії в загальну мережу, яка, в свою чергу, слугує резервом у разі виникнення внутрішнього дефіциту електроенергії в системі. Для ілюстрації практичного застосування, розглянемо приклад установки для дачного будиночка. Така система може складатися з двох фотоелектричних панелей загальною потужністю 100 ват і акумуляторної батареї ємністю 100 ампер-годин. Подібна конфігурація здатна генерувати достатньо енергії для забезпечення освітлення, роботи телевізора, невеликого холодильника та насоса для поливу.

Сонячні фотоелектричні системи мають низку суттєвих переваг :

1. Висока надійність та простота експлуатації: Ці системи характеризуються відсутністю рухомих компонентів, що значно знижує ризик механічних поломок. Єдина необхідна процедура обслуговування – це періодичне очищення поверхні фотоелементів від пилу та забруднень.

2. Ефективне накопичення енергії: Генерована електрика може зберігатися в акумуляторних батареях різної ємності.

3. Екологічність і безпечність: Процес фотоелектричного перетворення відбувається абсолютно безшумно та не супроводжується викидами вуглекислого газу чи інших шкідливих речовин.

4. Автономність та доступність: Сонячні електростанції є ідеальним рішенням для віддалених та важкодоступних регіонів, де прокладання традиційних ліній електропередач є економічно недоцільним або технічно складним.

Кремній, ключовий компонент у виробництві фотоелектричних панелей, часто називають " чорним золотом нового тисячоліття ". Дослідження демонструють вражаючу ефективність сонячних елементів: панель з коефіцієнтом корисної дії 15%, що містить лише кілограм кремнію, здатна за 30 років експлуатації генерувати приблизно 300 мегават-годин електричної енергії. Для порівняння , аби отримати аналогічну кількість енергії традиційним способом, знадобилося б спалити близько 75 тонн нафти. Цей розрахунок враховує середню ефективність теплових електростанцій (33%) та енергетичну цінність нафти (43,7 мегаджоулів на кілограм). Таким чином, один кілограм кремнію в сонячних технологіях еквівалентний 75 тоннам нафти у традиційній енергетиці.

Структура атомів кремнію в кристалічній решітці визнає класифікацію фотоелектричних перетворювачів (рис. 1.7):

1. *Фотоелектричні панелі з монокристалічного силіцію.* Ці елементи демонструють найвищу ефективність конверсії сонячної енергії в

лектричну. Базовим матеріалом слугує високочистий кремній, який широко застосовується у виробництві напівпровідникових приладів. Процес вирощування монокристалу відбувається методом Чохральського: зародковий кристал повільно витягується з розплаву кремнію, формуючи циліндричний злиток. Отриманий стрижень згодом розрізається на тонкі пластини завтовшки 0,2-0,4 міліметра, ККД- 15-18%

2. *Фотоелектричні перетворювачі з полікристалічного силіцію.* Формування полікристалічної структури відбувається шляхом контрольованого повільного охолодження кремнієвого розплаву. Виробничий процес таких панелей відрізняється від монокристалічних аналогів відсутністю етапу витягування, що робить його менш енерговитратним та суттєво економічнішим. Однак, структура полікристалічного кремнію характеризується наявністю множинних кристалічних зерен, розділених межами. Ці границі зерен створюють перешкоди для руху електронів, що призводить до зниження загальної ефективності перетворення сонячної енергії.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричних модулів на основі полікристалічного кремнію зазвичай коливається в межах 10-12%.

3. *Фотоелектричні перетворювачі на базі некристалічного силіцію.* Некристалічний силіцій отримують застосовуючи метод "осадження з газової фази". При цьому тонкий шар силіцію осідає на підкладку і захищається спеціальним покриттям. Такий підхід має свої плюси та мінуси.

До переваг можна віднести відносно нескладний і економічно вигідний процес виготовлення сонячних модулів з використанням аморфного силіцію. Крім того, ця технологія дозволяє створювати елементи значних розмірів, що розширює можливості їх застосування. Важливо відзначити, що виробництво таких панелей характеризується низьким рівнем споживання енергії, що робить їх більш екологічно чистими.

Однак, є й певні недоліки. Основним з них є нижча ефективність перетворення сонячної енергії в електричну порівняно з кристалічними аналогами. Типова ефективність сонячних елементів з аморфного силіцію становить близько 6-8%, тоді як кристалічні кремнієві панелі можуть досягати ефективності 15-20% і вище.



Рис. 1.7. Зовнішній вигляд сучасних сонячних панелей

Сонячні батареї складаються з групи сонячних елементів (фотоелектричних перетворювачів), які перетворюють сонячну енергію в електричну (див. рис. 1.8).

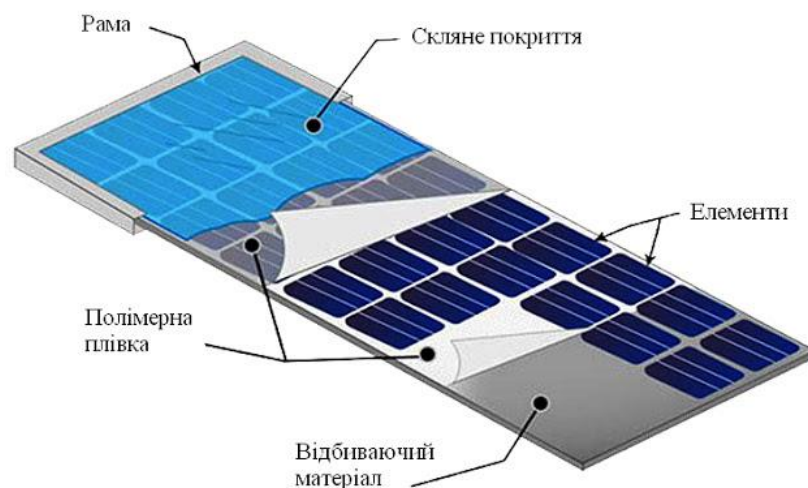


Рис. 1.8. Конструкція фотоелектричної панелі

Кремній є основним матеріалом для виробництва фотоелектричних перетворювачів, проте його висока ціна суттєво впливає на кінцеву вартість сонячних панелей. Як наслідок, електроенергія, генерована за допомогою таких установок, залишається відносно дорогою порівняно з традиційними джерелами.

У сфері сонячної енергетики найбільшого поширення набули два типи фотоелементів: на основі монокристалічного та полікристалічного кремнію. Ці різновиди відрізняються не лише методами виготовлення, але й ефективністю перетворення сонячної енергії в електричну. Монокристалічні мають ККД до 17,5%, а полікристалічні – 15%.

Ключовим технічним показником, що визначає економічну ефективність сонячної установки, виступає корисна потужність фотоелектричного модуля. Цей параметр формується комбінацією двох факторів: напруги та вихідного струму. Варто зазначити, що обидва ці компоненти безпосередньо залежать від інтенсивності сонячного випромінювання, яке досягає поверхні батареї. Фотоелектричний ефект у сонячних панелях характеризується цікавою особливістю: електрорушійна сила (ЕРС) окремих елементів не залежить від їхньої площі. Однак температурний фактор суттєво впливає на ефективність – при нагріванні батареї сонячним випромінюванням спостерігається зниження ЕРС приблизно на 0,4% на кожен градус Цельсія. Вихідний струм залежить від двох ключових параметрів: інтенсивності сонячного випромінювання і розміру сонячних елементів. Яскравіше світло стимулює генерацію більшого струму. Погодні умови відіграють критичну роль у продуктивності сонячних систем. За похмурої погоди спостерігається різке падіння зарядного струму та вихідної потужності, що пояснюється зменшенням струмовіддачі батареї через нижчу інтенсивність сонячного випромінювання.

Конструкція сонячної батареї базується на комбінації окремих фотоелектричних елементів, з'єднаних у певній конфігурації для досягнення

бажаних електричних характеристик. Вибір схеми з'єднання визначає кінцеві параметри модуля: напругу, силу струму та сумарну потужність. При послідовному з'єднанні компонентів відбувається підвищення вихідної напруги, тоді як паралельне з'єднання сприяє збільшенню вихідного струму. Для досягнення одночасного збільшення і напруги, і струму використовують комбінований метод, який поєднує обидва способи з'єднання.



Рис. 1.9. Будова сонячної батареї

Крім того, така схема з'єднання дозволяє підвищити надійність системи, оскільки вихід з ладу одного з елементів не зупиняє роботу всієї сонячної батареї. Це важливо для забезпечення стабільної роботи.

Максимальний струм, який може віддавати сонячна батарея, безпосередньо залежить від кількості елементів, підключених паралельно-послідовно. Така комбінація дозволяє зібрати батарею з необхідними характеристиками, забезпечуючи її ефективність і відповідним вимогам.

Функціонування фотоелектричних панелей базується на наступних принципах. Сонячне випромінювання, потрапляючи на поверхню панелі, перетворюється на електричний струм завдяки фотоелектричному ефекту. Генерована електрична енергія не використовується миттєво, а зберігається в спеціальних пристроях - акумуляторах. Ці пристрої являють собою хімічні джерела струму, які здатні накопичувати та віддавати енергію за потреби.

Процес зарядки акумулятора ініціюється, коли до його клем прикладається електрична напруга, що перевищує власну напругу акумулятора. Це спричиняє хімічні реакції всередині пристрою, які дозволяють накопичувати енергію. При проектуванні сонячних систем важливо оптимально розрахувати конфігурацію фотоелектричних елементів. Кількість послідовно та паралельно з'єднаних компонентів має бути ретельно підібрана для досягнення оптимальних параметрів роботи.

За умов недостатньої інсоляції запас енергії в акумуляторних батареях поступово вичерпується, оскільки вони забезпечують живлення підключеного електрообладнання. Таким чином, акумулятори функціонують у циклічному режимі, чергуючи фази розрядки та підзарядки. Цей динамічний процес знаходиться під пильним наглядом спеціалізованого контролера. Для ефективного циклічного заряду необхідно підтримувати або сталу напругу, або постійний струм заряду. При оптимальних умовах освітлення акумуляторна батарея швидко досягає 90% своєї номінальної ємності. Подальше наповнення до повної ємності відбувається з меншою інтенсивністю. Перехід між цими режимами здійснюється автоматично завдяки контролеру зарядного пристрою.

У сфері автономних енергетичних систем найвищу ефективність демонструють спеціалізовані акумулятори двох типів: гелієві та свинцеві батареї, виготовлені за технологією AGM (Absorbent Glass Mat). Виробники декларують термін служби таких акумуляторів на рівні 10-12 років за умови дотримання рекомендованого режиму експлуатації. Ключовим фактором довговічності є обмеження глибини розряду до 20% від номінальної ємності. Важливо підкреслити, що перевищення цього порогу розряду може призвести до суттєвого скорочення терміну служби батарей.

У системах сонячної енергетики акумуляторна батарея не з'єднується безпосередньо з фотоелектричними панелями. Замість цього, між ними встановлюється спеціалізований пристрій - контролер заряду. Коли

аккумулятор досягає стану повного заряду, виникає необхідність утилізації надлишкової енергії, яку продовжує генерувати сонячна батарея. Для цього контролер активує додатковий елемент схеми - резистор.

Для трансформації сталої напруги, що надходить з аккумуляторів, у змінний струм, придатний для функціонування більшості побутових приладів у поєднанні з фотоелектричними панелями, застосовують особливі пристрої – інвертори. Однак, якщо не використовувати інвертор, сонячні батареї все ще можуть жити обладнання, розраховане на постійний струм., в т. ч. різну портативну техніку, енергозберігаючі джерела світла, наприклад, ті ж світлодіодні лампи.

Висновки до розділу

1. За результатами комплексного дослідження наявних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) можна дійти висновку, що сонячні електростанції (СЕС) виявляються найбільш оптимальним вибором для промислових об'єктів. Цей вибір ґрунтується на низці переваг СЕС порівняно з альтернативними видами ВДЕ. Обмеження сонячних електростанцій (СЕС) можна частково нівелювати шляхом їх інтеграції з централізованою енергомережею, створюючи гібридну систему електропостачання.

2. Оптимальним рішенням для компанії стане впровадження сонячної електростанції (СЕС) гібридного типу. Подібна установка матиме подвійне призначення: забезпечуватиме енергетичні потреби самого підприємства і одночасно постачатиме надлишок виробленої електроенергії до загальної електромережі.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Для формування оптимальної конфігурації гібридної енергетичної системи з відновлювальними генераторами потрібно вирішити низку важливих завдань:

- проаналізувати архітектуру та складові елементи гібридної системи електропостачання з використанням відновлювальних джерел енергії.
- підбір оптимального складу елементів комбінованої системи електропостачання з ВДЕ.

Отже, цей розділ дослідження присвячений вирішенню ключових завдань.

2.1 Розробка структури комбінованої системи електропостачання

Відповідно до відомостей, наведених у першому розділі роботи, для умов міста Кропивницького найбільш доцільним є використання сонячної електростанції (СЕС) як компонента комбінованої системи електропостачання з відновлювальними джерелами енергії. Водночас, зважаючи на відносно високий рівень надійності електропостачання від централізованої енергосистеми, застосування акумуляторних батарей як робочих або аварійних накопичувачів електроенергії в такій гібридній системі не є виправданим.

Узагальнена структурна схема комбінованої системи електропостачання з сонячною електростанцією, що працює паралельно з мережею живлення, зображена на рисунку 2.1.

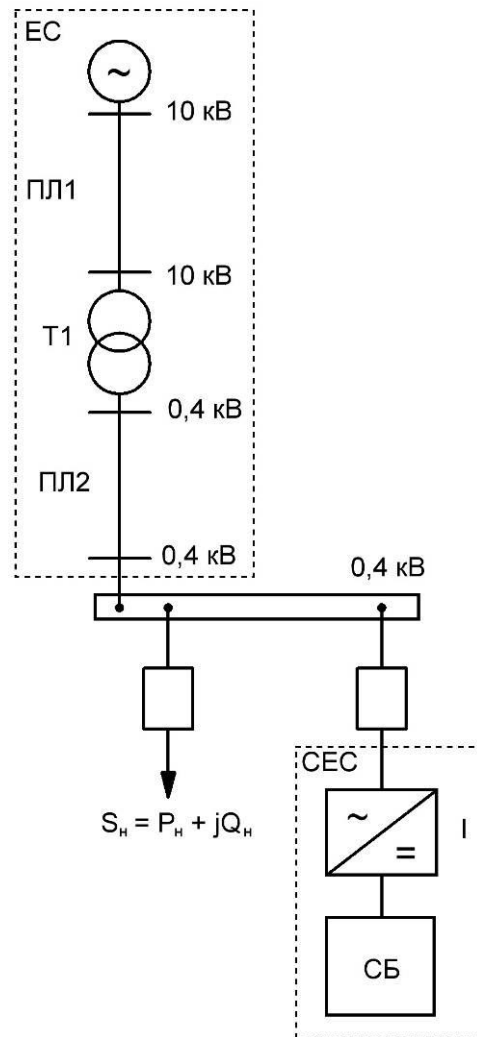


Рис. 2.1. Схема комбінованої системи електропостачання

2.2 Визначення оптимального кута нахилу сонячних панелей (для умов м. Кропивницького)

Для географічного розташування Кропивницького, що знаходиться на $48^{\circ}36'$ північної широти, у таблиці 2.2 представлено дані щодо енергетичної освітленості поверхонь. Ці показники, зокрема для південної ($I_{\text{пд}}$) та горизонтальної ($I_{\text{гор}}$) орієнтацій, наведено як усереднені погодинні величини для типових днів різних сезонів. Інформацію взято з українського нормативного документа ДСТУ-Н Б В.1.1 – 27:2010, де наведено значення для 48° північної широти.

Таблиця 2.1. Погодинний розподіл енергетичної освітленості

Годинний інтервал	Енергетична освітленість, I , Вт/м ²			
	Січень, середня хмарність		Липень, ясне небо	
	Пд	Гориз.	Пд	Гориз.
0 ... 1	0	0	0	0
1 ... 2	0	0	0	0
2 ... 3	0	0	0	0
3 ... 4	0	0	0	0
4 ... 5	0	0	0	8.05
5 ... 6	0	0	0	56.97
6 ... 7	0	0	0	165.12
7 ... 8	18.86	1.37	12.37	296.69
8 ... 9	204.59	34.72	118.18	436.26
9 ... 10	388.99	111.92	220.46	554.22
10 ... 11	522.91	183.9	297.27	637.27
11 ... 12	588.12	222.05	338.08	680.95
12 ... 13	588.92	222.48	338.7	680.08
13 ... 14	522.76	183.76	297.63	637.29
14 ... 15	388.64	111.91	220.31	554.11
15 ... 16	204.48	34.98	118.52	436.46
16 ... 17	18.43	1.81	12.86	296.45
17 ... 18	0	0	0	165.36
18 ... 19	0	0	0	56.19
19 ... 20	0	0	0	8.12
20 ... 21	0	0	0	0
21 ... 22	0	0	0	0
22 ... 23	0	0	0	0
23 ... 24	0	0	0	0
Усього за добу	3440	1102	1970	5664

Щоб встановити найбільш ефективний кут нахилу, потрібно сформувати графічне представлення взаємозв'язку між загальною енергетичною ефективністю I_b та різними значеннями кута β . Отримані результати цих розрахунків візуалізовано у двох форматах: табличному (таблиця 2.2) та графічному (рис. 2.2).

Таблиця 2.2. Взаємозв'язок між кутом нахилу фотоелектричного модуля та величиною денної енергетичної інсоляції

Кут нахилу, β , °	Добова енергетична освітленість $E_{\text{доб}}$, кВт·год/м ²	
	Січень	Липень
0	3,45	1,98
5	3,53	2,46
10	3,59	2,93
15	3,68	3,39
20	3,69	3,79
25	3,53	4,19
30	3,50	4,58
35	3,40	4,83
40	3,35	5,10
45	3,22	5,38
50	3,56	5,66
55	2,85	5,78
60	2,64	5,9
65	2,43	5,97
70	2,22	5,95
75	1,96	5,99
80	1,64	5,93
85	1,38	5,84
90	1,12	5,64

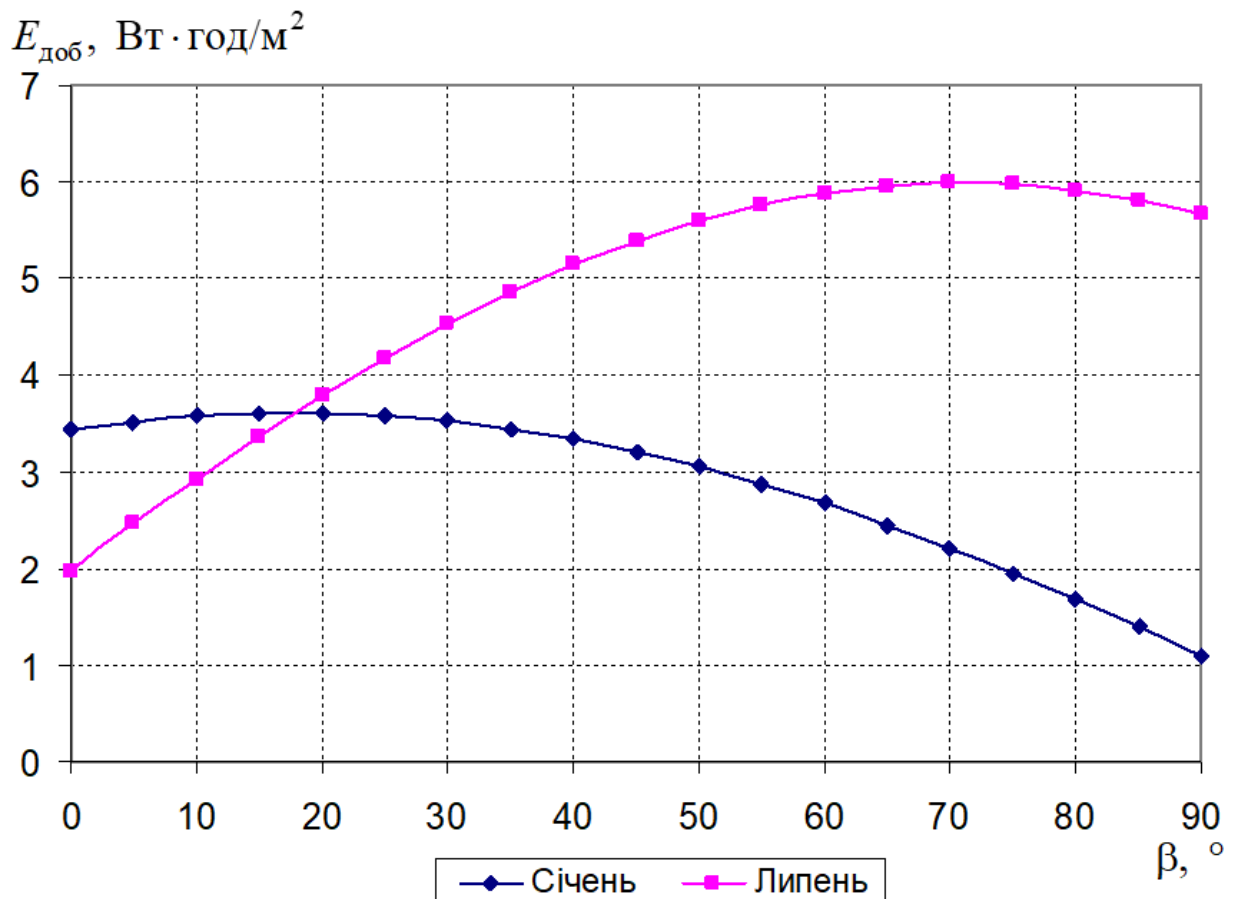


Рис. 2.2 ілюструє взаємозв'язок між нахилом фотоелектричного модуля β та денною енергетичною інсоляцією $E_{\text{доб}}$.

