

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

"Допущено до захисту"
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
"_____"_____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
"Розробка комбінованих електроенергетичних
систем та оцінка ефекту від їх застосування для
об'єктів малого електроспоживання"

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Стівен НГЕПІ
«____»_____2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
«____»_____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 «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛІШКОВ.

«___» _____ 2024 р.

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

Нгені Стівена Леонардовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Розробка комбінованих електроенергетичних систем та оцінка ефекту від їх застосування для об'єктів малого електроспоживання
Development of combined electric power systems and assessment of the effect of their application for small power consumption facilities

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є вдосконалення системи електропостачання об'єктів з малим електроспоживанням шляхом інтеграції комбінованих електроенергетичних систем, що поєднують потенціал сонячних та малих гідроелектростанцій з оцінкою їх роботи. Завдання роботи: розглянути стан питання розвитку відновлюваної енергетики в світі та Україні з оцінкою перспектив їх комбінованого використання; виконати огляд комбінованих електроенергетичних систем з подальшим вибором схем для живлення об'єктів малого електроспоживання; обрати програмні блоки для моделювання елементів комбінованих електроенергетичних систем; розробити відповідні обраним схемам комп'ютерні імітаційні моделі; за допомогою розроблених комп'ютерних моделей виконати моделювання роботи обраних комбінованих електроенергетичних систем з подальшим порівнянням отриманих результатів; провести розрахунок економічних показників для обраних проектів комбінованих електроенергетичних систем; розробити заходи з охорони праці та техніки безпеки при виконанні робіт.

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
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>11.10.2024 р.</i>	
<i>2</i>	<i>Огляд джерел відновлюваної енергетики в контексті використання їх як установок електрогенерації в комбінованих електроенергетичних системах</i>	<i>18.10.2024 р.</i>	
<i>3</i>	<i>Схемні рішення комбінованих електроенергетичних систем та моделювання їх складових елементів</i>	<i>01.10.2024 р.</i>	
<i>4</i>	<i>Комп'ютерне моделювання роботи комбінованих електроенергетичних систем та їх економічна оцінка</i>	<i>15.11.2024 р.</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>22.11.2024 р.</i>	
<i>6</i>	<i>Загальні висновки</i>	<i>25.11.2024 р.</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>27.11.2024 р.</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11.2024 р.</i>	

Дата видачі завдання: «___» _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання: «___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Стівен НГЕПІ

АНОТАЦІЯ

Нгені С.Л. Розробка комбінованих електроенергетичних систем та оцінка ефекту від їх застосування для об'єктів малого електроспоживання.

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

Метою роботи є вдосконалення системи електропостачання об'єктів з малим електроспоживанням шляхом інтеграції комбінованих електроенергетичних систем, що поєднують потенціал сонячних та малих гідроелектростанцій з оцінкою їх роботи.

Наукова робота присвячена актуальній проблемі розвитку комбінованих систем електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії для забезпечення електроживлення об'єктів малого електроспоживання. У дослідженні проведено комплексний аналіз стану та перспектив розвитку відновлюваної енергетики в світовому контексті та в Україні. Виконано поглиблений огляд існуючих комбінованих електроенергетичних систем з метою визначення найбільш ефективних схем електропостачання для об'єктів з низьким рівнем електроспоживання.

Розроблені комп'ютерні моделі дозволили провести детальне дослідження роботи обраних комбінованих електроенергетичних систем, здійснити їх порівняльний аналіз та оцінку ефективності. Ключовим аспектом роботи є економічний аналіз запропонованих проектних рішень, що включає розрахунок та оцінку економічних показників комбінованих електроенергетичних систем.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, комбінована електроенергетична система, мала гідроелектростанція, резервне електрозабезпечення, система акумулювання енергії, сонячна фотоенергетика

THE SUMMARY

Nhepi S. Development of combined electric power systems and assessment of the effect of their application for small power consumption facilities.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024

The purpose of the work is to improve the power supply system of facilities with small power supply by integrating combined energy systems that combine the potential of solar and small hydroelectric power plants with an assessment of their performance.

The scientific work is devoted to the urgent problem of development of combined power supply systems using renewable energy sources to provide power supply to low-power consumption facilities. The study conducted a comprehensive analysis of the state and prospects for the development of renewable energy in the global context and in Ukraine. An in-depth review of existing combined power systems was carried out in order to determine the most effective power supply schemes for facilities with low power consumption.

The developed computer models allowed for a detailed study of the operation of selected combined power systems, their comparative analysis and assessment of efficiency. The key aspect of the work is the economic analysis of the proposed design solutions, which includes the calculation and assessment of economic indicators of combined power systems.

Key words: renewable energy sources, combined power system, small hydroelectric power plant, backup power supply, energy storage system, solar photoenergy

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В КОНТЕКСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЇХ ЯК УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ В КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	12
1.1 Перспективи та можливості використання потенціалу відновлюваних джерел в Україні і світі.....	12
1.2 Керовані та некеровані установки з використанням відновлюваних джерела енергії	16
1.3 Підходи до комбінованого використання джерел відновлюваної енергії в рамках гібридних електроенергетичних систем.....	22
Висновки до першого розділу	36
РОЗДІЛ 2 СХЕМНІ РІШЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ	37
2.1 Типові схемні рішення комбінованих електроенергетичних систем для об'єктів з малим електроспоживанням	37
2.2 Некеровані елементи комбінованих електроенергетичних систем та їх моделі	43
2.3 Керовані елементи комбінованих електроенергетичних систем та їх моделі.....	50
Висновки до другого розділу	58

РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА	59
3.1 Моделювання комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з некерованими установками	59
3.2 Моделювання комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з керованими установками	62
3.3 Порівняльний аналіз результатів моделювання роботи комбінованих електроенергетичних систем	66
3.4 Порівняльний аналіз техніко-економічних показників комбінованих електроенергетичних систем обраних для моделювання	68
Висновки до третього розділу	84
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	86
4.1 Організація безпечної експлуатації та обслуговування електричного обладнання малих гідроелектростанцій	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

МГЕС – мала гідроелектростанція

СЕС – сонячна електростанція

СНЕ – система накопичення енергії

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку енергетики актуальність розробки комбінованих електроенергетичних систем для об'єктів малого електроспоживання зумовлена системними викликами галузі, особливо в умовах військових дій та глобальних кліматичних змін. Необхідність впровадження інноваційних підходів електропостачання пов'язана з вичерпанням традиційних енергоресурсів та посиленням вимог до енергетичної ефективності.