Як видно з результатів розрахунку (табл. 2.2, рис. 2.2), добова енергетична освітленість для січня досягає свого максимуму $E = 3,608 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ при куті нахилу $\beta = 15^\circ$, а для липня максимум складає $E = 5,996 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ при куті нахилу $\beta = 70^\circ$. Зважаючи на те, що значення енергетичної освітленості для літньої пори року є значно більшими, ніж взимку, оптимальний кут нахилу сонячних батарей приймається рівним $\beta = 70^\circ$ (за умов відсутності пристроїв регулювання положення сонячної батареї в просторі).

Значення середньогодинної енергетичної освітленості поверхні сонячних батарей з кутом нахилу $\beta = 70^\circ$ для характерних зимової та літньої доби наведено в табл. 2.3. та на рис. 2.3.

Таблиця 2.3. Дані про усереднену погодинну енергетичну інсоляцію ($\beta = 70^\circ$)

Кут нахилу, $\beta, ^\circ$	Середнього динна енергетична освітленість I_β , Вт/м ²	
	Січень	Липень
0 – 1	0	0
1 – 2	0	0
2 – 3	0	0
3 – 4	0	0
4 – 5	0	7,6
5 – 6	0	52,7
6 – 7	0	155.1
7 – 8	7,2	282,4
8 – 9	101,8	450,2
9 – 10	237.1	595,9
10 – 11	350,6	700,3
11 – 12	409,8	754,7
12 – 13	409,8	754,7
13 – 14	350,6	700,3
14 – 15	237.1	595,9
15 – 16	101,8	450,2
16 – 17	7,2	282,4
17 – 18	0	155.1
18 – 19	0	52,7
19 – 20	0	7,6
20 – 21	0	0
21 – 22	0	0
22 – 23	0	0
23 – 24	0	0

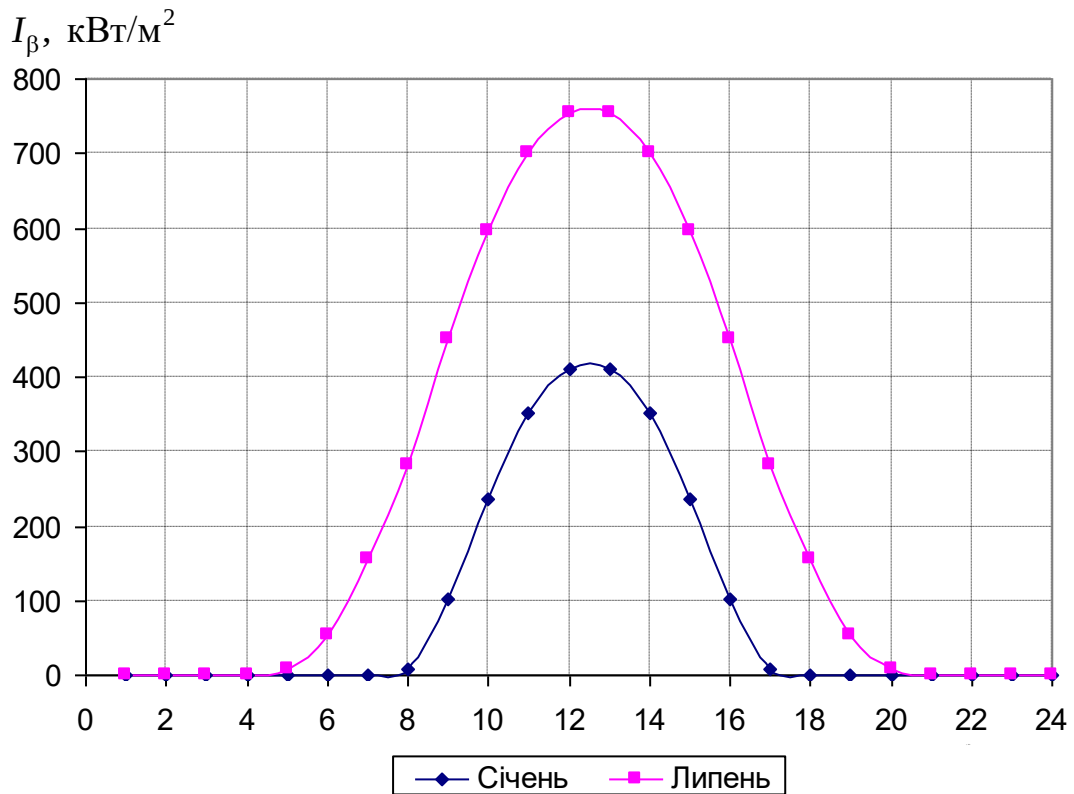


Рис. 2.3. Графік зміни в часі середньогодинної енергетичної інсоляції на поверхню фотоелектричних панелей ($\beta = 70^\circ$)

2.3 Визначення необхідної площі сонячних панелей СЕС

Проведемо обчислення, використовуючи як приклад територію, розташовану поблизу промислового об'єкта. Ця ділянка землі має наступні характеристики:

- довжина $s = 74$ м
- ширина $d = 40,0$ м

Вихідні дані:

- кут нахилу панелі $\alpha = 70^\circ$
- висота від поверхні до масиву $a = 0,5$ мм;
- параметри обраної панелі (В*Ш*Т)=(1984*992*35мм)

Визначаємо проекцію масиву на поверхню, мм:

$$B' = \cos\left(\alpha \frac{\pi}{180}\right) \cdot B = \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot 1984 = 1983,5$$

Знаходимо лінійну довжину масиву, мм:

$$D = \sin\left(\alpha \frac{\pi}{180}\right) \cdot B = \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot 1984 = 42,2$$

Розраховуємо відстань від поверхні до верхньої точки масиву, мм:

$$A = D + a = 42,2 + 500 = 542$$

Базуючись на проведених обчисленнях та доступній інформації, визначаємо оптимальну відстань для розміщення груп фотоелектричних модулів, мм:

$$l = \frac{D}{\operatorname{tg}\left(\alpha \frac{\pi}{180}\right)} = \frac{2}{\operatorname{tg}\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} = 1979$$

Тоді загальна періодичність розташування знаходиться за формулою, мм:

$$L = l + B' = 1979 + 1983 = 3936,26$$

Визначаємо кількість рядів розміщених на землі, шт:

$$N_i = \frac{d}{L} = \frac{40}{3963 \cdot 10^{-3}} \approx 10$$

Загальна площа розташування панелей, м²:

$$S = c \cdot d = 74 \cdot 40 = 2960$$

Схема розміщення комплексів фотоелектричних модулів, встановлених горизонтально, з врахуванням областей затемнення, проілюстрована на зображенні 2.4.

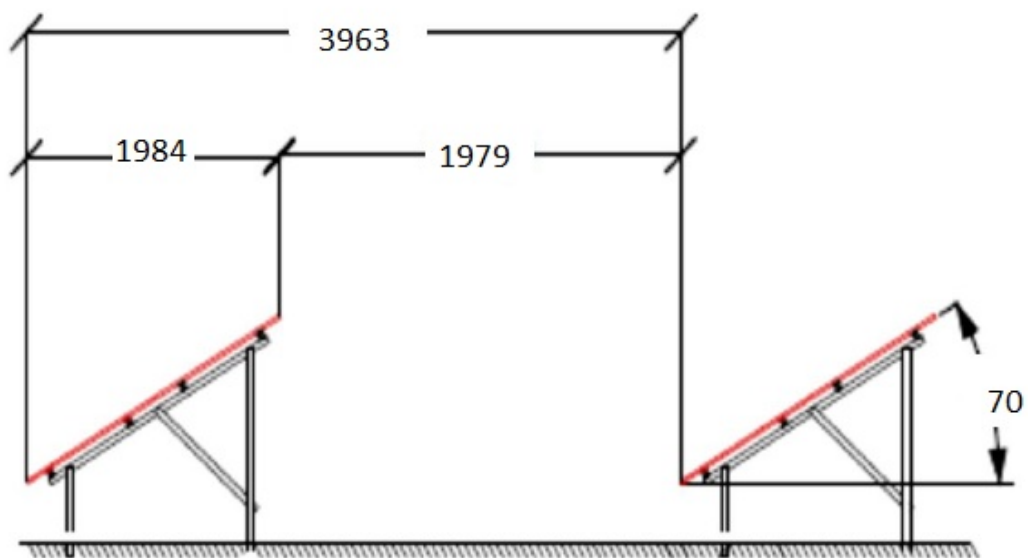


Рис. 2.4. Схема розміщення ФЕМ

2.4 Вибір складових компонентів комбінованої системи електропостачання з СЕС

У структурній схемі інтегрованої системи енергозабезпечення ключовими компонентами, що визначають потужність генерації електрики, виступають фотоелектричні панелі та перетворювач напруги. Сонячні модулі здійснюють трансформацію променистої енергії світила в електричний струм постійної напруги. Натомість інвертор виконує функцію конвертації постійного струму в змінний, формуючи трифазну напругу з номінальним показником 400 В.

2.4.1. Визначення оптимальних параметрів СЕС. Здійснимо аналіз для визначення оптимальної кількості фотоелектричних панелей, беручи до уваги потрібний рівень виробництва електроенергії та враховуючи просторові обмеження щодо їх інсталяції в межах виробничого об'єкта. [34]

Як було згадано раніше, головне завдання монтажу сонячних електростанцій (СЕС) полягає у компенсації нестачі електроенергії, котру неможливо отримати з централізованої мережі.

Необхідна потужність СЕС, кВт :

$$P_{\text{СЕС}} = 0,667 P_p = 0,667 \cdot 300 = 2001$$

При виборі компонентів для сонячної електростанції, ми зупинилися на високоефективних панелях від виробника TRINA SOLAR, а саме моделі 260P. Кожен такий фотоелектричний модуль характеризується номінальною потужністю у 260 Ват. Ключові параметри та експлуатаційні показники фотоелектричних панелей TRINA SOLAR моделі 260P детально представлені у таблиці 2.4 технічної документації.

Кількість фотоелектричних модулів, що забезпечують необхідну потужність СЕС, шт:

$$N_{\text{ігв}} = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{ігв.ном}}} = \frac{208}{15} = 13,86 \approx 14$$

З метою гарантування достатньої енергетичної потужності, беручи до уваги можливі втрати в фотоелектричних модулях (ФЕМ) та пристроях перетворення струму, ми визначаємо оптимальну кількість сонячних панелей $N_{\text{ФЕМ}} = 800$ шт.

Загальна потужність модулів, кВт:

$$P_{\text{СЕС}} = N_{\text{ФЕМ}} P_{\text{ФЕМ}} = 0,26 \cdot 800 = 208$$

2.4.2. Вибір інверторів. Беручи до уваги вибраний тип фотоелектричних елементів та здійснивши детальний огляд доступних моделей інверторів від різноманітних виробників, було вирішено застосувати пристрої Sunny Tripower 15000TL потужністю 15 кВт.

Необхідна кількість інверторів, шт:

$$N_{\text{ігв}} = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{ігв.ном}}} = \frac{208}{15} = 13,86 \approx 14$$

Висновки до розділу

1. На основі аналізу наявних гібридних енергосистем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) та з урахуванням специфічних кліматичних і географічних особливостей Кіровоградщини, можна дійти висновку про оптимальну конфігурацію комбінованої системи електрозабезпечення для

підприємств регіону. Серед різноманітних варіантів ВДЕ, саме інтеграція фотоелектричної станції виявляється найдоцільнішою.

2. На основі здійснених обчислень щодо оптимізації кута нахилу фотоелектричних модулів для географічного розташування Кропивницького, було встановлено оптимальне значення цього параметра. Зокрема, виявлено, що найефективніша генерація електроенергії сонячною електростанцією (СЕС) досягається при куті нахилу $\beta = 70^\circ$.

3. Базуючись на попередньо проведених дослідженнях щодо структурної організації гібридної системи енергозабезпечення, аналізу характеристик споживання електроенергії та обчислення оптимального кута інсталяції, було ухвалено рішення про монтаж фотоелектричної установки. Проект передбачає використання 800 сонячних панелей моделі TRINA SOLAR 260P, кожна з яких має номінальну потужність 260 Вт. Сумарна потужність цієї фотоелектричної системи складе 208 кВт.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА РІВНІ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Проблематика інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електроенергетичні системи з метою покращення стабільності та ефективності енергопостачання користувачів залишається недостатньо вивченою сферою. Ключовим аспектом у цьому контексті є аналіз впливу альтернативної енергетики на функціонування розподільчих електричних мереж (ЕМ), а також дослідження компоненти енергетичних втрат, спричинених експлуатацією ВДЕ. Недостатнє вивчення вказаних аспектів призводить до встановлення надмірно високих показників допустимих втрат електричної енергії. Ці завищені нормативи змушені компенсувати власники відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) при укладанні угод на постачання електроенергії як на енергетичний ринок, так і кінцевим споживачам. Аналіз взаємодії між розподільчими електромережами та відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), поєднаний з комп'ютерним моделюванням енергетичних втрат при цільових передачах від генераторів до кінцевих користувачів, відкриває шлях до створення оптимальних умов співіснування "зеленої" генерації та традиційної інфраструктури електропостачання.

У цій частині дослідження увага зосереджена на вивченні та вдосконаленні взаємодії між операційними режимами відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та структурою розподільчих мереж енергетичних систем.

3.1 Особливості експлуатації РЕМ в умовах адресного електропостачання

Впровадження децентралізованих генераторів енергії у дистрибутивні електромережі характеризується низкою специфічних аспектів. При розробці та функціонуванні гібридних енергосистем, що включають відновлювані джерела енергії (ВДЕ), критично важливо брати до уваги їхній вплив на операційні параметри мережі. Ця частина дослідження зосереджується на теоретичному аналізі зазначеної проблематики.

В контексті трансформації енергетичного сектору, що характеризується відходом від моделі єдиного покупця на оптовому ринку електроенергії до більш гнучкої системи балансування та впровадження двосторонніх договорів, спостерігається чітка динаміка децентралізації електропостачання. Ця еволюція знаменує собою перехід від виключно централізованої моделі до гібридної системи, де зростає роль та кількість локальних генераторів електроенергії. У розподільчих мережах напругою 10, 6 та 0,38 кВ функціонують різноманітні локальні генератори електроенергії. Серед них можна виділити як класичні малопотужні установки, так і сучасні альтернативні джерела. На противагу традиційним методам виробництва енергії, активно впроваджуються інноваційні технології, такі як відновлювані джерела енергії (ВДЕ), когенераційні системи, а також газотурбінні та парогазові комплекси.

Історично склалося так, що електричні мережі (ЕМ) енергосистем проєктувались і будувались з урахуванням централізованої моделі електропостачання. Ця модель передбачала генерацію електроенергії на потужних теплових та атомних електростанціях, після чого вона проходила через ряд трансформацій і передавалась до кінцевих споживачів.

Для кращого розуміння структури сучасних розподільних електромереж з централізованим живленням, варто звернути увагу на ілюстрацію, представлену на рисунку 3.1.1.



Рис. 3.1. РЕМ з централізованим живленням

У контексті систем електропостачання, розподільчі мережі напругою 6–10 кілоВольт зазвичай проектуються та функціонують за принципом розімкнених схем. Це передбачає, що електроенергія в лініях передається в одному напрямку - від джерела до споживача. У контексті розподільчих електричних мереж (РЕМ) здійснювався ретельний підбір комутаційного обладнання, систем захисту та автоматизації, а також впроваджувалися сучасні засоби обліку енергоспоживання. Структура мережі проектувалася з урахуванням потреб споживачів у надійному електропостачанні та їхніх специфічних характеристик. Важливим аспектом було розміщення пунктів секціонування, які відігравали ключову роль у формуванні потоків електроенергії. [35]

Із зростанням кількості відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у розподільчих електромережах постають нові виклики. Серед них - потреба оптимізувати поєднане енергопостачання від електроенергетичної системи (ЕЕС) та децентралізованої генерації. Важливим аспектом є узгодження графіку навантаження з виробництвом енергії відновлюваними джерелами,

які, зважаючи на свою природу, можуть генерувати потужність за різноманітними схемами. Додатково виникає необхідність аналізу впливу ВДЕ на величину струмів короткого замикання, що безпосередньо позначається на функціонуванні систем релейного захисту та автоматики. Не менш важливим є оцінювання впливу цих джерел на техніко-економічні показники розподільчих електромереж (РЕМ). Зображення 3.1.2 демонструє схему організації електромереж, які поєднують різні джерела живлення.

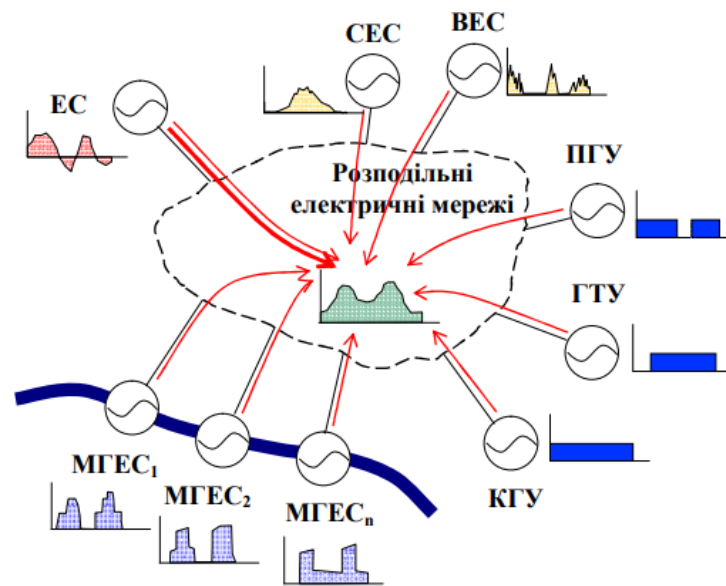


Рис. 3.2. РЕМ з комбінованим електропостачанням

Функціонування розподільчих електричних мереж (РЕМ) значно змінюється під впливом відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ступінь цього впливу визначається кількома ключовими факторами. По-перше, загальний обсяг децентралізованої генерації у мережі відіграє вирішальну роль. Крім того, важливими є індивідуальні характеристики кожної установки ВДЕ, зокрема її номінальна потужність та технологія виробництва енергії (сонячна, вітрова, біомаса тощо).

Не менш суттєвим фактором є розташування точок підключення ВДЕ до електромережі. Вони можуть бути приєднані як до шин низької напруги на підстанціях, так і до відгалужень ліній електропередачі.

Варто зазначити, що паралельно відбуваються трансформації в економічному середовищі, де функціонує енергетичний сектор. Зокрема, реформується структура оптового ринку електроенергії [7, 8]. При впровадженні схем електропостачання, що базуються на двосторонніх угодах із залученням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), виникає комплексне завдання. Коли генератори на основі ВДЕ подають електроенергію в мережу, постає критична потреба в гармонізації їхньої роботи з основною енергосистемою, яка забезпечує централізоване енергопостачання. Необхідність координації стає критичною, коли частка встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електричній мережі (ЕМ) досягає значного рівня, наприклад, 20% або більше від її загального навантаження. За таких умов доцільно розглядати районну електричну мережу (РЕМ) як локальну електричну систему (ЛЕС). [8,9].

Із багатьох проблем, що постають під час впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), варто зосередитись насамперед на тих, які мають безпосередній вплив на обсяги та темпи розвитку альтернативної енергетики. Першочергове вирішення цих питань здатне створити потужні стимули для інвесторів та енергетичних компаній, заохочуючи їх активно розвивати сектор ВДЕ в Україні.

Окрім "зелених тарифів", які вже довели свою ефективність, необхідно розробити комплексну систему заохочень. Це може включати податкові пільги, гранти на дослідження та розробку, а також спрощені процедури отримання дозволів на будівництво об'єктів ВДЕ.

Однією з ключових проблем у сфері відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є оптимізація їх експлуатації для максимізації прибутку. Це завдання набуває особливої ваги в контексті розширення мережі ВДЕ, водночас вимагаючи зниження втрат електроенергії, підвищення її якості в розподільчих електричних мережах (РЕМ) та покращення надійності

енергопостачання. [10,11]. Беручи до уваги факт, що енергія, вироблена відновлюваними джерелами (ВДЕ), транспортується мережами районних електричних мереж (РЕМ) паралельно з електроенергією, отриманою з інших генеруючих потужностей, виникає потреба в точному визначенні частки втрат, пов'язаних саме з передачею "зеленої" енергії. Необхідно створити ефективний спосіб обчислення енергетичних втрат, спричинених транзитними потоками електрики. Це набуває критичного значення в контексті адресного постачання електроенергії, де витрати, пов'язані з її транзитом, мають бути компенсовані учасниками договірних відносин.

Дослідження, представлене у джерелі [12], демонструє, що вплив відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на функціонування розподільчих електричних мереж (РЕМ) є багатофакторним явищем. Зокрема, цей вплив позначається на втратах електричної потужності та коливаннях напруги в мережі. Важливо зазначити, що характер та інтенсивність цього впливу варіюються залежно від конкретних експлуатаційних умов. [36]

Сучасний стан електромереж в Україні характеризується значними втратами електроенергії. За даними джерела [12], ці втрати сягають 11,5–12,1% від загального обсягу електроенергії, що подається в мережу. Такий показник суттєво перевищує аналогічні дані розвинених країн, зокрема:

1. США, де втрати становлять близько 6,5%.
2. Великобританії з показником 8,6%.
3. Франції, яка демонструє найнижчий рівень втрат – 4,5%.

Експерти галузі дійшли висновку, що найбільш проблемною ланкою в системі електропостачання є саме розподільчі мережі. [12].

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють значну роль у формуванні втрат електроенергії в розподільних мережах. Цей вплив є комплексним та залежить від багатьох факторів. Зокрема, на рівень втрат в електричних мережах (ЕМ) суттєво впливають параметри самих ВДЕ та схеми приєднання ВДЕ до мережі, та особливості споживання електроенергії.

Дослідження ефективного застосування ВДЕ в електричних мережах є предметом активного наукового інтересу розглядається в роботах [К13,14].

На зображенні 3.1.3 представлено різноманітні варіанти підключення віднолювальних джерел енергії (ВДЕ) до розподільних електричних мереж (РЕМ) вони по-різному позначаються на втратах потужності та електроенергії, а також мають неоднаковий вплив на рівні напруги в різних точках мережі.

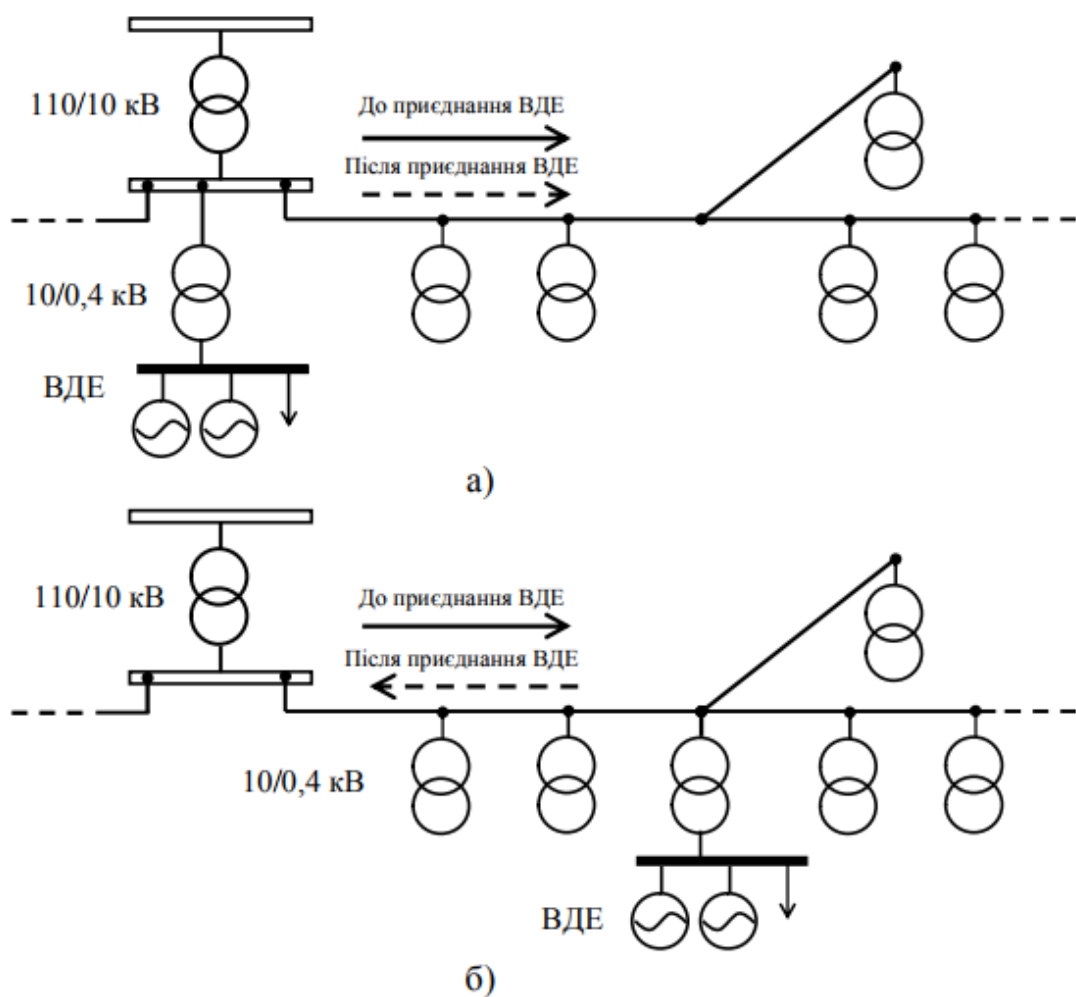


Рис. 3.3. Варіанти приєднання СЕС до РЕМ

У такій ситуації генерація від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) призводить до зниження навантаження на трансформатор. Це відбувається через те, що частина потужності, яка раніше передавалася через трансформатор, тепер виробляється локально. Як наслідок, зменшуються

втрати, пов'язані з навантаженням трансформатора. Варто зазначити, що втрати в лініях електропередачі залишаються незмінними. На схемі, зображеній на рисунку 3.2. б), спостерігається комплексний ефект розвантаження. Це стосується не лише трансформатора підстанції, а й певної ділянки ліній електропередачі (ЛЕП). Такий розподіл навантаження призводить до додаткового зниження втрат електричної потужності в системі. Зменшення потоку енергії через елементи мережі має ще один позитивний наслідок - скорочення втрат напруги. Це явище сприяє оптимізації рівнів напруги на шинах трансформаторних підстанцій з номінальною напругою 10/0,4 кВ.[37]

Розглядаючи стандартні конфігурації підключення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до мереж розподілу, можна спостерігати цікавий ефект. При досягненні певних рівнів генерації, ці джерела починають частково врівноважувати енергетичні потоки, викликані споживанням електроенергії. Як наслідок, об'єм електроенергії, що надходить із центральної енергосистеми, помітно скорочується.

Одночасно з цим процесом спостерігається зниження енергетичних втрат у мережах розподілу. Для кількісної оцінки цих втрат зазвичай застосовується загальновідома формула, яка дозволяє провести точний аналіз ефективності системи:

$$\Delta W = \frac{S_{\text{сист}}^2}{U_{\text{н}}^2} r_{\text{ек}} k_{\phi}^2 T_{\text{п}} = \frac{(P_{\text{наб}} - P_{\text{г}})^2 + (P_{\text{наб}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} - P_{\text{г}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{г}})^2}{U_{\text{н}}^2} r_{\text{ек}} k_{\phi}^2 T_{\text{п}} \quad (3.1)$$

Методи приблизного обчислення енергетичних втрат у електромережах (ЕМ) з урахуванням потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) варіюються залежно від специфіки конкретного типу ВДЕ. Зокрема, для джерел, які спроможні виробляти виключно активну потужність, як-от

сонячні електростанції (СЕС) з певними моделями інверторів, застосовується особлива формула для розрахунку втрат:

$$\Delta W_{\text{СЕС1}} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{\text{наб}}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}}) - 2P_{\Gamma}P_{\text{наб}}}{U_{\text{H}}^2} r_{\text{ек}} k_{\Phi}^2 T_{\text{п}} \quad (3.2)$$

Коли йдеться про впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які мають здатність генерувати одночасно активну та реактивну потужність, як, наприклад, сонячні електростанції (СЕС) з передовими моделями інверторів, формула для обчислення втрат енергії набуває більш комплексної форми:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{СЕС2}} = & \frac{P_{\Gamma}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\Gamma}) + P_{\text{наб}}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}})}{U_{\text{H}}^2} r_{\text{ек}} k_{\Phi}^2 T_{\text{п}} - \\ & - \frac{2P_{\Gamma}P_{\text{наб}} (1 + \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma} \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}})}{U_{\text{H}}^2} r_{\text{ек}} k_{\Phi}^2 T_{\text{п}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для кількісного визначення ступеня впливу різноманітних видів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на енергетичні втрати в мережах розподілу, доцільно запровадити спеціальні індикатори впливу. Ці показники відображають співвідношення між втратами електроенергії в електромережах (ЕМ) після інтеграції розосередженої генерації та втратами до її впровадження:

$$\begin{aligned} k_{\Delta W_{\text{СЕС1}}} = & 1 + \frac{P_{\Gamma}^2}{P_{\text{наб}}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}})} - 2 \frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{наб}} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}})} = \\ = & \left(\frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{наб}}} - 1 \right)^2 \cos^2 \varphi_{\text{H}} + \sin^2 \varphi_{\text{H}} \end{aligned} \quad , \quad (3.4)$$

$$k_{\Delta W_{\text{СЕС2}}} = 1 + \frac{P_{\Gamma}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\Gamma})}{P_{\text{наб}}^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}})} - 2 \frac{P_{\Gamma} (1 + \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma} \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}})}{P_{\text{наб}} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}})} \approx \left(\frac{P_{\Gamma}}{P_{\text{наб}}} - 1 \right)^2 \quad , \quad (3.5)$$

Аналіз представлених формул (3.4), (3.5) демонструє цікаву закономірність: зростання втрат у мережах розподілу внаслідок функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) спостерігається лише за умови, коли середній рівень генерації цих станцій перевищує вдвічі аналогічний показник прилеглого навантаження.

Вплив різноманітних енергетичних джерел на втрати потужності в елементах розподільних електричних мереж (РЕМ) можна оцінити, аналізуючи результати обчислень стаціонарних режимів роботи мережі. Однак, виокремлення конкретного внеску відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальну структуру втрат є завданням підвищеної складності. Оцінка впливу режимів функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на дисипацію електроенергії в розподільчих електричних мережах (РЕМ) становить значну проблему через специфіку взаємозв'язків. Ключова перешкода полягає у нелінійній залежності втрат потужності від розподілу енергетичних потоків між елементами мережевої топології. Така нелінійність унеможливорює застосування принципу суперпозиції (методу накладання) для аналізу. Сучасна інженерна практика пропонує різноманітні підходи до обчислення компонентів втрат електроенергії. Методологія розрахунків варіюється залежно від характеру вихідних даних: можливе як використання детермінованих величин, так і застосування ймовірно-статистичних методів оцінювання. При застосуванні стандартних методик обчислення в розімкнених системах розподілу електроенергії, похибки розрахунків зазвичай залишаються в межах, прийнятних для планування експлуатаційних режимів електромереж. Проте ситуація суттєво ускладнюється в замкнених розподільних системах, де посилюється ефект нелінійності функціональної залежності втрат потужності. Це може призводити до значних неточностей при визначенні додаткових технологічних втрат електричної енергії, особливо коли фактичний режим функціонування мережі відрізняється від запланованого.

3.2 Дослідження взаємовпливу СЕС та систем електропостачання

Як було висвітлено раніше, аналіз впливу експлуатаційних режимів відновлюваних енергоджерел на дисипацію потужності в електричних мережах являє собою комплексну проблему. Ключова складність полягає у нелінійному характері залежності енергетичних втрат від розподілу потоків електроенергії між елементами мережевої структури, що унеможливорює безпосереднє застосування принципу суперпозиції для аналізу. Сучасний інженерний інструментарій пропонує широкий спектр методологічних підходів для обчислення компонентів енергетичних втрат. Існуючі методики дозволяють здійснювати розрахунки як на основі чітко визначених параметрів, так і з використанням стохастичного аналізу та статистичної оцінки. [15,17]. Застосування наявних методик розрахунку в розімкнених системах розподілу електроенергії зазвичай спричиняє похибки, які вважаються прийнятними для етапу планування експлуатаційних режимів електромереж. Ситуація значно ускладнюється при аналізі замкнених розподільних систем, де посилюється ефект нелінійності функціональної залежності енергетичних втрат, що призводить до істотних неточностей при визначенні додаткових технологічних втрат електричної енергії.

3.2.1. Аналіз впливу СЕС на параметри режиму роботи РЕМ.

Науковці у дослідженні [17] запропонували інноваційний підхід до вирішення окреслених проблем, обґрунтувавши можливість аналізу впливу окремих генераційних вузлів на енергетичні втрати в електромережах. Їхній метод базується на застосуванні лінеаризованих моделей усталеного режиму електричної мережі. Відповідно до цієї методології, розрахунок повної потужності для початкової та кінцевої точок кожного елемента схеми здійснюється за математичною формулою [17]

$$\dot{S}_B = \sqrt{3} \dot{U}_D \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_D, \quad (3.6)$$

Струм $\hat{I}_i$ в i -й вітці визначається за формулою:

$$\hat{I}_i = \hat{C}_i \hat{\mathbf{J}}, \quad (3.7)$$

Вектор втрат повної потужності у гілках схеми:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B^T = \sqrt{3} \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{U}}_D \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_D, \quad (3.8)$$

Після деяких перетворень отримаємо формулу:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B^T = \sqrt{3} \dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_D. \quad (3.9)$$

Згідно виразу (3.9) видно, втрати потужності в i -й гілці схеми розраховуються за виразом:

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{I}_i. \quad (3.10)$$

Підставивши вираз (3.9) в (3.10) маємо:

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{C}_i \hat{\mathbf{J}}. \quad (3.11)$$

З урахуванням того, що значення струмів

$$\hat{\mathbf{J}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\mathbf{U}}_D^{-1} \dot{\mathbf{S}},$$

то формулу (3.11) можна записати наступним чином:

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_D^{-1} \dot{\mathbf{S}} \quad (3.12)$$

Введемо в (3.12) позначення:

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_D^{-1} \quad (3.13)$$

Вектор $\dot{\mathbf{T}}_i$ містить коефіцієнти, які визначають, яку частку в загальних втратах в i -й гілці складає протікання повної потужності по ній від певного вузла [17]. Таким чином, беручи до уваги вирази (4.5) і (4.7) можна записати наступне:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B = \dot{\mathbf{T}} \cdot \dot{\mathbf{S}} \quad (3.14)$$

Дослідження, представлені у джерелі [17], вказують на залежність коефіцієнтів розподілу втрат електроенергії від декількох ключових факторів. По-перше, вони визначаються характеристиками заступної схеми електромережі, які за певних умов можна розглядати як константи. По-друге, істотний вплив мають показники напруги у вузлових точках електричної мережі (ЕМ), що формуються під впливом споживання та генерації електроенергії у відповідних вузлах схеми. Розрахунок елементів матричної структури на основі актуальних показників напруги у вузлових точках фактично відображає процес лінеаризації стану електромережі за умови фіксованих потужностей у вузлах. Як було зазначено раніше, у випадках, коли флуктуації потужності в вузлах електричної мережі (ЕМ) є незначними і не призводять до суттєвих коливань напруги, можна припустити, що

залежність втрат енергії в ЕМ від потужностей у її вузлових точках має лінійний характер.

Враховуючи це припущення та використовуючи формулу (3.14), для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на втрати потужності в дистрибутивних мережах з достатньою точністю можна застосовувати метод суперпозиції.

3.2.2. Розрахунок складових втрат потужності, що зумовлені наявністю СЕС в системах електропостачання. Згідно з дослідженням, представленим у джерелі [17], можна стверджувати, що компонент втрат потужності в електромережах, спричинений передачею енергії від відновлюваних джерел (ВДЕ), не обмежується лише впливом складових транзитного струму цих джерел. Важливо враховувати, що на цей показник також суттєво впливають інші електричні струми, які циркулюють у різних гілках електричної мережі (ЕМ). Ступінь впливу транзитного компонента втрат на параметри актуального стану електричної мережі (ЕМ) може бути кількісно оцінена за допомогою специфічних показників, відомих як коефіцієнти взаємовпливу, що детально описані в джерелі [17]:

$$\mu'_i = 1 + 2 \frac{I'_i}{J'_{\text{тр}}}; \quad \mu''_i = 1 + 2 \frac{I''_i}{J''_{\text{тр}}}; \quad (3.15)$$

З урахуванням (4.9) вираз для розрахунку втрат потужності в системі електропостачання від передачі потужності СЕС має вигляд:

$$\Delta P_{\text{тр}} = 3 \sum_{i \in M1} \left[J'^2_{\text{тр}} \mu'_i + J''^2_{\text{тр}} \mu''_i \right] R_i. \quad (3.16)$$

При транспортуванні енергії з відновлюваних джерел до користувача, підключеного до дистрибутивної мережі з ВДЕ (наприклад, окрема лінія 10

кВ чи сегмент системи 110 кВ з чітко визначеним централізованим постачальником), необхідно брати до уваги не лише втрати активної потужності, спричинені цільовою передачею електроенергії від відновлюваного джерела до споживача, а й компонент втрат, пов'язаний із доставкою енергії від головної підстанції до кінцевого користувача. Цей компонент бере до уваги енергетичні витрати, пов'язані з компенсацією розбіжностей між узгодженими та фактичними обсягами електропостачання. Крім того, він охоплює втрати, що виникають внаслідок цільових перетоків енергії в мережі.

Отже, загальний обсяг втрат активної потужності, спричинений відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) при транспортуванні електроенергії мережею до конкретного споживача, обчислюється наступним чином:

$$\Delta P_{\Sigma \text{тр}} = 3 \sum_{i \in M1} \left[J_{\text{тр}}'^2 \mu'_i + J_{\text{тр}}''^2 \mu''_i \right] R_i + 3 \sum_{j \in M2} \left[\Delta J_{\text{тр}}'^2 \mu'_{\Delta j} + \Delta J_{\text{тр}}''^2 \mu''_{\Delta j} \right] R_j . \quad (3.17)$$

Коефіцієнти $\mu'_{\Delta j}$ та $\mu''_{\Delta j}$ розраховуються за формулами:

$$\mu'_{\Delta j} = 1 + 2 \frac{I'_j}{\Delta J'_{\text{тр}}}; \quad \mu''_{\Delta j} = 1 + 2 \frac{I''_j}{\Delta J''_{\text{тр}}}; \quad (3.18)$$

$$\Delta J_{\text{тр}} = J_{\text{тр}} - J_{\text{тр}}^{\text{СП}} \quad (3.19)$$

Важливо взяти до уваги наступне: у випадках, коли договір на електропостачання передбачає виключно передачу активної потужності, для визначення $J_{\text{тр}}^{\text{СП}}$ необхідно враховувати тільки активний компонент транзитної потужності $P_{\text{тр}}$:

$$j_{\text{тр}}^{\text{СП}} = \frac{P_{\text{тр}}}{\sqrt{3}\hat{U}_{\text{СП}}} . \quad (3.20)$$

Величина струму, що відповідає потужності транзиту, визначається множинними факторами: конфігурацією електростанції, характеристиками встановлених генераторів, наявністю та ефективністю систем компенсації реактивної потужності, а також обладнанням для їх регулювання. У випадках, коли технологічний процес виробництва активної потужності на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ) невід'ємно пов'язаний із генерацією або споживанням реактивної складової, то

$$j_{\text{тр}} = \frac{\hat{S}_{\text{тр}}}{\sqrt{3}\hat{U}_{\text{ВДЕ}}} . \quad (3.21)$$

У ситуаціях, де відбувається повна компенсація реактивної складової в границях балансової приналежності відновлюваних джерел енергії, величина струму, що характеризує транзитний перетік потужності від такого джерела, розраховується

$$j_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{тр}}}{\sqrt{3}\hat{U}_{\text{ВДЕ}}} . \quad (3.22)$$

З огляду на вищезазначене, за умови абсолютної нейтралізації реактивної складової потужності обладнанням відновлюваних джерел енергії, їхній вплив на експлуатаційні режими електричних мереж суттєво знижується. Як наслідок, показники енергетичних втрат при цільовому транспортуванні електроенергії зазвичай демонструють нижчі значення, ніж у випадках одночасної передачі активного та реактивного компонентів

потужності. Проте існують специфічні ситуації, коли об'єкти відновлюваної енергетики здійснюють живлення віддалених сегментів електромережі. За таких обставин додаткова генерація реактивної складової потужності відновлюваними джерелами може позитивно впливати на параметри якості електропостачання в розподільчій системі.