Комбіновані електроенергетичні системи являють собою перспективне рішення для малих споживачів, оскільки дозволяють інтегрувати різні джерела генерації – відновлювальні та традиційні, забезпечуючи гнучкість, надійність та диверсифікацію електропостачання. Особливого значення такі системи набувають при побудові локальних енергетичних комплексів, зокрема для приватних домогосподарств, фермерських та малих підприємств.

Ключовими перевагами комплексних електроенергетичних систем є підвищення стійкості інфраструктури, можливість акумуляції електроенергії, економічна доцільність та здатність забезпечувати автономність споживачів. В контексті децентралізації енергетичної системи України дослідження комбінованих електроенергетичних систем набуває особливого актуального значення для зменшення залежності від централізованих електромереж та розвитку локальної енергетики.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є вдосконалення системи електропостачання об'єктів з малим електроспоживанням шляхом інтеграції комбінованих електроенергетичних систем, що поєднують потенціал сонячних та малих гідроелектростанцій з оцінкою їх роботи.

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

1. розглянути стан питання розвитку відновлюваної енергетики в світі та Україні з оцінкою перспектив їх комбінованого використання;

2. виконати огляд комбінованих електроенергетичних систем з подальшим вибором схем для живлення об'єктів малого електроспоживання;
3. обрати програмні блоки для моделювання елементів комбінованих електроенергетичних систем;
4. розробити відповідні обраним схемам комп'ютерні імітаційні моделі;
5. за допомогою розроблених комп'ютерних моделей виконати моделювання роботи обраних комбінованих електроенергетичних систем з подальшим порівнянням отриманих результатів;
6. провести розрахунок економічних показників для обраних проектів комбінованих електроенергетичних систем;
7. розробити заходи з охорони праці та техніки безпечної експлуатації електрообладнання гідроелектростанцій.

Об'єкт дослідження – процеси електрозабезпечення локальних систем малого електроспоживання від комбінованої електроенергетичної системи зі сонячною установкою, малою гідроелектростанцією та системою накопичення електроенергії.

Предмет дослідження – підходи до проектування інтегрованих систем електрозабезпечення у вигляді комбінованих електроенергетичних систем, орієнтовані на оптимізацію процесів енергопостачання локальних малопотужних споживачів.

Методи дослідження. Для реалізації наукового дослідження використано комплекс взаємодоповнюючих методологічних інструментів, зокрема: методи теоретичного аналізу електричних систем, математичне моделювання для формалізації складних енергетичних процесів та прогнозування поведінки гібридних електросистем; комп'ютерне імітаційне моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для визначення оптимальних параметрів та режимів роботи електрогенеруючих комплексів; розрахунково-аналітичний метод оцінки техніко-економічної ефективності запропонованих інженерних рішень.

Наукова цінність роботи полягає в подальшому розвитку теорії та методології формування структури комбінованих електроенергетичних систем електропостачання об'єктів з малим електроспоживанням який забезпечує підбір варіанту варіації керованих та некерованих джерел для підвищення їх ефективності та економічності роботи.

Практична цінність роботи полягає в розробці комплексного рішення системи електропостачання об'єкту з малим електроспоживанням що дозволяє підвищити надійність електропостачання, економічність роботи.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 90 сторінок. Основна частина викладена на 80 сторінках друкованого тексту, містить 34 рисунків та 6 таблиць. Список використаних джерел містить 20 джерел та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В КОНТЕКСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЇХ ЯК УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ В КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Перспективи та можливості використання потенціалу відновлюваних джерел в Україні і світі.

Альтернативна енергетика представляє собою сукупність екологічно безпечних джерел енергії, що здатні швидко відновлюватися природними процесами. На противагу традиційним викопним паливам – вугіллю, нафті та газу, відновлювані джерела (сонячне випромінювання, вітер, водні потоки) пропонують необмежені можливості для виробництва електроенергії без негативного впливу на клімат.

Сучасні технології дозволяють ефективно конвертувати різні види природної енергії в електричну та теплову. Країни ЄС, США та Китай вже демонструють значні успіхи у розвитку відновлюваної енергетики, створюючи моделі сталого розвитку.

Вторгнення Росії в Україну спричинило глибокі трансформації в енергетичній системі, змусивши країну шукати альтернативні джерела електропостачання. Відновлювана енергетика розглядається як ключовий напрямок забезпечення енергетичної безпеки та незалежності.

Україна має значний потенціал у сфері відновлюваної енергетики – вітрової, сонячної та біоенергетики. Розвиток цього сектору вимагає масштабних інвестицій та вдосконалення регуляторної політики. Пріоритетними завданнями є модернізація енергетичної інфраструктури, створення потужностей для зберігання та експорту електроенергії.

Довгострокова стратегія передбачає послідовне нарощування частки відновлюваних джерел, що дозволить країні інтегруватися в європейську енергетичну систему, посилити власну енергетичну стійкість.

Сучасна відновлювана енергетика демонструє вражаючу динаміку технологічного та економічного розвитку. За період з 2010 по 2020 рік відбулося суттєве зниження собівартості альтернативних джерел енергії: вартість виробництва електроенергії з сонячних панелей зменшилася на 85%, а витрати на наземну та офшорну вітроенергетику скоротилися на 56% і 48%.

На початок 2023 року глобальна потужність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) досягла 3 371 793 МВт, демонструючи стрімкий розвиток галузі. Лідером залишається гідроенергетика з потужністю 1 392 598 МВт, однак сонячна та вітрова енергетика швидко нарощують свої позиції.

Протягом 2022 року найбільший приріст встановленої потужності продемонстрували саме сонячні та вітрові установки – 191 578 МВт та 74 653 МВт нововведених потужностей відповідно. Це підтверджує глобальний тренд на диверсифікацію та екологізацію енергетичного сектору.

В Україні станом на початок 2023 року встановлена потужність ВДЕ складала 14 921 МВт, з яких: сонячна енергетика: 8 062 МВт, гідроенергетика: 4 823 МВт, вітроенергетика: 1 711 МВт, біоенергетика: 275 МВт

Ці показники відображають значний потенціал та перспективи розвитку відновлюваної енергетики втому числі і в Україні.