3.3 Алгоритм визначення складової втрат потужності в системах електропостачання від впливу СЕС

Запропонований метод розрахунку втрат енергії в електричних мережах від індивідуальних, включаючи адресні, перетікань потужності надає можливість, базуючись на фізичних принципах, обчислити відповідні компоненти енергетичних втрат. Однак для розробки прикладних обчислювальних алгоритмів представлені математичні формулювання потребують вдосконалення щодо точності та зручності застосування. У актуальних підходах до оперативного аналізу, дослідження стабільних режимів електромереж здійснюється шляхом моделювання навантаження вузлових точок через еквівалентну сумарну потужність споживання. Беручи до уваги цю особливість, пропонується наступна послідовність дій для застосування вищезгаданої методики обчислення втрат при наявності окремого цільового (адресного) перетікання потужності в електричній мережі:

- здійснюється обчислення початкового стабільного стану електромережі, визначаються загальні показники втрат потужності та обсяги розсіювання електроенергії у системі, враховуючи реальні показники споживання електроенергії та генерацію від відновлюваних енергетичних джерел;

- для кожного вузла електромережі обчислюються прогнозовані величини струмових навантажень. Паралельно з цим проводяться розрахунки

потоків електроенергії, які характеризують обсяги та векторність цільового транспортування потужності $\dot{J}_{\text{тр}}$ та $\dot{J}_{\text{тр}}^{\text{СП}}$ між пунктами генерації та споживання.

– обчислюються два варіанти з визначеними параметрами споживання та генерації: у першому випадку розрахункові величини струмів навантажень для всіх вузлових точок ЕМ, крім $\dot{J}_{\text{тр}}$ та $\dot{J}_{\text{тр}}^{\text{СП}}$, а для другого випадку – лише задаючи струми ініціаторів транзиту (ВДЕ), або цільового перетікання (ВДЕ та споживач) потужності;

– проводиться аналіз розподілу електричних потоків у вітках електромережі та компоненти загальних енергетичних втрат потужності в ній, спричинені індивідуальними навантаженнями (окремо) та спрямованим транзитом (адресним перетоком) потужності ВДЕ.

Запропонований метод розрахунку дає змогу обчислювати розсіювання енергії, спричинене цільовим або наскрізним транспортуванням електрики, генерованої відновлюваними джерелами, через розподільчі системи. При наявності належного інформаційного забезпечення відкривається можливість здійснювати оперативний моніторинг цього компонента енергетичних втрат у електромережах. Це також дозволяє інтегрувати дану складову в алгоритми координації спільної роботи комплексу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Зокрема, це стосується каскаду малих гідроелектростанцій або комбінації малих ГЕС із сонячними електростанціями (СЕС), які генерують потужність для подальшої передачі в електричну мережу.

3.4 Визначення оптимального місця приєднання СЕС до системи електропостачання

Згідно з дослідженнями, зазначеними у джерелах [К1,18,19,20], інтеграція генераторів на основі відновлюваних ресурсів у локальні розподільчі мережі призводить до позитивних наслідків. Це пов'язано зі

зниженням навантаження на централізовану систему енергопостачання, що у свою чергу сприяє підвищенню ефективності всієї енергетичної інфраструктури. Зниження втрат потужності та електроенергії в мережах транспортування ВДЕ є одним з ключових переваг децентралізованої генерації. Це пов'язано з тим, що виробництво електроенергії відбувається ближче до споживача, що зменшує відстань передачі та, відповідно, втрати на лініях електропередач. У деяких ситуаціях спостерігається покращення стабільності подачі електроенергії. Проте, як було продемонстровано раніше, такий підхід застосовний виключно до ситуацій, коли потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та режими їхнього функціонування виявляються сумісними з обсягами споживання електроенергії на місцевому рівні, а також з особливостями структури та характеристиками електромережі. В результаті виникає необхідність ідентифікації оптимальних точок підключення та вдосконалення конфігурацій передачі енергії від альтернативних генераторів із визначеними параметрами.

3.4.1. Визначення множини можливих місць приєднання СЕС до системи електропостачання. Аналізуючи функціонування електричної мережі (ЕМ) у будь-який заданий момент, маючи інформацію про споживану потужність $\dot{S}_i = P_i + jQ_i$ та рівні напруги у вузлових $\dot{U}_i$ точках, з'являється можливість обчислити струмові параметри, що характеризують кожен вузол системи:

$$J_i = \frac{(P_{P_i} - jQ_{P_i}) - P_{ВДЕ_i}}{\sqrt{3}\dot{U}_i} = J_{P_i} - J_{ВДЕ_i} \quad (3.23)$$

Еквівалентна початковій нелінійній моделі для конкретного часового зрізу, лінеаризована модель усталеного режиму електромережі (ЕМ) формується шляхом відображення споживання та виробництва електроенергії у вузлах як обчислених струмів завдання. Цей підхід, описаний у ряді наукових праць, дозволяє спростити аналіз складних електроенергетичних систем.

Давайте проаналізуємо ситуацію, де відбувається передача енергії, виробленої відновлюваними джерелами (ВДЕ), через основну електромережу. Ця система характеризується наявністю трьох точок споживання та забезпечує розподіл електричної енергії від головного джерела живлення до трансформаторних вузлів, що працюють з напругою 10/0,4 кіловольт. Структура описаної електромережі візуалізована на рисунку 3.3.

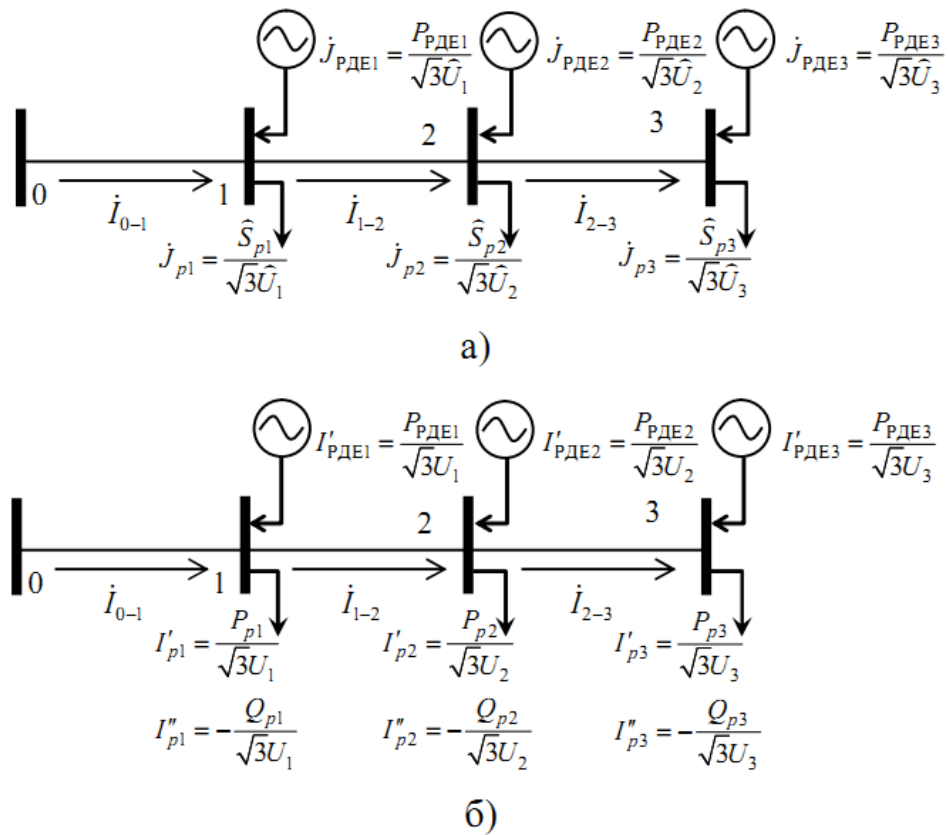


Рис. 3.3. Схема мережі, що ілюструє перетоки потужності мережі з СЕС

Споживання електроенергії у вузлових точках електромережі (ЕМ) характеризується величинами струму. При цьому, шунтуючі елементи, що входять до еквівалентної схеми заміщення ліній електропередачі (ЛЕП), враховуються як додаткові струмові компоненти при обчисленні сумарного навантаження вузлів.

У мережах напругою 10 кВ допустимо знехтувати реактивною складовою падіння напруги. Застосовуючи принцип суперпозиції, можна розглянути потоки енергії на магістральній ділянці (0-1) електромережі спостерігається узгоджений рух часткових струмів $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ та $\dot{I}_3$, які виникають внаслідок навантажень на окремих ТП 10/0,4 кВ та роботи відновлювальних джерел енергії ВДЕ.

Отже, дисипація електричної енергії у ЛЕП, що характеризується питомим опором R_{0-1} – дорівнюють:

$$\Delta P = 3 |\dot{I}_{0-1}|^2 R_{0-1} = 3 |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 R_{0-1}. \quad (3.24)$$

При представленні електричних струмів через їх реальні та імагінарні компоненти, математичне рівняння (3.24) трансформується наступним чином:

$$\Delta P_{\Sigma} = \left[(I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_1 + I''_2 + I''_3)^2 \right] R_{0-1}. \quad (3.25)$$

Розглянемо ситуацію, коли з реальних компонентів електричних струмів у рівнянні (3.25) виокремлюємо складові I'_{PDE_1} , I'_{PDE_2} , I'_{PDE_3} ($I'_1 = I'_{P_1} - I'_{PDE_1}$ і т.д.), то отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta P_{0-1} = & \left[(I'_{P_1} + I'_{P_2} + I'_{P_3})^2 + (I''_{P_1} + I''_{P_2} + I''_{P_3})^2 - \right. \\ & - \left\{ 2(I'_{PDE_1} + I'_{PDE_2} + I'_{PDE_3})(I'_{P_1} + I'_{P_2} + I'_{P_3}) + \right. \\ & \left. \left. + (I'_{PDE_1} + I'_{PDE_2} + I'_{PDE_3})^2 \right\} \right] R_{0-1}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Аналіз рівняння (3.26) демонструє, що варіації у втратах енергії, спричинені інтеграцією ВДЕ залежать не лише від їхньої миттєвої генерації, враховується потужність $P_{ВДЕ_i}$ (враховується відповідним значенням струму $I_{ВДЕ_i}$). Однак, що є більш суттєвим, на ці зміни впливає співвідношення між активними компонентами струмів споживання I'_{P_i} та струмів генерованих ВДЕ $I'_{ВДЕ_i}$. Розглядаються певні струми, які вважаються активними у припущенні передбачається відсутність поперечної компоненти падіння напруги в системі ЕМ та повна нейтралізація реактивної потужності в межах зони відповідальності відповідних станцій.

Виходячи з вказаного рівняння (2.6), можна представити втрати енергії в електромережі (ЕМ) після інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) як суму двох ключових компонентів:

$$\Delta P_{\Sigma_ВДЕ} = \Delta P + \delta P_{ВДЕ} . \quad (3.27)$$

На основі аналізу компоненти, що залишилась після розкладу рівняння (3.27), та застосувавши серію математичних трансформацій, подібно до методології, описаної в науковій роботі [19], можливо вивести математичні формули, які відображають динаміку енергетичних втрат у електричній мережі внаслідок інтеграції відновлюваних джерел енергії у визначених точках приєднання системи:

$$\delta P_{(I'_{ВДЕ_1})} = 3I'^2_{ВДЕ_1} \left(\frac{I'_{ВДЕ_2} + I'_{ВДЕ_3}}{I'_{ВДЕ_1}} + \frac{I'_{ВДЕ_1} + 2I'_{\Sigma}}{I'_{ВДЕ_1}} \right) R_{0-1} \quad (3.28 \text{ а})$$

$$\delta P_{(I'_{ВДЕ_2})} = 3I'^2_{ВДЕ_2} \left(\frac{I'_{ВДЕ_1} + I'_{ВДЕ_3}}{I'_{ВДЕ_2}} + \frac{I'_{ВДЕ_2} + 2I'_{\Sigma}}{I'_{ВДЕ_2}} \right) R_{0-1} . \quad (3.28 \text{ б})$$

$$\delta P_{(I'_{PDE_3})} = 3I_{PDE_3}^2 \left(\frac{I'_{PDE_1} + I'_{PDE_2}}{I'_{PDE_3}} + \frac{I'_{PDE_3} + 2I'_{\Sigma}}{I'_{PDE_3}} \right) R_{0-1} \quad (3.28 \text{ в})$$

Після систематизації формул (3.28) та впровадження умовних позначень, що узгоджуються з методологією, викладеною у дослідженні [19], розроблено математичну модель для обчислення ефекту від впровадження відновлюваних джерел енергії у конкретній точці i на величину дисипації активної потужності у заданому сегменті k розгалуженої електромережі довільної топології, враховуючи попередньо окреслені спрощення та обмеження.

$$\delta P_k(I'_{PDE_i}) = 3I_{PDE_i}^2 \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{PDE_j}}{I'_{PDE_i}} - \frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{P_j}}{I'_{PDE_i}} \Sigma \right] R_k \quad (3.29)$$

Інтегральна оцінка змін енергетичних втрат у всіх сегментах розподільчої електромережі, через які здійснюється передача генерованої потужності від відновлюваного джерела енергії, розміщеного у точці i , до головної підстанції живлення, може бути математично представлена наступною формулою, що характеризує сумарний вплив на дисипацію потужності:

$$\begin{aligned} \delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_i}) &= \sum_{k \in M_i} \delta P_k(I'_{PDE_i}) = \sum_{k \in M_i} \left[3I_{PDE_i}^2 \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{PDE_j}}{I'_{PDE_i}} - \frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{P_j}}{I'_{PDE_i}} \Sigma \right] R_k \right] = \\ &= 3I_{PDE_i}^2 \left\{ \sum_{k \in M_i} \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{PDE_j}}{I'_{PDE_i}} R_k \right] - \sum_{k \in M_i} \left[\frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{P_j}}{I'_{PDE_i}} \Sigma R_k \right] \right\} = \end{aligned}$$

$$= 3I_{PDE_i}^2 \left(R_{\Sigma}^{3\delta}(I'_{PDE_i}) - R_{\Sigma}^{3M}(I'_{PDE_i}) \right) \quad (3.30)$$

Аналіз формули (3.30) демонструє, що динаміка енергетичних втрат у лініях електропередачі при інтеграції відновлюваного джерела енергії у точці i визначається комплексом факторів: не лише величиною згенерованого струму, а й поточними значеннями струмових навантажень споживачів та генерацією інших ВДЕ, що спільно формують загальний струморозподіл у заданій лінії. Зазначений взаємозв'язок факторів є критично важливим при визначенні оптимальних точок підключення та розробці режимів функціонування генераторів на базі відновлюваних джерел енергії для забезпечення максимальної ефективності електромережі. Таким чином, модифікацію рівня втрат ЕМ, спричинену інтеграцією ВДЕ, можна кількісно оцінити еквівалентного опору розподільчої системи $R_{\Sigma}^{PDE}(I'_{PDE_i})$ який визначається для маршруту передачі потужності ВДЕ i -го вузла:

$$R_{\Sigma}^{PDE}(I'_{PDE_i}) = R_{\Sigma}^{3\delta}(I'_{PDE_i}) - R_{\Sigma}^{3M}(I'_{PDE_i}),$$

$$R_{\Sigma}^{3\delta}(I'_{PDE_i}) = \sum_{k \in M_i} \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{PDE_j}}{I'_{PDE_i}} R_k \right], \quad R_{\Sigma}^{3M}(I'_{PDE_i}) = \sum_{k \in M_i} \left[\frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{P_j}}{I'_{PDE_i}} R_k \right] \quad (3.31)$$

Зазначений еквівалентний опір формується з двох ключових компонентів, що відображають різні аспекти впливу на електричну мережу:

$R_{\Sigma}^{3\delta}(I'_{PDE_i})$ – відповідник активного опору, що призводить до зростання загального імпедансу електричної мережі щодо проходження електричного струму I'_{PDE_i} . Як наслідок, це спричиняє збільшення обчислюваного

показника втрат енергії в системі, зумовлених інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у конкретній точці приєднання і.

$R_{\Sigma}^{3M}(I'_{PDE_i})$ – компонент відображає зниження загального імпедансу електромережі (ЕМ) і, як наслідок, скорочення енергетичних втрат у системі, спричинене інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у визначеній точці приєднання і.

Вказані компоненти імпедансу демонструють варіативність залежно від величини та спрямованості розрахункових струмів навантаження, а також струмів, генерованих відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Ці струми циркулюють у гілках електромережі (ЕМ) і зумовлюються перетіканням активної потужності до трансформаторних підстанцій (ТП) 10/0,4 кВ або від них.

Таким чином, можна зробити деякі висновки

- дотримання зазначеної умови $R_{\Sigma}^{3M} \neq 0$ ($0 \leq R_{\Sigma}^{3M} \leq +\infty$) свідчить про позитивний вплив інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на електромережу (ЕМ). Цей ефект проявляється у скороченні втрат потужності та електроенергії, а також опосередковано призводить до зменшення падіння напруги в системі.

- задоволення вказаної умови $R_{\Sigma}^{3\phi} > R_{\Sigma}^{3M}$ ($R_{\Sigma}^{3M} \leq R_{\Sigma}^{3M} \leq +\infty$) вказує на підвищення рівня втрат в електромережі (ЕМ). Це явище може виникати внаслідок двох основних факторів: реконфігурації потоків потужності або через вплив відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), під'єднаних до прилеглих вузлів системи.

Спираючись на аналіз еквівалентних опорів, зазначених у формулі (4.29), можна визначити оптимальну конфігурацію вузлів електричної мережі для інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ця оптимізація має на меті досягнення двох ключових цілей: мінімізацію втрат потужності в конкретному режимі роботи та зниження втрат електроенергії протягом

визначеного часового інтервалу. Ключовими факторами для успішної оптимізації в цьому контексті є наявність належної інформаційної бази та стабільність конфігурації електромережі (ЕМ). У практичних сценаріях функціонування електричних мереж (ЕМ) розподільного типу, трансформації в їхній структурі створюють певні труднощі при визначенні оптимальних схем підключення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ця ситуація вимагає проведення комплексу симуляційних обчислень, які враховують потенційні модифікації стандартної конфігурації ЕМ.

Беручи до уваги вищезазначене, можна виділити два основні підходи до селекції перспективних локацій для інтеграції ВДЕ в існуючу інфраструктуру:

- інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) відповідно до стратегії мінімізації ризиків передбачає вибір локації максимально наближеної до трансформаторних підстанцій з напругою 110(35)/10 кВ. Такий підхід гарантує, що незалежно від флуктуацій споживання електроенергії та змін у конфігурації електромереж, вплив ВДЕ на енергетичні втрати та коливання напруги в системі буде зведено до мінімуму, охоплюючи як потенційні негативні, так і позитивні ефекти.;

- інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) за концепцією максимальної ефективності передбачає стратегічний вибір точок підключення. Ця стратегія спрямована на оптимізацію розподілу енергії, враховуючи потенціал скорочення втрат потужності в електромережах (ЕМ). За такого підходу можливе значне скорочення енергетичних втрат, однак ступінь ефективності залежить від кількох ключових факторів. Зокрема, вирішальну роль відіграє співвідношення між генеруючою потужністю відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та загальним навантаженням електромережі (ЕМ). Зважаючи на викладену інформацію, визначення оптимальної локації для інтеграції та схеми розподілу потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) потребує ґрунтовного аналізу.

Ключовим аспектом цього процесу є дослідження чутливості енергетичних втрат у електромережах (ЕМ) до варіацій їхніх параметрів.

3.4.2 Визначення місця приєднання СЕС до системи електропостачання за результатами аналізу чутливості. Дослідимо проблему оптимального розміщення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), керуючись принципом мінімізації енергетичних втрат. Варто зазначити, що недостатній рівень інформаційного забезпечення на етапі проєктування значно ускладнює процес визначення оптимальності для різних сценаріїв інтеграції ВДЕ. У контексті невизначеності при проєктуванні схем приєднання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) доцільно розглядати не точкові значення критеріїв оптимальності, а їхні інтервали невизначеності. Такий підхід відкриває нові можливості для оптимізації процесу інтеграції ВДЕ та раціоналізації витрат. Після проведення комплексного аналізу доцільності інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у попередньо визначених вузлах електромережі, враховуючи їх експлуатаційні та технічні характеристики, та ідентифікації найбільш перспективних локацій, наступним критичним етапом стає прийняття остаточного рішення. Цей процес передбачає оптимізацію розрахункової потужності ВДЕ з метою максимального наближення до їх встановленої потужності. При визначенні оптимальної потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) рекомендується застосувати аналіз чутливості як ефективний метод оцінювання.