Ріст встановленої потужності різних типів відновлюваної енергетики у світові від 2013 р. до 2022 р. представлено у вигляді діаграм на рис 1.1 – рис 1.5, а на рис 1.6 – ріст сумарної потужності.

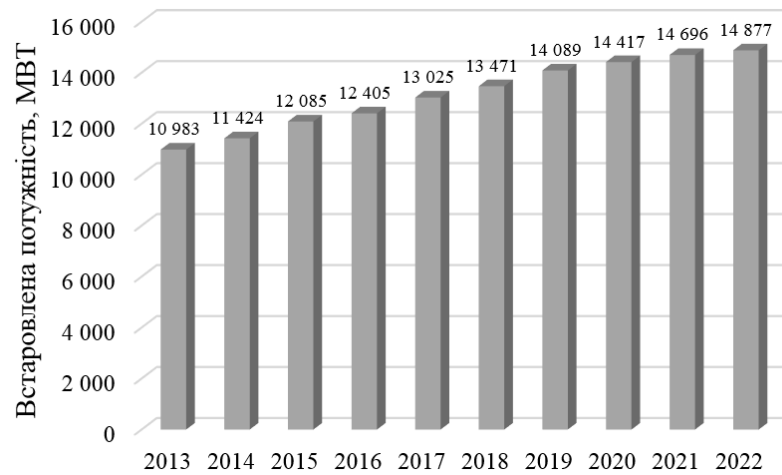


Рисунок 1.1. – Ріст встановленої потужності геотермальної енергетики у світі

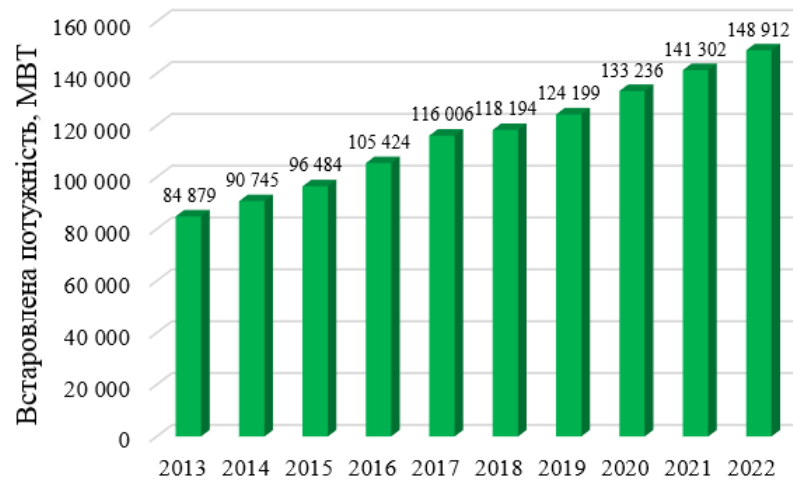


Рисунок 1.2. – Ріст встановленої потужності біоенергетичних установок у світі

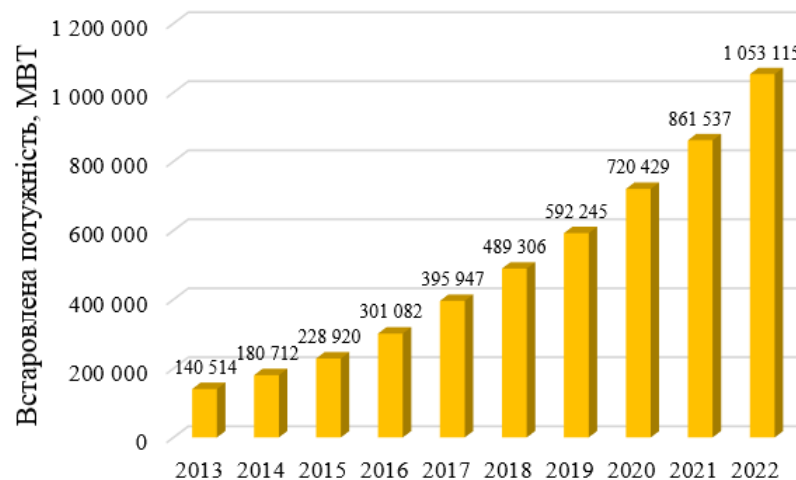


Рисунок 1.3. – Ріст встановленої потужності сонячних установок у світі

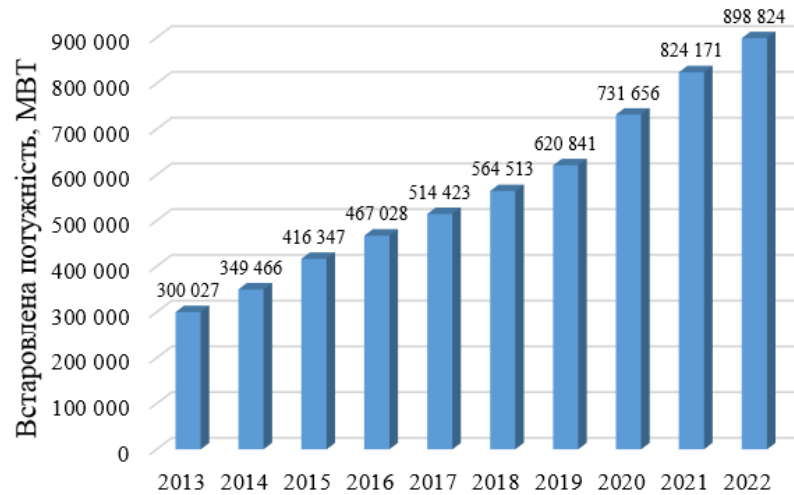


Рисунок 1.4. – Ріст встановленої потужності вітрових установок у світі

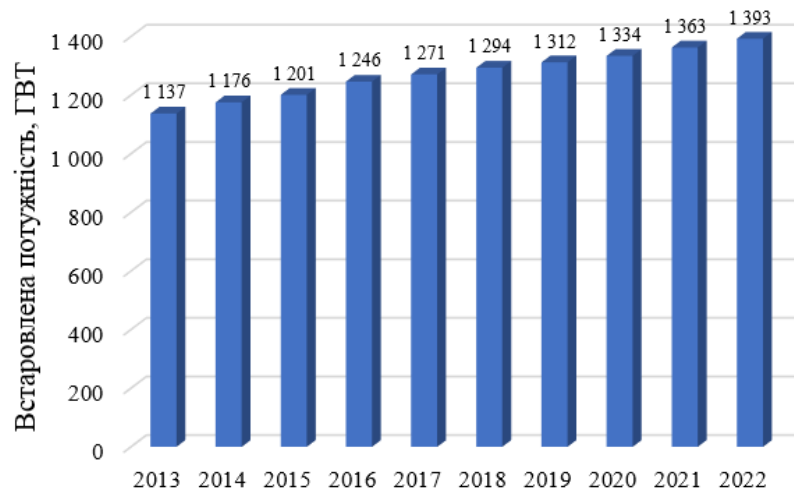


Рисунок 1.5. – Ріст встановленої потужності гідроелектричних установок у світі

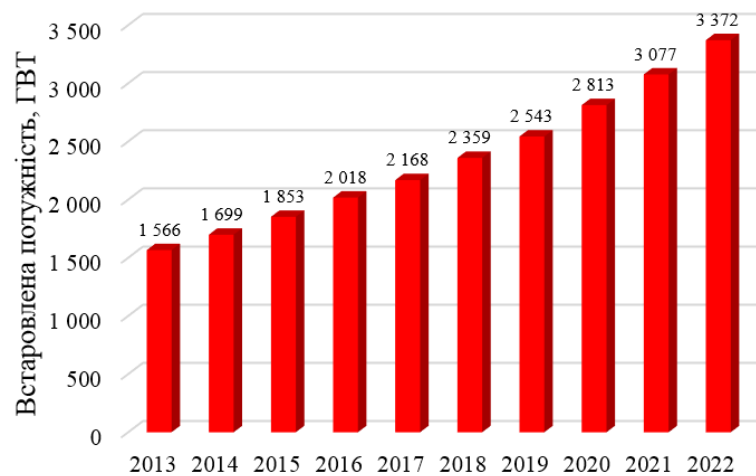


Рисунок 1.6. – Ріст загальної встановленої потужності ВДЕ у світі

1.2 Керовані та некеровані установки з використанням відновлюваних джерела енергії

Принципова різниця між відновлюваними джерелами енергії полягає в можливості технологічного управління процесами генерації електроенергії. Контрольованість постає визначальним фактором для ефективного впровадження альтернативних енергетичних систем.

Керовані джерела енергії дозволяють операторам здійснювати регулювання потужності, встановлювати оптимальні режими генерації та адаптувати виробництво до поточних споживчих потреб. Натомість некеровані джерела характеризуються високим ступенем залежності від природних флуктуацій, що ускладнює прогнозування та планування електропостачання. Технологічний контроль виступає критичним елементом інтеграції відновлюваної енергетики в існуючі електромережі, забезпечуючи стабільність, передбачуваність та ефективність альтернативних енергосистем.

Керовані відновлювані джерела енергії характеризуються здатністю оперативного регулювання виробництва електроенергії відповідно до актуальних споживчих потреб та системних параметрів.

Гідроенергетика демонструє унікальні можливості технологічного контролю завдяки маневруванню водосховищами. Станції здатні оптимізувати виробництво електроенергії шляхом прецизійного управління шлюзами: форсування генерації в періоди високого попиту та акумуляції водних ресурсів під час низького навантаження.

Геотермальна енергетика пропонує альтернативні механізми керованості через прецизійне налаштування параметрів теплового режиму. Технологічний контроль досягається шляхом коригування робочого середовища, зміни глибини свердловин та інтенсивності теплообміну.

Некеровані відновлювані джерела енергії. Альтернативні енергетичні системи характеризуються складністю або неможливістю точного

регулювання обсягів генерації електричної потужності відповідно до поточних споживчих потреб. Такі джерела мають природні особливості формування електроенергії, залежать від зовнішніх кліматичних умов.

Наприклад, геліоелектростанції демонструють нерівномірну продуктивність упродовж світлового дня. Сонячні панелі максимізують власну ефективність у денний час, коли інтенсивність сонячного випромінювання найвища, та практично повністю припиняють генерацію в темний період. Цей природний цикл унеможливорює пряме керування потужністю без додаткових акумулюючих технологій.

Вітрогенератори також демонструють високу залежність від метеорологічних параметрів. Швидкість вітрового потоку безпосередньо впливає на електричний потенціал установки. За критично низьких або надмірно високих значеннях швидкості обертання турбін їхня робота може бути частково або повністю заблокована системами захисту.

Порівнюючи різні енергетичні підходи, фахівці визнають, що некеровані відновлювані джерела мають як суттєві переваги, так і певні обмеження. Керовані енергетичні системи забезпечують вищу передбачуваність та стабільність, але потребують значних капіталовкладень в інфраструктуру. Натомість альтернативні джерела пропонують екологічну чистоту, мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище та невичерпність ресурсів.

Для забезпечення надійності електропостачання фахівці рекомендують формувати диверсифіковану енергетичну модель складу енергосистем з відновлюваними джерелами. Оптимальним рішенням вважається поєднання різних типів генерації: традиційних та відновлюваних, керованих та некерованих, що компенсує індивідуальні обмеження кожної технології.

Ключовими перешкодами для широкомасштабного впровадження альтернативної енергетики залишаються економічні аспекти та питання доступності ресурсів у потрібному місці й часі. Специфіка роботи сонячних панелей та вітрогенераторів полягає в тому, що їхня продуктивність напряду

залежить від погодних умов, добових циклів та сезонних змін, що створює певну періодичність у виробництві електроенергії.

Перспективним рішенням для оптимізації роботи відновлюваних джерел енергії виступають інтелектуальні енергомережі (Smart Grid). Вони не лише сприяють ефективній інтеграції альтернативних джерел, але й забезпечують додаткові переваги для всієї енергосистеми. Однак для забезпечення масштабного постачання «зеленої» енергії галузі необхідно подолати низку технологічних викликів.