На основі формули (3.30) можна математично описати, як змінюються енергетичні втрати в електричній мережі внаслідок інтеграції відновлюваних джерел енергії у вузол, що характеризується максимальною електричною віддаленістю :

$$\begin{aligned}
\delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_3}) = & 3I_{PDE_3}^2 \left(\frac{I'_{PDE_1} + I'_{PDE_2}}{I'_{PDE_3}} + \frac{I'_{PDE_3} - 2(I'_{P_1} + I'_{P_3} + I'_{P_3})}{I'_{PDE_3}} \right) R_{0-1} + \\
& + 3I_{PDE_3}^2 \left(\frac{I'_{PDE_2}}{I'_{PDE_3}} + \frac{I'_{PDE_3} - 2(I'_{P_1} + I'_{P_3} + I'_{P_3})}{I'_{PDE_3}} \right) R_{1-2} + \\
& + 3I_{PDE_3}^2 \left(\frac{I'_{PDE_3} - 2(I'_{P_1} + I'_{P_3} + I'_{P_3})}{I'_{PDE_3}} \right) R_{2-3}.
\end{aligned} \tag{3.32}$$

В результаті застосування математичних спрощень та алгебраїчних трансформацій, можемо представити кінцеву формулу у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
\delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_3}) = & 3I_{PDE_3}^2 \left[\frac{I'_{PDE_1} - 2I'_{P_1}}{I'_{PDE_3}} R_{0-1} + \frac{I'_{PDE_2} - 2I'_{P_2}}{I'_{PDE_3}} (R_{0-1} + R_{1-2}) + \right. \\
& \left. + \frac{I'_{PDE_2} - 2I'_{P_2}}{I'_{PDE_3}} (R_{0-1} + R_{1-2}) + \frac{I'_{PDE_3} - 2I'_{P_3}}{I'_{PDE_3}} (R_{0-1} + R_{1-2} + R_{2-3}) \right]
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Поширюючи отриманий математичний результат на електричні мережі будь-якої структури та складності, можемо сформулювати універсальне рівняння:

$$\delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_k}) = 3I_{PDE_k}^2 \left[\sum_{i=1}^n (I'_{PDE_i} - 2I'_{P_i}) \sum_{j=\mathbf{M}_{ki}}^n R_j \right] \tag{3.34}$$

Для кількісної оцінки впливу варіацій генерації відновлюваного джерела на енергетичні втрати в мережі, доцільно застосувати математичний апарат диференціального числення. Зокрема, визначення похідної функції втрат відносно потужності ВДЕ, що інтегроване у вузол 3 аналізованої схеми, дозволяє охарактеризувати чутливість системи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_3})}{\partial I'_{PDE_3}} = & 6 \left[\left(\frac{1}{2} I'_{PDE_1} + I'_{P_1} \right) R_{0-1} + \right. \\ & + \left(\frac{1}{2} I'_{PDE_2} + I'_{P_2} \right) (R_{0-1} + R_{1-2}) + \\ & \left. + (I'_{PDE_3} + I'_{P_3}) (R_{0-1} + R_{1-2} + R_{2-3}) \right] \end{aligned} \quad (3.35)$$

або узагальнюючи на випадок розімкненої мережі довільної конфігурації:

$$\frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_k})}{\partial I'_{PDE_k}} = 6 \left\{ \left[(I'_{PDE_k} - I'_{P_k}) \sum_{j=M_{kk}}^n R_j \right] + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \left[\left(\frac{1}{2} I'_{PDE_i} - I'_{P_i} \right) \sum_{j=M_{ki}}^n R_j \right] \right\} \quad (3.36)$$

На основі аналітичних виразів для кожного з m потенційних вузлів підключення відновлюваних джерел енергії, визначених за попередньо описаною методикою, формується комплексна система лінійних алгебраїчних рівнянь.

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_k})}{\partial I'_{PDE_k}} = 0; \\ \frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{PDE_m})}{\partial I'_{PDE_m}} = 0, \end{cases} \quad (3.37)$$

Розв'язок цієї системи дає можливість обчислити оптимальні значення генеруючих потужностей ВДЕ для кожної точки приєднання. Число рівнянь у сформованій математичній системі безпосередньо корелює з кількістю ідентифікованих вузлів, придатних для інтеграції відновлюваних джерел енергії. Після обчислення оптимальних значень генеруючих потужностей проводиться порівняльний аналіз для виявлення такої точки приєднання в

електричній мережі, де різниця між теоретично розрахованою оптимальною та фактично доступною для встановлення потужністю ВДЕ є найменшою.

Запропонований методологічний підхід, що ґрунтується на детальному дослідженні залежності енергетичних втрат від параметрів мережі, забезпечує чітку та обґрунтовану оцінку раціональності інтеграції відновлюваних джерел у конкретних точках приєднання. Такий метод враховує комплекс факторів, що впливають на ефективність функціонування розподільчих електромереж.

Висновки до розділу

1. Для досягнення максимальної техніко-економічної ефективності при інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в розподільні електричні мережі необхідно застосовувати комплексний підхід, що охоплює як економіко-правові, так і технічні аспекти. Такий підхід створює передумови для нарощування обсягів виробництва "зеленої" енергії, оптимізації енергетичних втрат у мережах розподілу, а також підвищення якісних показників та надійності енергопостачання кінцевих споживачів.

2. Для оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх інтеграції в існуючі електроенергетичні системи (ЕЕС) необхідно провести глибокий аналіз їхніх специфічних характеристик та нових властивостей, які проявляються при сумісній роботі з традиційними джерелами енергії. Це вимагає вдосконалення математичного апарату та методологій розрахунку, зокрема для оцінки втрат електроенергії, спричинених взаємними та адресними перетоками в розподільних електричних мережах (РЕМ). Такий підхід дозволить точніше оцінити вплив конкретних ВДЕ на режимні параметри та техніко-економічні показники РЕМ, а також визначити оптимальну стратегію інтеграції розосередженої генерації в систему електропостачання.

3. Ключовим аспектом для максимізації ефективності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є стратегічне визначення оптимальної локації їх інтеграції до електромережі. Процес оптимізації схем підключення генераторів на основі ВДЕ до електричної інфраструктури з порівнянною загальною потужністю споживання має ґрунтуватися на ретельному аналізі чутливості впливу цих джерел на операційні параметри розподільчих електромереж (РЕМ).

4. Для створення високоефективної системи автоматизованого управління генерацією електроенергії з використанням керованих і умовно-керованих відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також для розробки аналітичних критеріїв оптимальності режимів функціонування таких електростанцій у розподільчих електромережах (РЕМ), необхідно здійснити адаптацію існуючих математичних моделей та методів. Ця адаптація повинна враховувати сучасні вимоги ринку електроенергії та особливості електропостачання за двосторонніми договорами.

5. У рамках вдосконалення функціонування розподільних електромереж з впровадженням концепції SMART Grid, раціональним та ефективним рішенням є застосування адаптивної системи керування комплексами відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), побудованої за двоконтурною схемою. Така архітектура забезпечує комплексний моніторинг, що передбачає безперервне відстеження параметрів роботи ВДЕ за допомогою автоматизованих локальних підсистем, які здійснюють збір, зберігання та обробку даних у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

У галузі електроенергетики наявний широкий спектр методологій для дослідження функціонування електропостачальних комплексів, включаючи гібридні системи. Ці підходи охоплюють як практичні експерименти, так і теоретичні обчислення.

Серед різноманітних підходів до вивчення електропостачальних систем особливе місце посідає використання цифрових симуляційних моделей. Цей метод набув широкого поширення завдяки своїй ефективності та гнучкості.

Для виконання комплексного аналізу функціонування гібридної електропостачальної системи з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) потрібно розв'язати наступні ключові задачі:

- розробка математичної моделі сонячної електростанції (СЕС), зосередимось на її ключовому компоненті – фотоелектричній установці (ФЕУ).

- створити цифрову симуляційну програму для моделювання гібридної енергетичної системи, що включає сонячну електростанцію (СЕС).

Четверта частина цього дослідження зосереджується на розв'язанні вищезгаданих завдань.

4.1 Математична модель СЕС

Розрахунок вихідної потужності фотоелектричної батареї (ФЕБ) виконується за наступною формулою [2]

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{зе.}} \frac{\bar{I}_{\beta}(t)}{I_{\text{су}}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})] ; \quad (4.1)$$

Схема заміщення сонячної батареї показана на рис. 4.1.

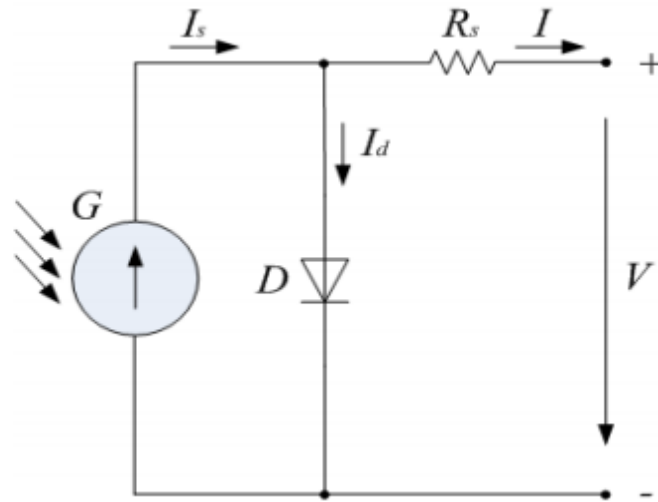


Рис. 4.1. Схема заміщення сонячної батареї

Галузевий стандарт визначає базові умови тестування фотоелектричних батарей (ФЕБ), де інтенсивність сонячної радіації становить $I_{\text{су}} = 1 \text{ кВт/м}^2$, а робоча температура панелі дорівнює $\vartheta_{\text{ФЕБ}} = 25^\circ\text{C}$. Характеристики сонячних модулів, виміряні за таких контрольованих умов, класифікуються як їхні номінальні показники.

Якщо знехтувати зміною потужності батареї зі зміною її температури, то вираз (4.1) набуває вигляду:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} k_{\text{з.е.}} \frac{\bar{I}_{\text{Б}}(t)}{I_{\text{су}}} ; \quad (4.2)$$

Термічний стан фотоелектричного блоку (ФЕБ) визначається температурою його зовнішнього шару. Коли настає ніч, тепловий режим поверхні сонячної панелі врівноважується з навколишнім повітрям. Однак

під час сонячного опромінення температура ФЕБ може значно перевищити атмосферні показники, іноді на понад 30 градусів за Цельсієм.

Термічний режим фотоелектричного модуля можна визначити, використовуючи принцип енергетичного балансу [4]. Це рівняння відображає взаємозв'язок між сонячним випромінюванням, що потрапляє на поверхню ФЕБ, генерованою електричною енергією та тепловим обміном з навколишнім середовищем:

$$\tau \alpha I_{\beta}(t) = \eta_{\text{ФЕБ}} I_{\beta}(t) + \alpha_{\text{ФЕБ}} [\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_0(t)] ; \quad (4.3)$$

Розв'язавши рівняння (4.3) відносно $\vartheta_{\text{ФЕБ}}$, маємо:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha} \right) ; \quad (4.4)$$

Оскільки $\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ пряме вимірювання цього параметра є надзвичайно складним з технічної точки зору, зазвичай спираються на специфікації, надані виробниками обладнання. За умов холостого ходу рівняння (4.4) трансформується наступним чином:

$$\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}} = \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}} ; \quad (4.5)$$

З метою оптимізації розрахунків приймемо допущення $\frac{\tau \alpha}{\alpha_{\text{ФЕБ}}}$ про незмінність параметра . За таких умов математичний вираз (4.4) можна трансформувати та записати наступним чином:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + I_{\beta}(t) \frac{\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha} \right); \quad (4.6)$$

Для спрощення розрахунків приймемо припущення, що $\tau \alpha = 0,9$ [4].

Це можна виразити як $\frac{\eta_{\text{ФЕБ}}}{\tau \alpha}$ оскільки числове значення цього відношення суттєво менше за одиницю, таке припущення не призводить до значних відхилень у результатах обчислень.

Припустимо, що механізм управління фотоелектричною батареєю (ФЕБ) здатний самостійно забезпечувати оптимальний режим функціонування, за якого досягається найвища продуктивність. Такий підхід гарантує, що коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричної системи постійно перебуває на піковому рівні:

$$\eta_{\text{ФЕБ}} = \eta_{\text{ФЕБ max}}; \quad (4.7)$$

Враховуючи вираз (4.7) рівняння (4.6) має вигляд:

$$\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\text{ФЕБ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{ФЕБ max}}(t)}{\tau \alpha} \right); \quad (4.8)$$

$\eta_{\text{ФЕБ max}}$ залежить від температури наступним чином:

$$\eta_{\text{ФЕБ max}}(t) = \eta_{\text{ФЕБ max су}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\text{ФЕБ}}(t) - \vartheta_{\text{су}})]; \quad (4.9)$$

Підставивши формулу (4.9) у (4.8) маємо:

$$\vartheta_{\Phi EB}(t) = \vartheta_0(t) + (\vartheta_{\Phi EB \text{ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\Phi EB \text{ max CY}} [1 + \alpha_P (\vartheta_{\Phi EB}(t) - \vartheta_{CY})]}{\tau \alpha} \right); \quad (4.10)$$

Після перетворень виразу (4.10) маємо формулу для визначення температури батареї в момент часу t :

$$\vartheta_{\Phi EB}(t) = \frac{\vartheta_0(t) + (\vartheta_{\Phi EB \text{ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{\eta_{\Phi EB \text{ max CY}} (1 - \alpha_P \vartheta_{CY})}{\tau \alpha} \right)}{1 + (\vartheta_{\Phi EB \text{ ном}} - \vartheta_{0 \text{ ном}}) \frac{I_{\beta}(t)}{I_{\text{ном}}} \frac{\eta_{\Phi EB \text{ max CY}} \alpha_P}{\tau \alpha}}; \quad (4.11)$$

Значення $\eta_{\Phi EB \text{ max CY}}$ можливо розрахувати за виразом:

$$\eta_{\Phi EB, \text{ max CY}} = \frac{P_{\Phi EB \text{ ном}}}{F_{\Phi EB} I_{CY}}; \quad (4.12)$$

Електрична потужність, яку генерують фотоелектричні панелі, безпосередньо залежить від інтенсивності сонячної радіації, що потрапляє на їх поверхню. Математичне співвідношення між силою струму, що виробляється фотоелементами, та рівнем освітленості можна описати наступним чином:

$$I_{\Phi EY} = I_{SCS} \frac{G_{\alpha}}{G_{\alpha s}}; \quad (4.13)$$

Слід зазначити наявність незначного температурного коефіцієнта, який зазвичай становить кілька $\text{mA}/^{\circ}\text{C}$, що використовується для компенсації температурних коливань. У контексті нашого дослідження цим корегувальним параметром можна знехтувати через його мінімальний вплив

на результати. На графіку 4.2 відображено вольт-амперні характеристики фотоелектричних модулів при варіюванні інтенсивності сонячної радіації.

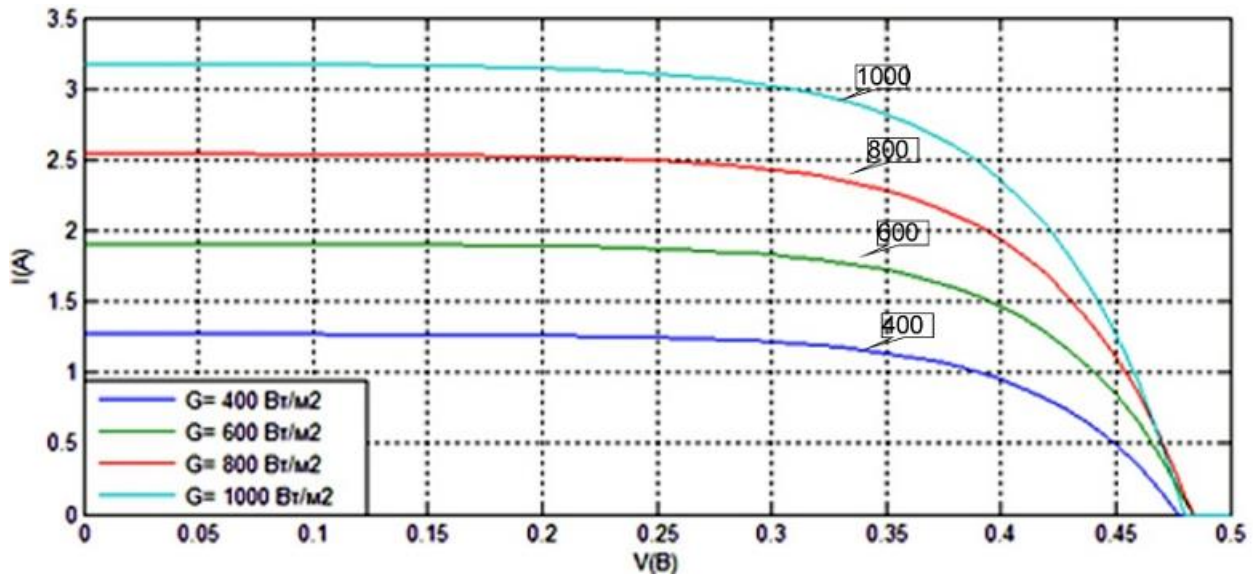


Рис. 4.2. Сімейство ВАХ сонячних батарей

Отже, математичне рівняння, представлене формулою (4.13), може слугувати надійною основою для створення цифрових симуляційних моделей гібридних систем енергозабезпечення, що включають сонячні електростанції (СЕС).

4.2 Комп'ютерні моделі системи електропостачання з СЕС

Цифрова симуляційна модель гібридної системи енергозабезпечення з фотоелектричною станцією формується шляхом інтеграції віртуальних компонентів, що відповідають реальним елементам установки. На зображенні 4.3 продемонстровано базову структурну схему такої комбінованої енергосистеми, для котрої було створено комплексну комп'ютерну модель.