Визначальну роль у розвитку відновлюваної енергетики відіграють передові системи управління та контролю. Особливо це стосується сонячної та вітрової генерації, де впровадження сучасних методів керування дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи установок. Варто зазначити, що функціонування розумних мереж неможливе без комплексного застосування технологій управління на всіх рівнях системи.

Впровадження інноваційних стратегій керування здатне не тільки оптимізувати роботу енергетичних систем, але й збільшити тривалість ефективного функціонування вітрових турбін та сонячних панелей, що в результаті призведе до зменшення собівартості виробленої електроенергії. Таким чином, розвиток технологій управління стає ключовим фактором у подоланні викликів, пов'язаних із надійним постачанням та ефективним використанням електроенергії з відновлюваних джерел.

Технологічна платформа SmartGrids представляє собою революційне рішення в енергетичній галузі, що трансформує традиційні електромережі у високоінтелектуальні системи енергозабезпечення. Ця інноваційна концепція пропонує комплексний підхід до модернізації енергетичної інфраструктури, забезпечуючи низку суттєвих переваг для всіх учасників енергетичного ринку.

Однією з ключових особливостей розумних мереж є їхня здатність ефективно інтегрувати генеруючі потужності різних масштабів та технологій. Така гнучкість створює сприятливі умови для розвитку розподіленої генерації, включаючи відновлювані джерела енергії. Система надає безпрецедентні

можливості для активної участі споживачів у процесі оптимізації роботи енергомережі, забезпечуючи їх детальною інформацією про енергоспоживання та розширюючи можливості вибору постачальників електроенергії.

Впровадження SmartGrids суттєво розширює децентралізований характер енергетичних систем, поширюючи можливості контролю до рівня кінцевого споживача. Це дозволяє створити більш гнучку та адаптивну систему енергопостачання, здатну ефективно реагувати на зміни попиту та пропозиції. Важливим аспектом є також значне зменшення негативного впливу на довкілля завдяки оптимізації режимів роботи всієї системи енергопостачання.

З технічної точки зору, розумну мережу можна розглядати як масштабну кібер-фізичну систему, що забезпечує вдосконалене управління та моніторинг розподілених енергетичних ресурсів. Ця система інтегрує передові інформаційні технології з традиційною енергетичною інфраструктурою, створюючи єдиний інтелектуальний комплекс. Концептуальна модель NIST smart grid демонструє складну взаємодію різних компонентів системи, включаючи генерацію, передачу, розподіл та споживання електроенергії, а також інформаційні потоки між ними як показано на рис. 1.7.

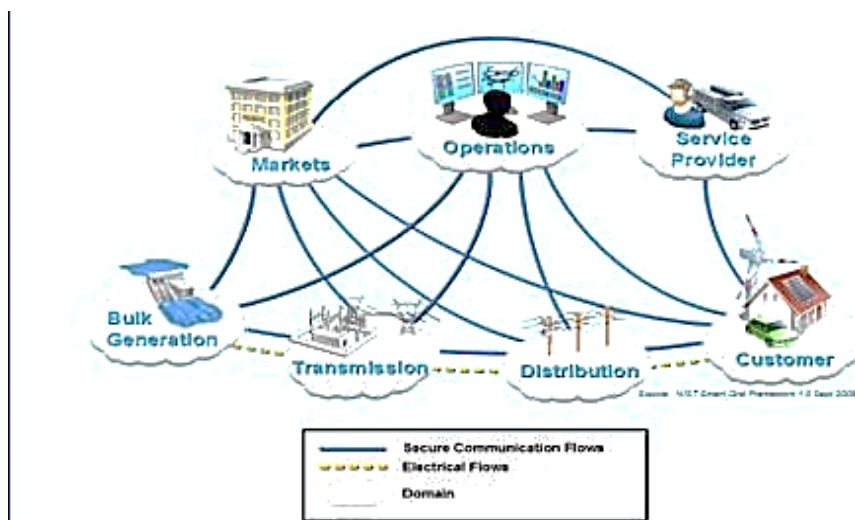


Рисунок 1.7 – Ілюстрація до режиму NIST smart grid

Таким чином, технологія SmartGrids відкриває нові горизонти в розвитку енергетичних систем, створюючи основу для більш ефективного, надійного та екологічно безпечного енергозабезпечення майбутнього. Ця інноваційна платформа не лише оптимізує існуючі процеси, але й створює передумови для подальшого технологічного розвитку енергетичної галузі.

Розглядаючи концепцію «розумних мереж», важливо розуміти, що цей термін не применшує досконалість існуючих енергетичних систем. Сучасна структура електромереж є результатом багаторічної оптимізації, що враховує баланс між економічною ефективністю та надійністю енергопостачання. Проте стрімкий розвиток технологій та нові виклики енергетичного сектору вимагають подальшої еволюції мережевої інфраструктури.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії набуває все більшого значення в структурі енергогенерації. Особливістю таких джерел є їхня висока варіативність виробництва та географічна розосередженість, що створює необхідність впровадження інноваційних підходів до управління енергосистемою. Паралельно з цим, поява нових типів споживачів, зокрема електромобілів, не лише ставить нові завдання перед енергетичною галуззю, але й відкриває перспективні можливості для двосторонньої взаємодії з мережею. Ключовим елементом модернізації енергетичної інфраструктури стає розвиток кіберфізичних систем, які забезпечують всеохоплюючий моніторинг та керування мережею. Впровадження передових сенсорних технологій та систем активації створює фундамент для підвищення гнучкості та адаптивності енергосистеми майбутнього. Однак важливо підкреслити, що сама по собі наявність засобів моніторингу та керування не гарантує ефективної роботи мережі без впровадження відповідних систем управління.

Таким чином, концепція розумних мереж представляє собою еволюційний розвиток існуючих енергетичних систем, спрямований на вирішення нових технологічних викликів та розширення функціональних можливостей мережі. Це дозволяє не лише ефективно інтегрувати інноваційні

технології виробництва та споживання енергії, але й створює передумови для формування більш стійкої та адаптивної енергетичної системи майбутнього.

У сучасних умовах розвитку енергетики мікромережі відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного розподілу електроенергії від децентралізованих джерел генерації. Ключовим аспектом їхнього функціонування є правильна організація взаємозв'язків між окремими генеруючими установками, що безпосередньо впливає на загальну продуктивність системи.

Силов електроніка виконує критично важливі функції в мікромережах, забезпечуючи оптимальний відбір потужності від джерел генерації та захист обладнання від динамічних навантажень. Особлива увага приділяється контролю якості електроенергії, управлінню активною та реактивною потужністю на межі з основною мережею. Системи керування забезпечують стабілізацію частоти та мінімізацію гармонічних спотворень.

Архітектура управління мікромережею базується на двоконтурній системі регулювання через мікроінвертори. Внутрішній контур, що функціонує як контролер струму, забезпечує необхідну якість електроенергії шляхом регулювання струмових параметрів. Зовнішній контур, який виконує роль контролера напруги, відповідає за підтримку стабільності напруги мережі та оптимізацію потоків активної та реактивної потужності.

Для забезпечення синхронної роботи компонентів мікромережі застосовуються різноманітні методи синхронізації, включаючи системи фазового автопідстроювання частоти та методи визначення переходу через нуль. Важливим елементом інфраструктури мікромереж є системи накопичення енергії різних типів – акумуляторні батареї, маховики, суперконденсатори, які допомагають компенсувати можливі збої та підвищують надійність електропостачання.

Інтеграція цих технологічних рішень створює комплексну систему, здатну забезпечити стабільне та якісне електропостачання споживачів при максимально ефективному використанні доступних джерел генерації. Така

архітектура мікромережі дозволяє досягти оптимального балансу між надійністю електропостачання та ефективністю використання енергоресурсів.

Мікромережі становлять складну електроенергетичну систему з безліччю децентралізованих джерел генерації, де ключову роль відіграє ефективне з'єднання та управління елементами. Силова електроніка виконує функції оптимізації та захисту генеруючих потужностей, забезпечуючи максимальну ефективність перетворення енергії.

1.3 Підходи до комбінованого використання джерел відновлюваної енергії в рамках гібридних електроенергетичних систем

Інноваційні підходи в галузі відновлюваної енергетики передбачають комплексне використання різноманітних джерел генерації електричної та теплової енергії. Зокрема, сучасні комбіновані електроенергетичні системи демонструють унікальні можливості інтеграції сонячних, вітрових, геотермальних та інших альтернативних технологій. Такі інженерні рішення особливо ефективні для автономного забезпечення електроенергією важкодоступних та віддалених територій, де традиційна інфраструктура має обмежені можливості.

Перевагою комбінованих енергетичних систем є їхня висока адаптивність та здатність оптимізувати процеси виробництва електроенергії. Завдяки взаємодоповненню різних джерел досягається значне підвищення надійності та стабільності електропостачання, а також суттєве зниження собівартості генерованої електроенергії. Світова практика демонструє стрімке зростання впровадження подібних технологічних рішень, особливо в регіонах з нестабільною традиційною енергетичною інфраструктурою.

Дослідження в галузі комбінованих відновлюваних електроенергетичних систем (HRES) зосереджені переважно на вивченні інноваційних підходів до розподілу електричної енергії. Сучасні наукові

розробки пропонують три принципово різні архітектурні конфігурації, які різняться методиками електропостачання та технічними характеристиками.

Перша архітектура – мікромережа постійного струму - становить собою складну електроенергетичну систему з унікальними характеристиками. Її особливістю є використання виключно постійного струму для розподілення електроенергії, що принципово відрізняє її від традиційних електричних мереж. До складу такої системи входять відновлювані генератори, накопичувачі електроенергії та споживачі, розраховані на постійний струм.

Серед ключових переваг даної конфігурації – підвищення загальної енергетичної ефективності за рахунок мінімізації перетворювальних процесів. Зокрема, усуваються багаторазові перетворення електроенергії між змінним та постійним струмом, що притаманні класичним електромережам. Технічне рішення дозволяє суттєво знизити втрати електроенергії, спростити конструктивні особливості системи та здешевити її впровадження.

Додатковою перевагою мікромереж постійного струму є можливість більш гнучкої інтеграції систем акумулювання електроенергії, що підвищує автономність та стабільність електропостачання. Такий підхід особливо актуальний для віддалених районів та об'єктів з нестабільною традиційною електроінфраструктурою.

Мікромережі змінного струму являють собою складну електроенергетичну архітектуру з унікальними технологічними рішеннями. Основним елементом такої системи слугує перетворювач, призначений для трансформації змінного струму в постійний, що забезпечує живлення відповідних споживачів.

Принципова особливість цієї конфігурації полягає в індивідуальному підключенні кожного відновлюваного джерела електроенергії через спеціалізований перетворювач до центральної шини змінного струму. Такий підхід надає системі додаткову живучість та резервування – у разі виходу з ладу одного генератора інші продовжують функціонувати без суттєвих обмежень.

Водночас архітектура має певні технічні обмеження, зокрема складність синхронізації різнотипних генераторів. Необхідність забезпечення стабільної частоти та фази струму потребує впровадження складних інженерних рішень, що підвищує технологічну складність мікромережі змінного струму.

Незважаючи на наявні труднощі, така система залишається перспективним напрямком розвитку децентралізованої енергетики, особливо в контексті використання відновлюваних джерел електроенергії.

Системи накопичення електроенергії на базі акумуляторних батарей (BESS) відіграють критичну роль у сучасній відновлюваній енергетиці. Їхня ключова функція полягає в нівелюванні природної нестабільності генерації електроенергії від альтернативних джерел, таких як сонячні панелі або вітрогенератори.

Унікальність акумуляторних систем полягає в їхній здатності накопичувати електричну енергію під час її надлишку та забезпечувати електропостачання в періоди низької генерації або підвищеного споживання. Це дозволяє суттєво підвищити надійність та керованість розподілених електроенергетичних систем.

Серед основних переваг BESS - висока ефективність накопичення та трансформації електроенергії, гнучкість використання в різноманітних додатках, включаючи резервне живлення та інтелектуальне керування енергетичними потоками. Технологія забезпечує не лише тимчасове акумулювання, але й повноцінну стабілізацію роботи електромереж з відновлюваними джерелами енергії.

Сучасні акумуляторні системи демонструють значний потенціал для інтеграції в різноманітні енергетичні архітектури, суттєво підвищуючи ефективність та автономність альтернативної електроенергетики.