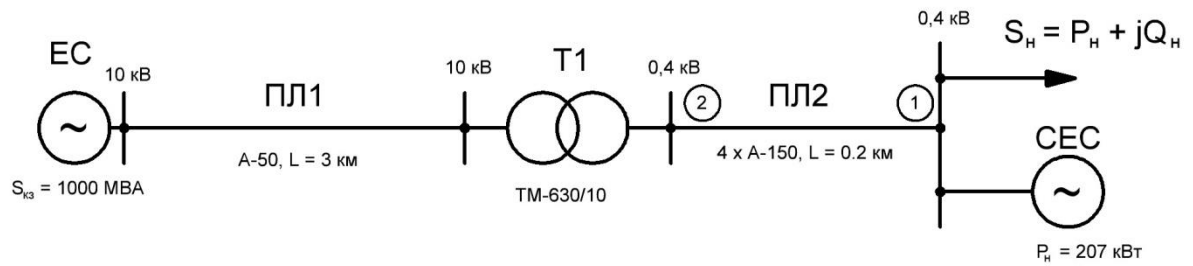
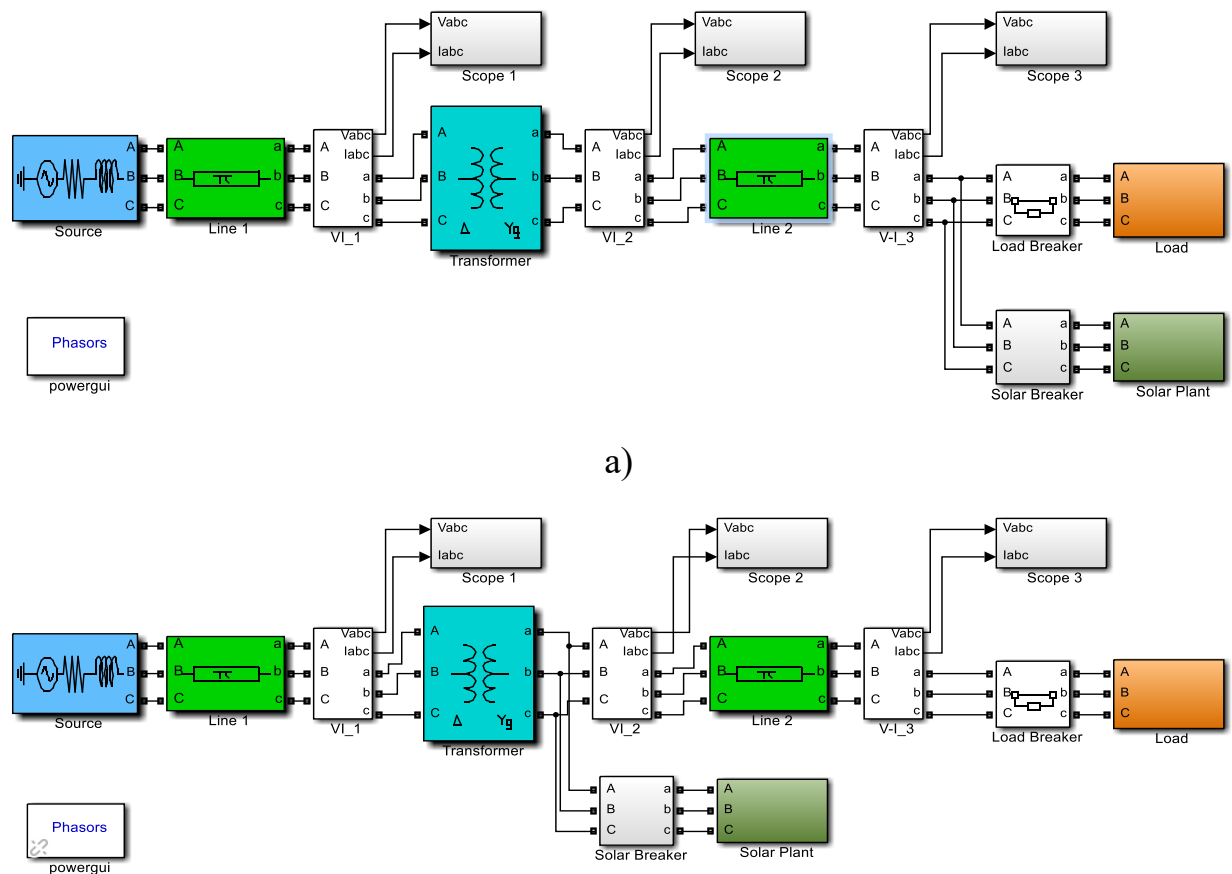


Рис. 4.3. Схема системи електропостачання з СЕС

На ринку представлено різноманітне програмне забезпечення для створення цифрових симуляцій енергетичних систем. У контексті даного дослідження вибір було зроблено на користь потужного інструментарію Matlab/Simulink, зокрема застосовувались компоненти з бібліотеки SimPowerSystems для моделювання складових енергосистеми.

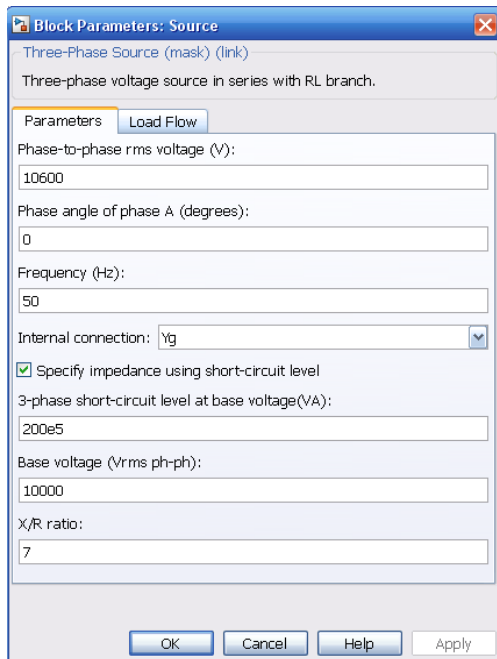
На рис. 4.4 приведена схема комп'ютерної моделі Matlab/Simulink системи електропостачання з СЕС.



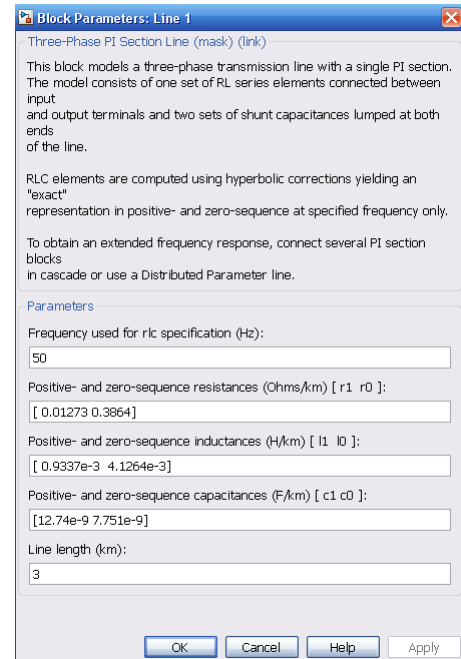
б)

Рис. 4.4. схема комп'ютерної моделі Matlab/Simulink системи електропостачання з СЕС:

а – приєднання СЕС до т. 1; б – приєднання СЕС до т. 2.

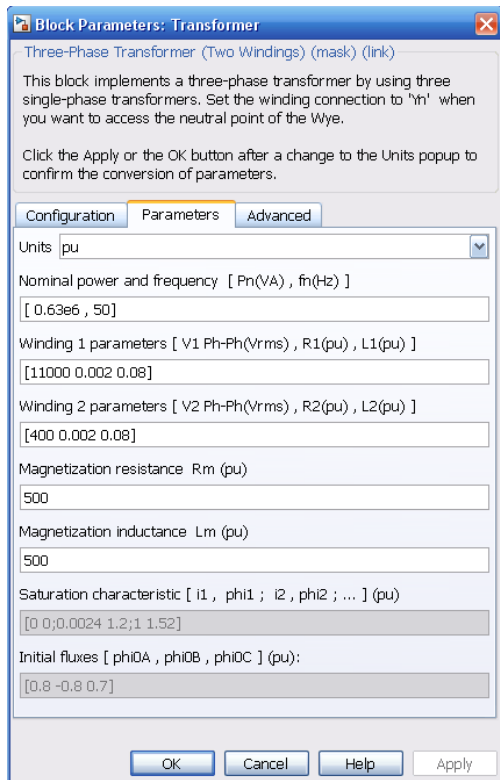


а)

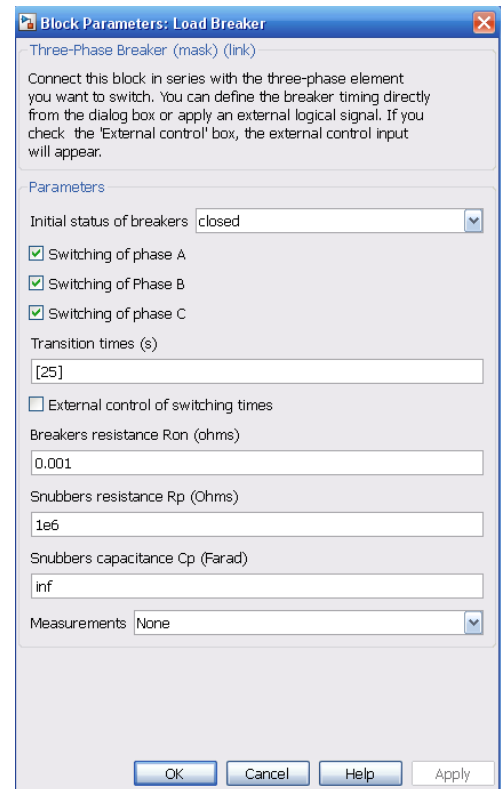


б)

Рис. 4.5. Вікна налаштувань параметрів елементів Source і Line 1



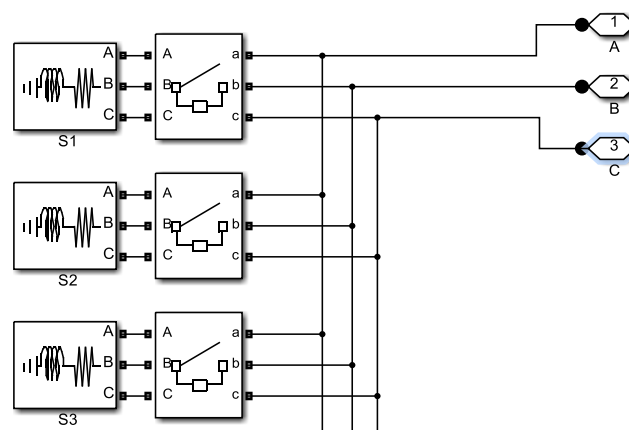
a)

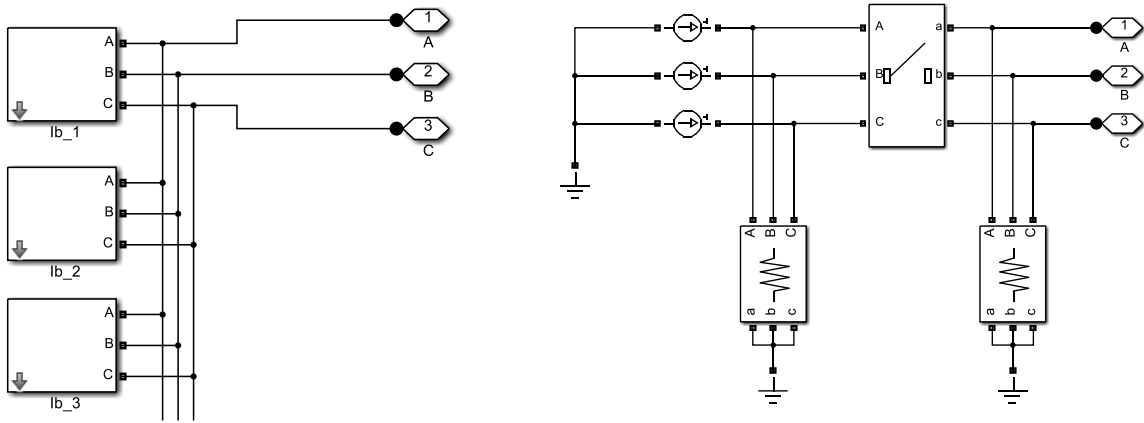


б)

Рис. 4.6. Вікна налаштувань параметрів елементів Transformer і Load Breaker

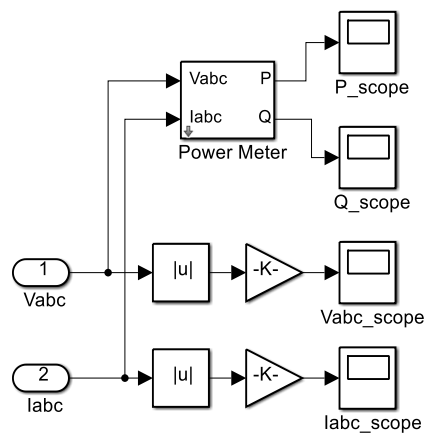
Модель блоку *Load* приведена на рис. 4.7, а блоки *Solar Plant* – на рис. 4.8.

Рис. 4.7. Модель блоку *Load*

Рис. 4.8. Модель блоку *Solar Plant*

Специфіка організації структурних елементів даних у блоках зумовлена відсутністю в бібліотеці SimPowerSystems моделі, здатної відтворювати навантаження чи генерацію, що змінюються з плином часу. Через це виникла необхідність у моделюванні флуктуацій електричних навантажень та обсягів виробництва енергії сонячними електростанціями (СЕС) відповідно до заданих графіків. Це реалізується шляхом використання окремих блоків навантаження, що функціонують як трифазні джерела струму, для кожного визначеного інтервалу усереднення.

Моделі блоків *Scope 1 ... Scope 3* показані на рис. 4.9.

Рис. 4.9. Моделі блоків *Scope 1 ... Scope 3*

4.3 Комп'ютерне моделювання режимів роботи системи електропостачання з СЕС

Комп'ютерна симуляційна модель, розроблена у розділі 4.2 дисертації, надає можливість здійснювати всебічний аналіз функціонування інтегрованої енергосистеми з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Цей цифровий інструмент дозволяє не лише оцінювати режими роботи, але й обчислювати рівні напруги у ключових точках схеми та визначати енергетичні втрати в компонентах електромережі.

Ключові цілі дослідження функціонування інтегрованої енергосистеми, що включає відновлювані джерела енергії (ВДЕ), за допомогою комп'ютерного симулювання охоплювали такі аспекти:

- оцінити ступінь впливу відновлюваних джерел енергії на параметри напруги за різних сценаріїв інтеграції сонячних електростанцій (СЕС) до існуючої електромережі;
- проведення детального аналізу рівня дисипації енергії в компонентах електромережі за різноманітних сценаріїв підключення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Розглянувши детально принципову схему інтегрованої системи енергозабезпечення (зображену на рисунку 4.3), можна зробити висновок про наявність двох потенційних точок підключення сонячної електростанції (СЕС). Перша опція - це вузол 1, який знаходиться безпосередньо на низьковольтних шинах підприємства з напругою 0,4 кВ. Альтернативний варіант представляє собою вузол 2, розташований на шинах понижувальної трансформаторної підстанції, що перетворює напругу з 10 кВ на 0,4 кВ. Безумовно, альтернативний спосіб інтеграції сонячної електростанції (СЕС) може бути взятий до уваги, враховуючи гіпотетичну ситуацію, де електрична лінія Л2 перебуває на балансовому обліку компанії. При цьому важливо, щоб

не виникало жодних логістичних чи технічних перепон, які могли б ускладнити процес підключення СЕС за цим сценарієм.

На діаграмах 4.10 - 4.25 представлені підсумки віртуального експерименту, що моделює характеристики функціонування інтегрованої енергосистеми при варіативних сценаріях підключення сонячної електростанції (СЕС) до наявної електромережі.

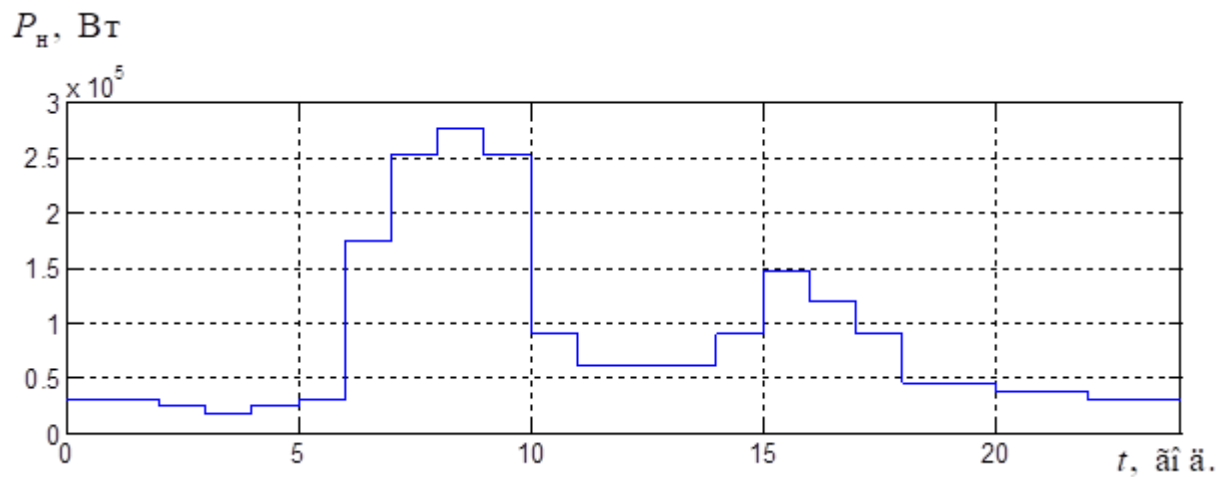


Рис. 4.10. Добовий графік P_n

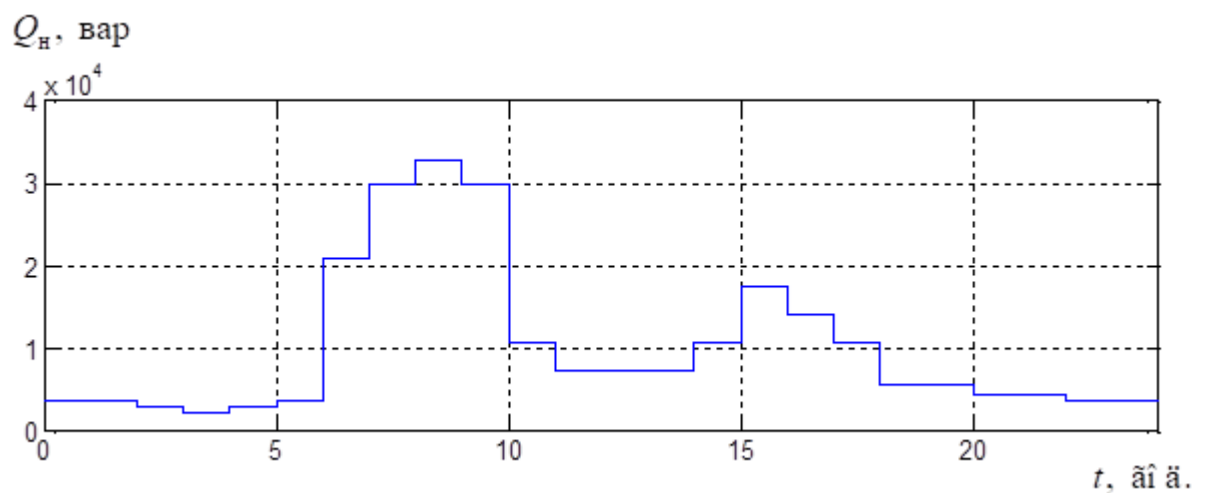


Рис. 4.11. Добовий графік Q_n

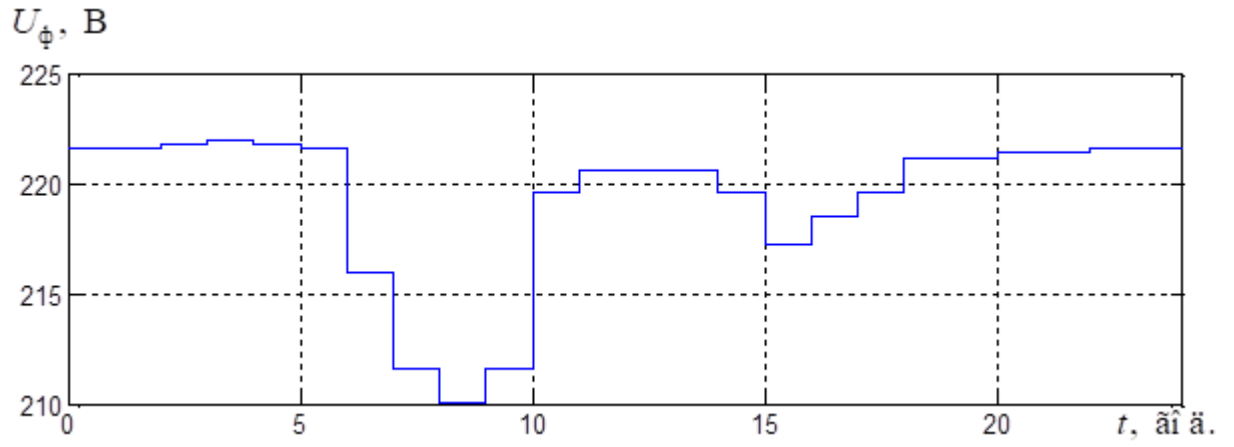


Рис. 4.12. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 1 схеми (СЕС відключена)

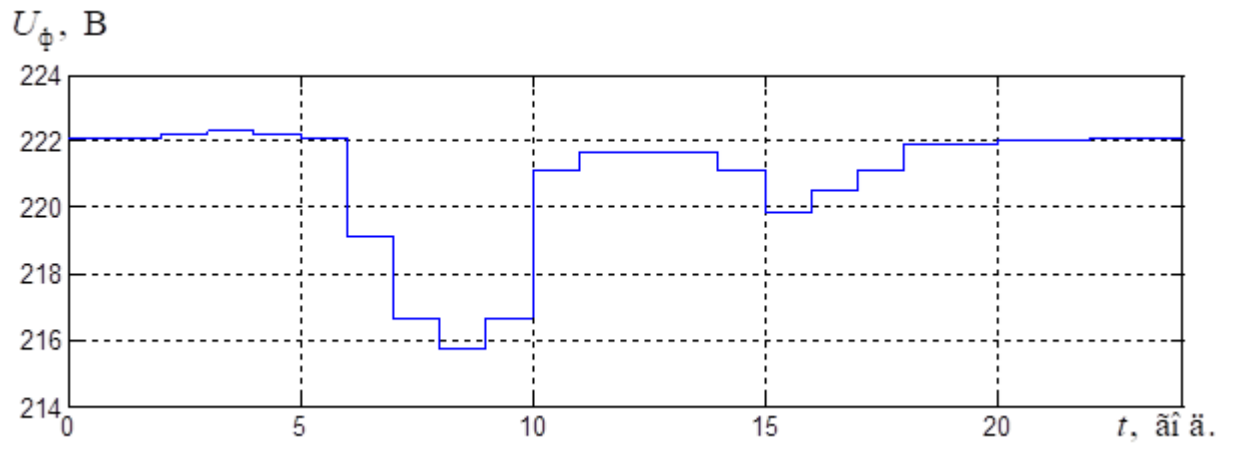


Рис. 4.13. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 2 схеми (СЕС відключена)