Системи накопичення енергії з використанням акумуляторів (BESS) характеризуються тривалим експлуатаційним періодом та підвищеною надійністю порівняно з альтернативними технологіями зберігання електроенергії. Вони становлять ключовий елемент трансформації сучасної

енергетичної інфраструктури в напрямку більш стійких та екологічно безпечних рішень.

Методології оптимізації функціонування гібридних відновлюваних електроенергетичних систем (HRES) передбачають впровадження складних алгоритмічних підходів для забезпечення максимальної ефективності генерації та споживання електроенергії. Основне завдання таких методів - створення механізмів прогнозування та збалансування потоків електроенергії з урахуванням специфіки відновлюваних джерел.

Сучасні стратегії оптимізації включають три основні напрямки дослідження: інтелектуальні методи, які базуються на машинному навчанні та штучному інтелекті; ітераційні підходи, що передбачають послідовне наближення до оптимального рішення; та обчислювальні методи з використанням складних математичних моделей та алгоритмів.

Ключова мета запропонованих методик - забезпечити максимальну адаптивність та стабільність електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії, створивши умови для ефективного управління електричними навантаженнями та системами акумулювання.

Схема комбінованої електроенергетичної системи подана на рис. 1.8.

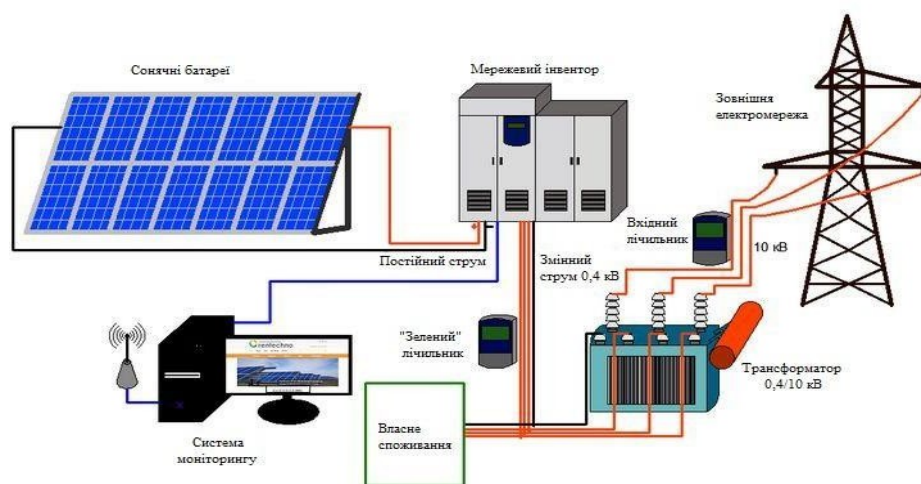


Рисунок 1.8 – Типова схема комбінованої електроенергетичної системи

Комбіновані електроенергетичні системи з відновлюваними джерелами енергії складають перспективну альтернативу традиційним енергетичним системам, забезпечуючи значне скорочення шкідливих викидів та підвищення екологічної стійкості. Дослідження показують унікальні властивості таких систем, які дозволяють поєднувати різні типи генерації електроенергії. Зокрема, комбінування нетрадиційних джерел здатне ускладнити структуру системи, збільшуючи її порядок та створюючи можливості для більш складних алгоритмів керування.

Принципова перевага гібридних ВДЕ полягає в руйнуванні стереотипу про їхню економічну неефективність. Сучасні технологічні рішення дозволяють інтегрувати традиційні та альтернативні джерела енергії, формуючи мікромережі, здатні працювати в базовому та піковому режимах електрогенерації. Такий підхід відкриває широкі можливості для впровадження інноваційних енергетичних технологій, особливо в віддалених районах, де традиційна інфраструктура має обмежені можливості.

Гібридні відновлювані джерела енергії демонструють різні режими функціонування, серед яких традиційний та еволюційний підходи мають суттєві відмінності.

У традиційному режимі всі елементи системи працюють одночасно, формуючи структуру, подібну до базової електростанції. Однак такий підхід має значні обмеження – він не забезпечує очікуваної економічної ефективності та надійності. Наприклад, об'єднання сонячних та вітрових електрогенеруючих систем створює ризики нестабільності через змінну та періодичну природу відновлюваних джерел. Додатковою проблемою є висока ймовірність каскадного виходу з ладу всієї системи у разі відмови одного з її компонентів.

Альтернативні режими функціонування комбінованих електроенергетичних систем з ВДЕ передбачають більш гнучкі стратегії інтеграції та взаємодоповнення різнотипних джерел енергії, що дозволяє підвищити загальну надійність та ефективність електроенергетичних систем.

Режими функціонування гібридних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) мають принципові відмінності в архітектурі та стратегіях електрогенерації.

Послідовний режим, на відміну від традиційного, передбачає почергову роботу різнотипних генераторів. Ця конфігурація виявляється більш ефективною, особливо при поєднанні традиційних та нетрадиційних джерел енергії. Один з елементів системи може виконувати функцію базової електростанції, інший – працювати в піковому режимі.

Принципова перевага такого підходу полягає в можливості створення резервних потужностей та диверсифікації джерел електроенергії. Дослідницькі групи приділяють значну увагу розробці інтегральних схем, здатних забезпечити максимальну надійність та гнучкість енергетичних систем.

Розвиток розподіленої генерації та мікромереж створює передумови для впровадження інноваційних підходів в енергетичній галузі. Дослідження демонструють, що гібридні системи мають унікальні характеристики, які вирізняють їх серед інших технологічних рішень.

Суттєвим чинником підвищення ефективності таких систем стали технологічні досягнення в галузі силової електроніки та систем автоматичного контролю. Сучасні перетворювачі та інтелектуальні контролери дозволяють значно покращити надійність, економічність та продуктивність гібридних електроенергетичних комплексів.

Особливістю гібридних систем є можливість інтеграції різнотипних джерел енергії з урахуванням специфічних вимог розумних електромереж, що робить їх перспективним напрямком розвитку альтернативної енергетики.

Гібридні системи відновлюваної енергії демонструють унікальні переваги комплексного підходу до електрогенерації.

Ключова перевага таких систем полягає в можливості нівелювання природних коливань генерації електроенергії. Поєднання різнотипних джерел дозволяє компенсувати обмеження окремих технологій. Наприклад, сонячні

панелі забезпечують максимальну ефективність вдень, а вітрогенератори продовжують роботу вночі або при зменшенні сонячної активності.