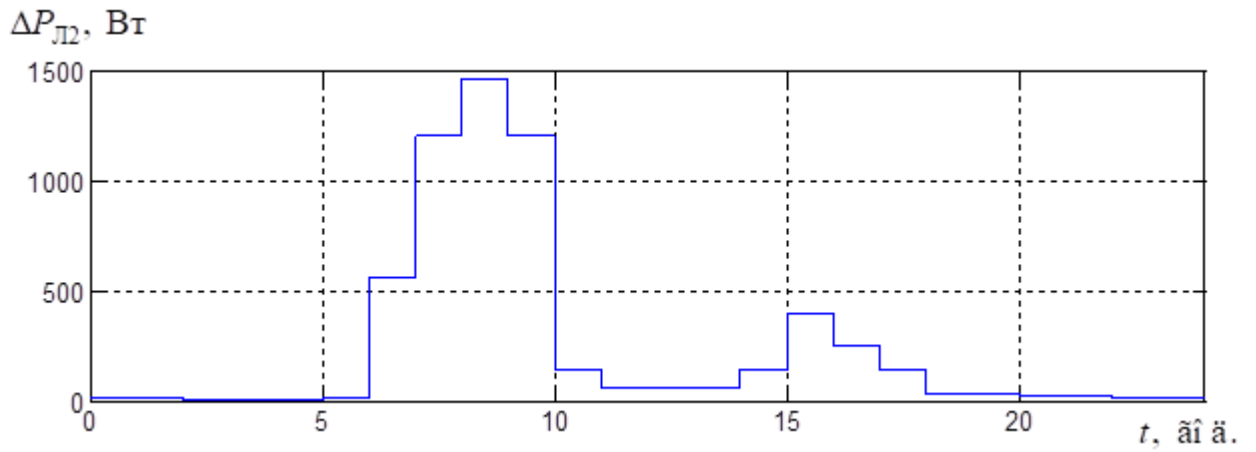
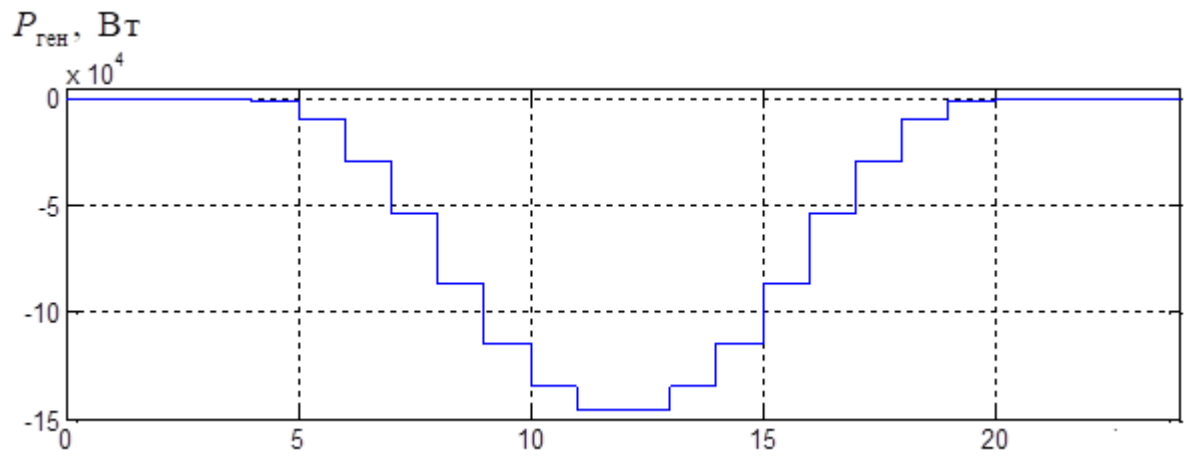
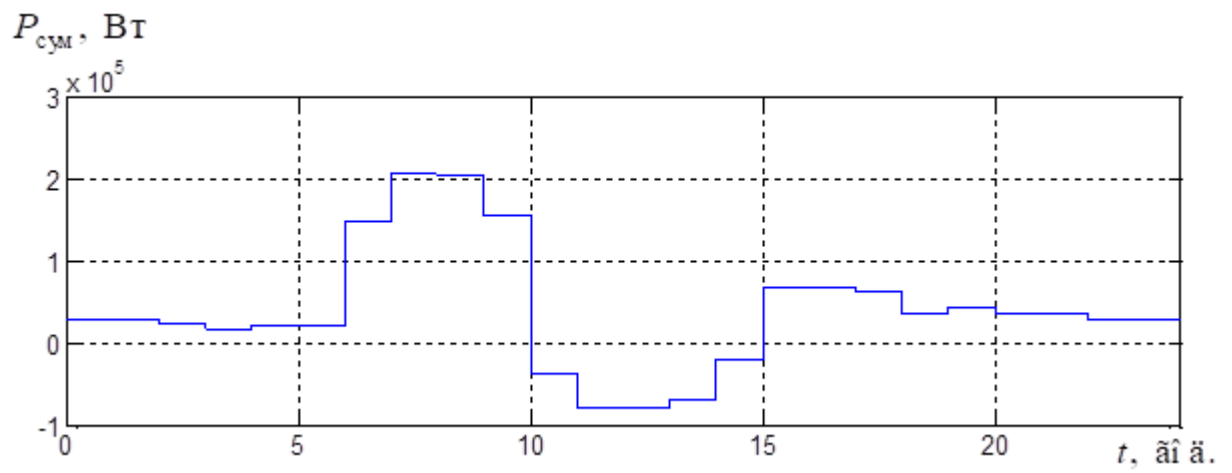
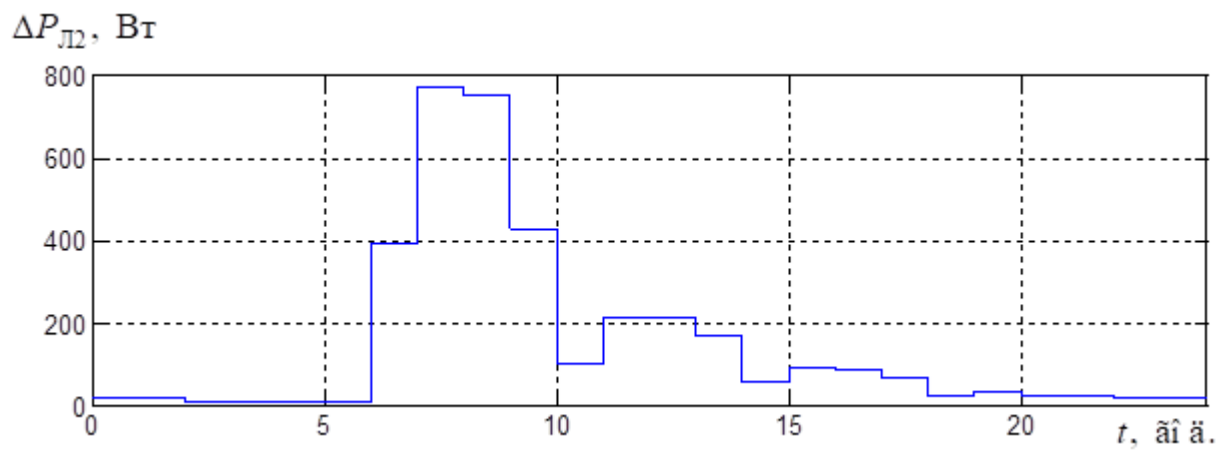


Рис. 4.14. Графік зміни ΔP_{L2} (СЕС відключена)

Рис. 4.15. Графік генерації СЕС, $P_{\text{ген}}$ Рис. 4.16. Графік сумарного споживання та генерації потужності від СЕС, $P_{\text{сум}}$ Рис. 4.17. Графік зміни ΔP_{L2} (СЕС підключена в т. 1)

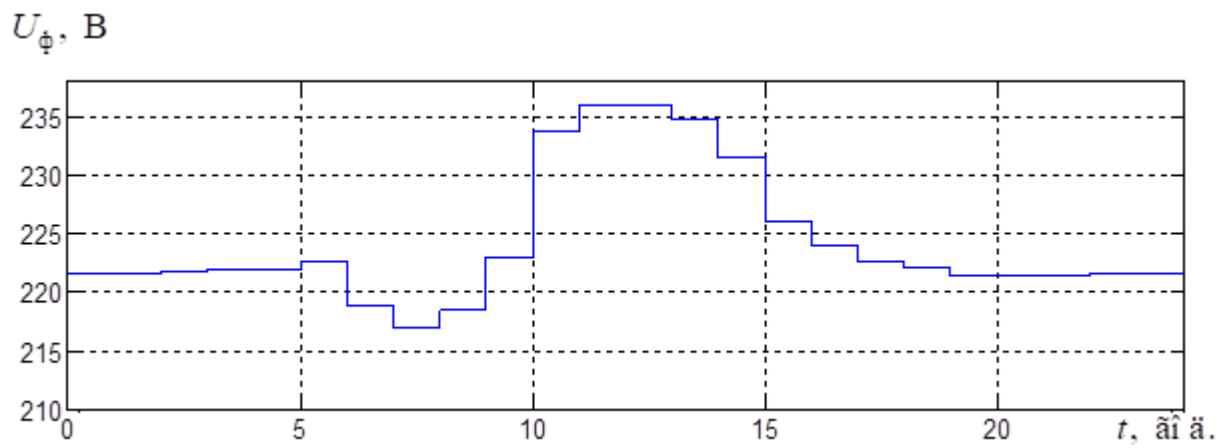


Рис. 4.18. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 1 схеми (СЕС підключена в т. 1)

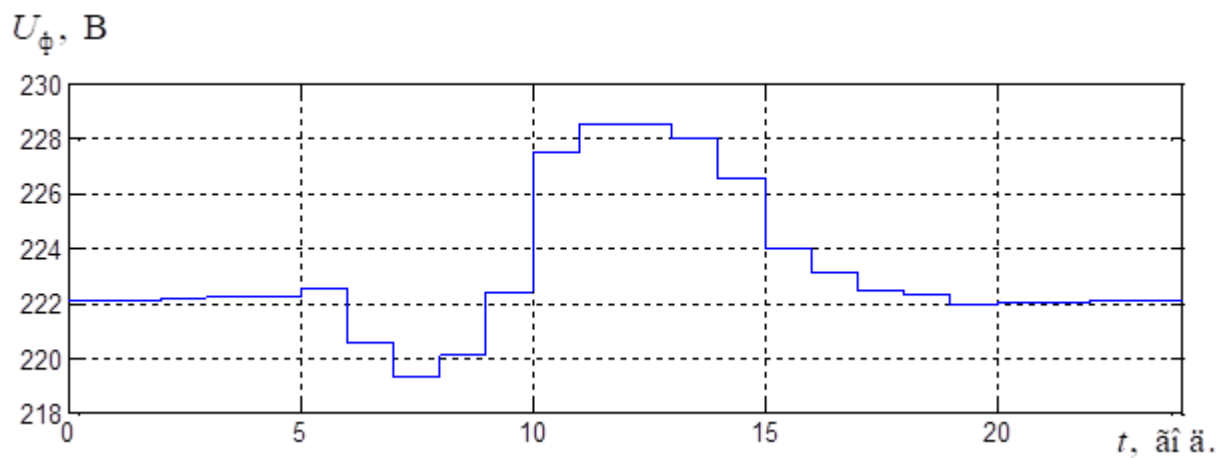


Рис. 4.19. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 2 схеми (СЕС підключена в т. 1)

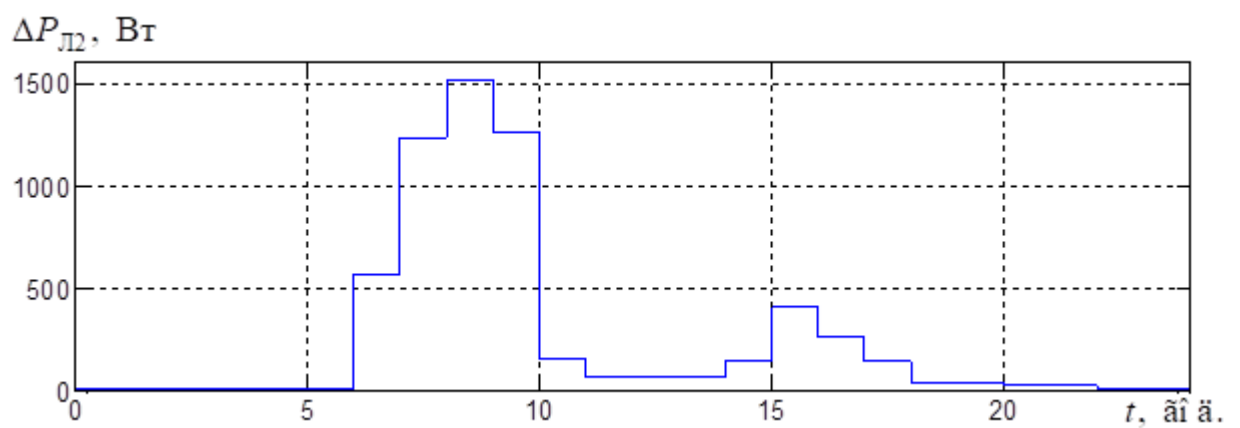


Рис. 4.20. Графік зміни ΔP_{L2} (СЕС підключена в т. 2)

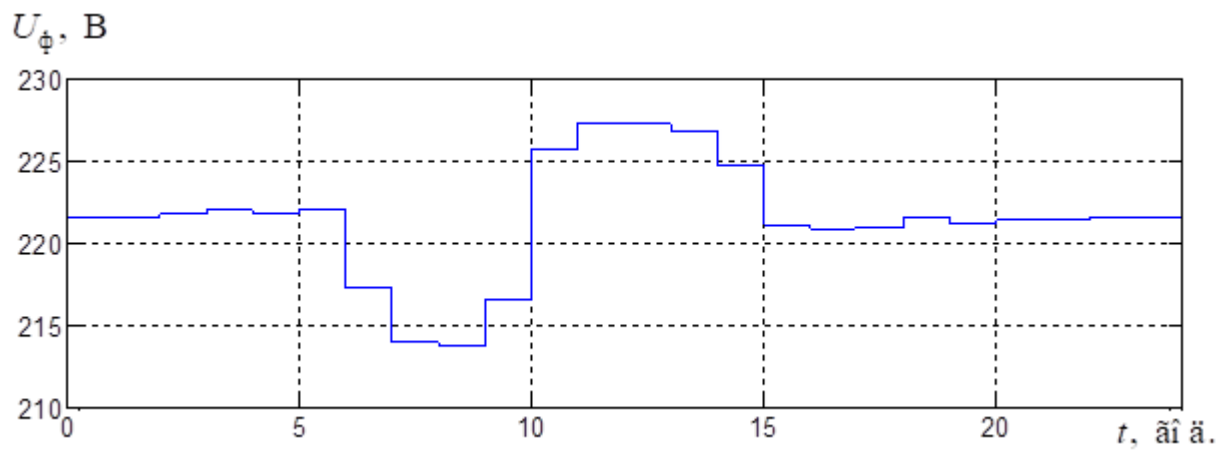


Рис. 4.21. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 1 схеми (СЕС підключена в т. 2)

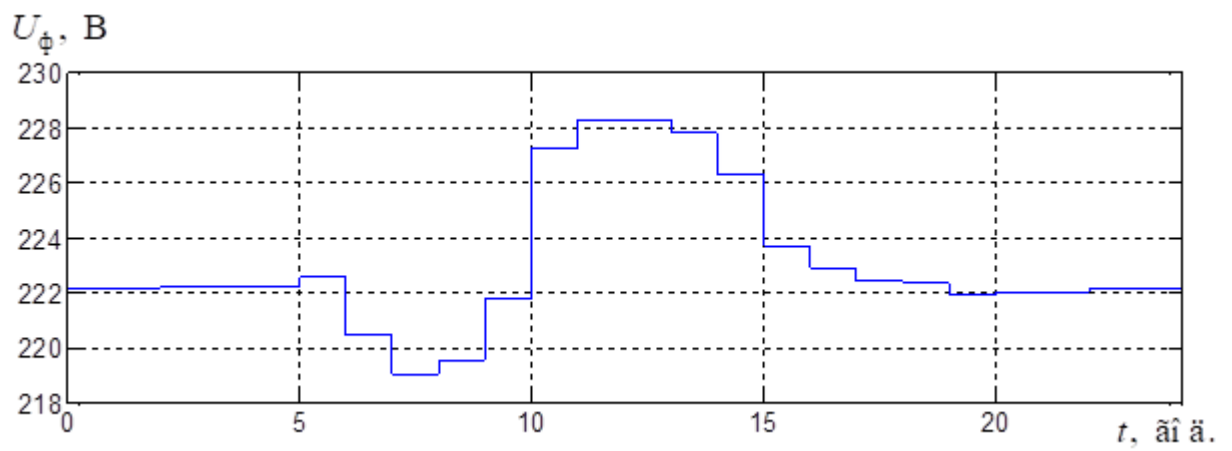


Рис. 4.22. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 2 схеми (СЕС підключена в т. 1)

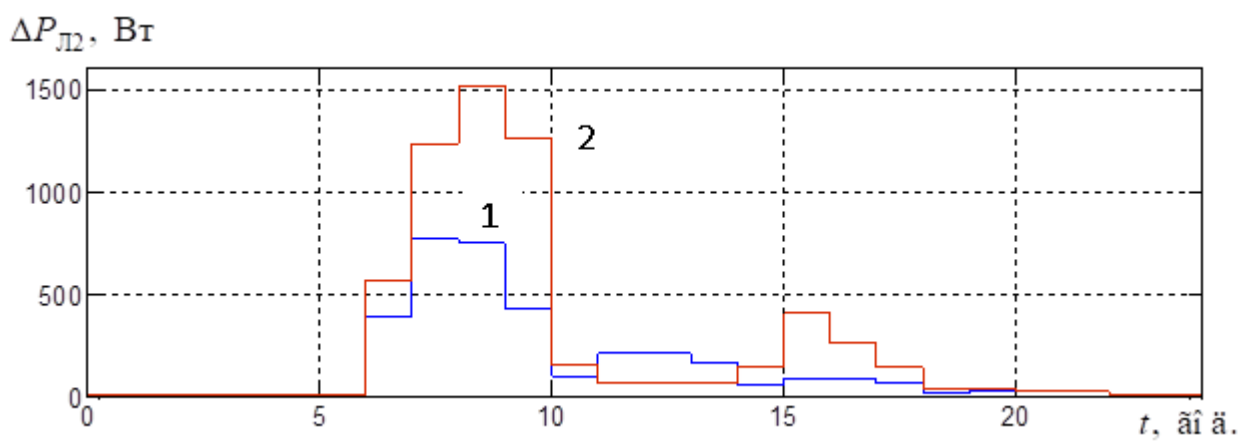


Рис. 4.23. Графік зміни ΔP_{L2} (1 – СЕС підключена в т.1, 2 – СЕС підключена в т.2)

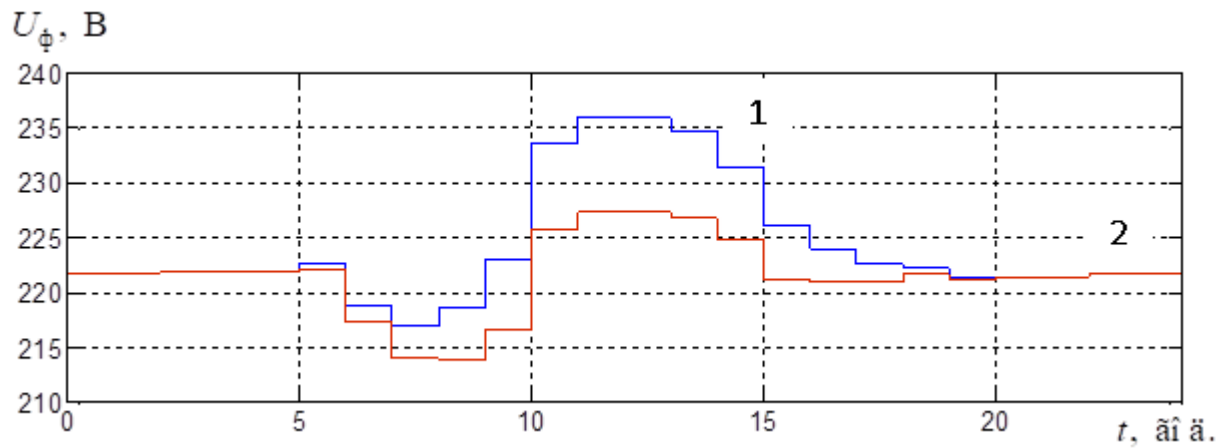


Рис. 4.24. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 1 схеми (1 – СЕС підключена в т.1, 2 – СЕС підключена в т.2)

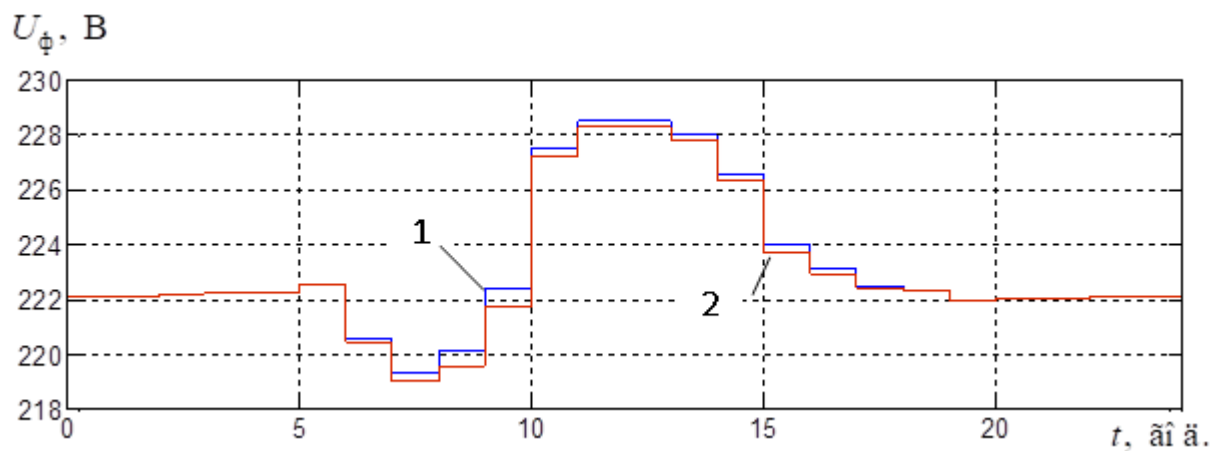


Рис. 4.25. Графік фазної напруги U_ϕ в т. 2 схеми (1 – СЕС підключена в т.1, 2 – СЕС підключена в т.2)

4.4 Аналіз результатів моделювання режимів роботи системи електропостачання з СЕС

Результати обробки значень напруг в т. 1 і т. 2 схеми, для випадків підключення СЕС до них показано в табл. 4.1

Таблиця 4.1. Результати обробки значень напруг в т. 1 і т. 2 схеми, для випадків підключення СЕС до них

Година	СЕС в т. 1 схеми				СЕС в т. 2 схеми			
	$U_{ф.т1}, В$	$\Delta U_{т1}, \%$	$U_{ф.т2}, В$	$\Delta U_{т2}, \%$	$U_{ф.т1}, В$	$\Delta U_{т1}, \%$	$U_{ф.т2}, В$	$\Delta U_{т2}, \%$
1	221,6	0,73	222,1	0,95	221,6	0,73	222,1	0,95
2	221,6	0,73	222,1	0,95	221,6	0,73	222,1	0,95
3	221,8	0,82	222,2	1	221,8	0,82	222,2	1
4	222	0,91	222,3	1,05	222	0,91	222,3	1,05
5	222	0,91	222,3	1,05	221,9	0,86	222,3	1,05
6	222,7	1,23	222,6	1,18	222,1	0,95	222,6	1,18
7	218,9	-0,5	220,6	0,27	217,3	-1,23	220,4	0,18
8	216,9	-1,41	219,4	-0,27	214	-2,73	219	-0,45
9	218,5	-0,68	220,1	0,05	213,8	-2,82	219,6	-0,18
10	223,1	1,41	222,4	1,09	216,7	-1,5	221,8	0,82
11	233,7	6,23	227,5	3,41	225,8	2,64	227,3	3,32
12	236	7,27	228,5	3,86	227,3	3,32	228,3	3,77
13	236	7,27	228,5	3,86	227,3	3,32	228,3	3,77
14	234,8	6,73	228	3,64	226,8	3,09	227,8	3,55
15	231,5	5,23	226,6	3	224,8	2,18	226,3	2,86
16	226	2,73	224	1,82	221,1	0,5	223,7	1,68
17	223,9	1,77	223,1	1,41	220,9	0,41	222,9	1,32
18	222,6	1,18	222,5	1,14	221	0,45	222,4	1,09
19	222,2	1	222,3	1,05	221,6	0,73	222,3	1,05
20	221,3	0,59	221,9	0,86	221,2	0,55	221,9	0,86
21	221,5	0,68	222	0,91	221,5	0,68	222	0,91
22	221,5	0,68	222	0,91	221,5	0,68	222	0,91
23	221,6	0,73	222,1	0,95	221,6	0,73	222,1	0,95
24	221,6	0,73	222,1	0,95	221,6	0,73	222,1	0,95
<i>M</i>	224,3	2	223,2	1,5	221,5	0,7	223,1	1,4
$P_{\text{нт}}, \%$		79,2		100		100		100

Результати обробки величин втрат потужності $\Delta P_{\text{л2}}$ для випадків приєднання СЕС в т.1 та т. 2 показані в табл. 4.2

Таблиця 4.2. Результати обробки величин втрат потужності $\Delta P_{\text{Л2}}$ для випадків приєднання СЕС в т.1 та т. 2

Година	СЕС в точку 1 схеми			СЕС в точку 2 схеми		
	P_1 , Вт	P_2 , Вт	$\Delta P_{\text{Л2}}$, Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	$\Delta P_{\text{Л2}}$, Вт
1	30611	30628	17	30611	30628	17
2	30611	30628	17	30611	30628	17
3	24531	24542	11	24531	24542	11
4	18430	18436	6	18430	18436	6
5	23119	23129	10	24545	24556	11
6	20744	20751	7	30736	30752	16
7	147958	148347	389	176136	176701	565
8	206351	207121	770	255928	257160	1232
9	205567	206318	751	283765	285281	1516
10	157207	157634	427	262335	263597	1262
11	-36640	-36538	102	95194	95347	153
12	-78870	-78659	211	64376	64445	69
13	-78870	-78659	211	64376	64445	69
14	-68755	-68585	170	64097	64165	68
15	-17652	-17594	58	94406	94558	152
16	69100	69192	92	152090	152497	407
17	69027	69110	83	121482	121742	260
18	62170	62236	66	91190	91337	147
19	35943	35965	22	45899	45936	37
20	44321	44355	34	45740	45777	37
21	36669	36693	24	36669	36693	24
22	36669	36693	24	36669	36693	24
23	30611	30628	17	30611	30628	17
24	30611	30628	17	30611	30628	17
Сумм	999463	1002999	3536	2111038	2117172	6134

Аналіз даних, представлених у таблиці 1, виявляє суттєві відмінності в якості електроенергії залежно від точки підключення сонячної електростанції (СЕС). При інтеграції СЕС у точці 1 схеми спостерігаються періоди, коли коливання напруги перевищують допустимі межі. Це призводить до незадовільних показників якості електроенергії, зокрема щодо усталеного відхилення напруги, що відображається в інтегральній ймовірності.

Натомість, коли СЕС приєднується до точки 2 схеми (шини напругою 0,4 кВ трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ), параметри усталеного відхилення напруги знаходяться в межах, встановлених стандартом ГОСТ 13109-97.

Однак, детальний аналіз розрахунків енергетичних втрат, представлених у таблиці 4.2, виявляє цікаву закономірність. При інтеграції сонячної електростанції (СЕС) до точки 2 схеми, а саме до шин напругою 0,4 кВ трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ, спостерігається значне зростання втрат електроенергії в лінії ЛВ. Ці втрати виявилися на 42% вищими порівняно з альтернативним варіантом підключення.

Виходячи з комплексного аналізу результатів, можна дійти до висновку, що найбільш доцільним варіантом інтеграції сонячної електростанції (СЕС) є її приєднання до точки 1 схеми, тобто до шин напругою 0,4 кВ підприємства.

Висновки до розділу

1. Аналіз результатів імітаційного моделювання на комп'ютері дозволяє дійти висновку про достовірність теоретичних досліджень, викладених у третьому розділі. Ці дослідження стосувались впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на функціонування розподільчих електромереж, зокрема при інтеграції сонячних електростанцій (СЕС) у комбіновану систему електропостачання.

2. Виявлено, що найбільш доцільним місцем для підключення СЕС є точка 1 схеми, яка відповідає шинам напругою 0,4 кВ підприємства. Проте варто зазначити, що така інтеграція потребує впровадження додаткових заходів для стабілізації напруги в мережі.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

Геліоенергетика є перспективним відгалуженням альтернативної енергетики, що базується на використанні невичерпного потенціалу нашого найближчого світила. Ця галузь зосереджена на перетворенні сонячного випромінювання в електричну або теплову енергію. Застосування геліоустановок вважається відносно безпечним для людства, оскільки не пов'язане з радіоактивними матеріалами чи викидами шкідливих речовин. Розглянемо ключові фактори, що призводять до нещасних випадків, а також методи запобігання травмам, які є типовими при роботі з вищезгаданим обладнанням.

Головні чинники електротравматизму включають:

- неумисний контакт або наближення до елементів електромережі під напругою становить значну загрозу для життя та здоров'я;
- виникнення потенціалу на металевих елементах електрообладнання становить серйозну загрозу безпеці.;
- виникнення електричного потенціалу на знеструмлених провідних елементах, де здійснюються роботи, через помилкове вмикання обладнання;
- формування потенціалу кроку на ґрунті внаслідок контакту електричного провідника із землею.

Ключові методи забезпечення безпеки при роботі з електричними системами включають ряд технічних та організаційних рішень:

- створення надійних бар'єрів для запобігання ненавмисного торкання до електрифікованих компонентів є ключовим аспектом електробезпеки;
- сегментація електромережі на окремі ділянки;
- забезпечення безпеки від електричного ураження при виникненні потенціалу на зовнішніх металевих елементах обладнання досягається кількома методами;

- використання низьковольтних систем;
- запобігання ненавмисному контакту з елементами під напругою забезпечується комплексом захисних заходів;
- забезпечення безпеки при можливому перенесенні потенціалу з мереж вищої напруги до кіл нижчої напруги вимагає комплексного підходу;
- цілісності електричної ізоляції є ключовим аспектом безпеки та надійності електричних систем;
- зниження впливу ємнісного компонента в струмі при контакті з ґрунтом;
- використання переносних приладів та запобіжних пристроїв є ключовим аспектом забезпечення безпеки при роботі з електроустановками;
- забезпечення безпечного функціонування електричних систем є ключовим аспектом управління енергетичною інфраструктурою.

Захисне заземлення – це цілеспрямоване створення електричного контакту між землею або її еквівалентом та металевими елементами обладнання, які зазвичай не проводять струм. Ця процедура застосовується до компонентів, що потенційно можуть опинитися під напругою через різноманітні фактори. Головна мета захисного заземлення – запобігання ризику ураження електричним струмом при контакті з металевими частинами електрообладнання, які зазвичай не проводять струм. Ця система безпеки спрацьовує, коли такі елементи несподівано опиняються під напругою через різні обставини, включаючи пошкодження ізоляції або інші непередбачені ситуації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами комплексного дослідження наявних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) можна дійти висновку, що сонячні електростанції (СЕС) виявляються найбільш оптимальним вибором для промислових об'єктів. Цей вибір ґрунтується на низці переваг СЕС порівняно з альтернативними видами ВДЕ. Обмеження сонячних електростанцій (СЕС) можна частково нівелювати шляхом їх інтеграції з централізованою енергомережею, створюючи гібридну систему електропостачання.

2. Оптимальним рішенням для компанії стане впровадження сонячної електростанції (СЕС) гібридного типу. Подібна установка матиме подвійне призначення: забезпечуватиме енергетичні потреби самого підприємства і одночасно постачатиме надлишок виробленої електроенергії до загальної електромережі.

3. На основі аналізу наявних гібридних енергосистем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) та з урахуванням специфічних кліматичних і географічних особливостей Кіровоградщини, можна дійти висновку про оптимальну конфігурацію комбінованої системи електрозабезпечення для підприємств регіону. Серед різноманітних варіантів ВДЕ, саме інтеграція фотоелектричної станції виявляється найдоцільнішою.

4. На основі здійснених обчислень щодо оптимізації кута нахилу фотоелектричних модулів для географічного розташування Кропивницького, було встановлено оптимальне значення цього параметра. Зокрема, виявлено, що найефективніша генерація електроенергії сонячною електростанцією (СЕС) досягається при куті нахилу $\beta = 70^\circ$.

5. Базуючись на попередньо проведених дослідженнях щодо структурної організації гібридної системи енергозабезпечення, аналізу характеристик споживання електроенергії та обчислення оптимального кута інсталяції, було ухвалено рішення про монтаж фотоелектричної установки.

Проект передбачає використання 800 сонячних панелей моделі TRINA SOLAR 260P, кожна з яких має номінальну потужність 260 Вт. Сумарна потужність цієї фотоелектричної системи складе 208 кВт.

6. Для досягнення максимальної техніко-економічної ефективності при інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в розподільні електричні мережі необхідно застосовувати комплексний підхід, що охоплює як економіко-правові, так і технічні аспекти. Такий підхід створює передумови для нарощування обсягів виробництва "зеленої" енергії, оптимізації енергетичних втрат у мережах розподілу, а також підвищення якісних показників та надійності енергопостачання кінцевих споживачів.

7. Для оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх інтеграції в існуючі електроенергетичні системи (ЕЕС) необхідно провести глибокий аналіз їхніх специфічних характеристик та нових властивостей, які проявляються при сумісній роботі з традиційними джерелами енергії. Це вимагає вдосконалення математичного апарату та методологій розрахунку, зокрема для оцінки втрат електроенергії, спричинених взаємними та адресними перетоками в розподільних електричних мережах (РЕМ). Такий підхід дозволить точніше оцінити вплив конкретних ВДЕ на режимні параметри та техніко-економічні показники РЕМ, а також визначити оптимальну стратегію інтеграції розосередженої генерації в систему електропостачання.

8. Ключовим аспектом для максимізації ефективності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є стратегічне визначення оптимальної локації їх інтеграції до електромережі. Процес оптимізації схем підключення генераторів на основі ВДЕ до електричної інфраструктури з порівнянною загальною потужністю споживання має ґрунтуватися на ретельному аналізі чутливості впливу цих джерел на операційні параметри розподільчих електромереж (РЕМ).

9. Для створення високоефективної системи автоматизованого управління генерацією електроенергії з використанням керованих і умовно-керованих відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також для розробки аналітичних критеріїв оптимальності режимів функціонування таких електростанцій у розподільчих електромережах (РЕМ), необхідно здійснити адаптацію існуючих математичних моделей та методів. Ця адаптація повинна враховувати сучасні вимоги ринку електроенергії та особливості електропостачання за двосторонніми договорами.

10. У рамках вдосконалення функціонування розподільних електромереж з впровадженням концепції SMART Grid, раціональним та ефективним рішенням є застосування адаптивної системи керування комплексами відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), побудованої за двоконтурною схемою. Така архітектура забезпечує комплексний моніторинг, що передбачає безперервне відстеження параметрів роботи ВДЕ за допомогою автоматизованих локальних підсистем, які здійснюють збір, зберігання та обробку даних у режимі реального часу.

11. Вирішення окреслених завдань відкриває шлях до створення комплексу методологій та інноваційних технічних рішень, спрямованих на оптимізацію інтеграції та синергетичного функціонування різноманітних типів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в структурі електричних мереж.

12. Аналіз результатів імітаційного моделювання на комп'ютері дозволяє дійти висновку про достовірність теоретичних досліджень, викладених у третьому розділі. Ці дослідження стосувались впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на функціонування розподільчих електромереж, зокрема при інтеграції сонячних електростанцій (СЕС) у комбіновану систему електропостачання.

13. Виявлено, що найбільш доцільним місцем для підключення СЕС є точка 1 схеми, яка відповідає шинам напругою 0,4 кВ підприємства. Проте

варто зазначити, що така інтеграція потребує впровадження додаткових заходів для стабілізації напруги в мережі.

14. У розділі розглядаються питання охорони праці під час встановлення сонячних електростанцій (СЕС) на підприємстві. Зокрема, аналізуються небезпечні та шкідливі фактори, що можуть виникати під час роботи з електрообладнанням.

15. Основні заходи безпеки включають технічні та організаційні рішення, такі як використання захисних бар'єрів, сегментація електромережі, захисне заземлення, використання низьковольтних систем та переносних запобіжних приладів. Це дозволяє запобігти виникненню електричного потенціалу на металевих елементах обладнання та забезпечити безпеку працівників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
6. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
7. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Сасенко. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 319 с. : іл.

8. Васько П. Ф. Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні / П. Ф. Васько // Відновлювана енергетика. – 2006. – № 1.

9. 2. Структурні тенденції в енергетиці Європи і розвиток відновлюваної енергетики / С. О. Кудря, Б. Г. Тучинський, В. Г. Дресвянніков, З. У. Рамазанова // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 1. – С. 36–40.

10. Розробка та вдосконалення енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу альтернативних джерел енергії : колективна монографія / за ред. О.О. Горба, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. – П. : ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. – 326 с

11. Атлас енергетичного потенціалу поновлюваних джерел енергії України розроблено Інститутом електродинаміки НАН України за підтримки Державного комітету України з енергозбереження. – К., 2000.

12. Еко- електрика {Електронний ресурс}: який кут нахилу сонячних батарей оптимальний:- режим доступу:- <http://eco-electrics.com.ua/novosti/iakii-kut-nahilu-soniachnih-batarei-optimalnii>

13. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). // DG XVII European Commision 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.

14. Кириленко А. В. Оптимизация режимов энергосистем в условиях рынка / А. В. Кириленко, В. Л. Прихно // Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансуючого ринку : праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск.. – К. : 2009. – С. 3–10.

15. Праховник А. В. Керування режимами електроспоживання в умовах запровадження в Україні ринку двосторонніх договорів та 186 балансуючого ринку / А. В. Праховник, О. В. Коцар // Енергетика та електрифікація. – 2010. – № 2. – С. 42–52.

16. Праховник А. В. Модель інтеграції децентралізованої генерації в енергетичну систему на найвищому рівні ієрархії управління / А. В. Праховник, В. А. Попов, О. В. Кулик // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2006. – № 1. – С. 101–109. 35. Кириленко О. В. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергер

17. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України : збірник наукових праць. Спеціальний випуск, ч. 1. – 2011. – С. 48–55.

18. Нікіторович О. В. Підвищення ефективності експлуатації малих ГЕС засобами автоматичного керування / О. В. Нікіторович, П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик // Гідроенергетика України. – 2007. – № 3. – С. 38–41.

19. Малі ГЕС в локальних електричних системах з розосередженим генеруванням / О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик // Гідроенергетика України. – 2011. – № 1. – С. 54–58

20. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / В. В. Козирський, Ю. І. Тугай, В. М. Бодунов, О. В. Гай // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 5. – С. 63–67.

21. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, О. А. Ковальчук // Технічна електродинаміка : тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. Ч. 3 – С. 31–34.

22. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / В. В. Козирський, Ю. І. Тугай,

23. В. М. Бодунов, О. В. Гай // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 5. – С. 63–67.

24. Лежнюк П. Д. Особливості роботи відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик

// Відновлювана енергетика XXI століття : матеріали XII міжнарод. наук.-практ. конференції. – Крим, 2011.– С. 42–46.

25. Буцьо З. Ю. Мала гідроенергетика: світовий досвід і перспективи розвитку в Україні / З. Ю. Буцьо, Л. М. Луцюк, О. В. Гаврюк //Електропанорама. – 2011. – № 6. – С. 47–51.

26. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. : спеціальний випуск. – К. – 2010. –С. 10–16.

27. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник. 5-е вид./За ред. М.П. Гандзюка.-К.: Каравела, 2011. - 384 с.

28. Національний стандарт України інженерне обладнання будинків і споруд улаштування блискавкозахисту будівель і споруд: наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 27.06.2008 № 269 чинний з 2009-01-01 (відповідає офіц. текстові).- Косюк В.В., Пономаренко Г.Н., Пустовойт В.М.

29. Калькулятор сонячної електростанції [Електронний ресурс] . – Режим доступу до статті. : <https://rent techno.ua/ua/solar-calc.html>.