Диверсифікація джерел електроенергії суттєво підвищує надійність та стабільність енергетичної системи. Інтеграція кількох типів генераторів мінімізує ризики, пов'язані з залежністю від єдиного джерела, забезпечуючи більш гнучке та стійке електропостачання.

Такий підхід створює передумови для формування більш ефективних, екологічно чистих та адаптивних енергетичних інфраструктур, здатних оперативно реагувати на зміни навколишнього середовища та споживацького попиту.

Використання гібридних систем відновлюваної енергії є потужним інструментом зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення сталого електропостачання.

Ключова перевага таких систем - суттєве скорочення викидів парникових газів через заміщення традиційних викопних джерел енергії. Особливо актуальним це стає для віддалених районів, де відсутня централізована електроінфраструктура.

Інтеграція систем акумуляування електроенергії дозволяє досягти високої стабільності електропостачання. Акумулятори забезпечують неперервність живлення під час коливань генерації сонячними та вітровими електростанціями, що підвищує надійність та автономність енергетичних систем.

Види комбінованих електроенергетичних систем. Гібридні системи відновлюваної енергії демонструють високу ефективність при поєднанні різних технологічних рішень.

Сонячно-вітрові системи є класичним прикладом такої інтеграції. Сонячні панелі забезпечують генерацію електроенергії протягом світлового дня, а вітрові турбіни доповнюють їх роботу, виробляючи електрику в будь-який час за наявності вітру. Це дозволяє створити більш стабільну та передбачувану систему електропостачання.

Гібридні сонячно-гідроелектричні комплекси являють собою ще один перспективний варіант поєднання відновлюваних джерел. Сонячні панелі генерують електроенергію вдень, а гідроелектростанції використовують акумульовані водні ресурси для вироблення електрики в інший час.

Такі інтегровані рішення демонструють високий потенціал для створення надійних, екологічно чистих та ефективних енергетичних систем.

Вітро-гідроелектричні комплекси забезпечують взаємодоповнення вітрових турбін та гідроелектростанцій, дозволяючи оптимізувати виробництво електроенергії залежно від поточної ефективності кожного джерела.

Найбільш складні архітектури - сонячно-вітро-гідроелектричні системи - об'єднують три різні технології, що максимально знижує ризики залежності від єдиного джерела та підвищує стабільність електропостачання.

Сонячно-вітро-батарейні системи додають елемент акумулювання електроенергії, що дозволяє зберігати надлишкову генерацію та використовувати її в періоди низької активності відновлюваних джерел.

Такий інтегральний підхід створює потужні передумови для формування високоефективних, екологічно чистих та адаптивних енергетичних інфраструктур майбутнього.

Різноманітні гібридні енергетичні системи демонструють унікальні підходи до комбінування відновлюваних джерел енергії з метою підвищення ефективності та надійності електрозабезпечення. Такі інноваційні рішення можна адаптувати під специфічні вимоги конкретних проектів, враховуючи географічні, кліматичні та інфраструктурні особливості певної місцевості.

Наприклад, інтегрована система, яка поєднує сонячну та вітрову генерацію, демонструє високий потенціал автономного функціонування. У денний період сонячні фотоелектричні модулі перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, накопичуючи її в акумуляторних батареях. Коли сонячна активність зменшується, вітрові турбіни продовжують

виробляти електрострум, забезпечуючи безперервне живлення та додаткове заряджання накопичувачів.

Інший цікавий варіант гібридної системи передбачає інтеграцію сонячної та гідроакумуючої технологій. Протягом світлового дня сонячні панелі генерують електроенергію, яку використовують для закачування води у верхній резервуар чи водосховище. У темну пору доби вода самопливом проходить через гідротурбіни, виробляючи додаткову електричну потужність та компенсуючи нестабільність сонячної генерації.

Такі комплексні рішення дозволяють не лише підвищити ефективність використання відновлюваних енергоресурсів, але й забезпечити стабільне електропостачання в умовах мінливих кліматичних характеристик. Поєднання різних відновлюваних джерел створює синергетичний ефект, який суттєво покращує надійність та автономність енергетичних систем.

Microgrid. Мікромережа – це інноваційна локальна електроенергетична система, що функціонує як автономний, самодостатній комплекс. Її унікальність полягає в здатності генерувати, накопичувати та розподіляти електричну енергію в межах обмеженої території або спеціалізованого об'єкта, незалежно від централізованої електромережі.

Структурно мікромережа складається з диверсифікованих джерел електрогенерації, котрими можуть бути сонячні панелі, вітрові турбіни, біогазові установки чи інші відновлювальні технології, систем акумуляції електроенергії та інтелектуальних систем управління. Такий підхід забезпечує високу надійність електропостачання, гнучкість налаштування режимів роботи та можливість оперативної адаптації до змінних споживацьких потреб.

Принципова перевага мікромережі – її здатність працювати як в режимі підключення до центральної електромережі, так і повністю автономно, що особливо актуально для віддалених районів, промислових підприємств чи критично важливих інфраструктурних об'єктів.

Мікромережі репрезентують надзвичайно гнучку та багатокomпонентну енергетичну екосистему, здатну інтегрувати широкий спектр генеруючих

потужностей. Серед основних джерел електроенергії можна виділити відновлювальні технології, зокрема сонячні фотоелектричні панелі, вітрогенератори різної потужності, а також традиційні генератори на базі двигунів внутрішнього згоряння, що забезпечують резервне або додаткове живлення.

Невід'ємним елементом архітектури мікромережі є системи накопичення енергетичних ресурсів. Найпоширенішими накопичувачами виступають сучасні акумуляторні батареї, які дозволяють зберігати надлишкову електроенергію, та інноваційні теплоакумуючі комплекси, що забезпечують тривале збереження теплової енергії.

Інтелектуальні системи управління становлять ключову ланку функціонування мікромережі, виконуючи складні завдання оптимізації енергетичних потоків. Такі системи здійснюють постійний моніторинг наявних генеруючих потужностей, поточного споживання та прогнозування енергетичних потреб, забезпечуючи максимально ефективне балансування виробництва та розподілу електроенергії.

Технологічна архітектура мікромережі дозволяє динамічно адаптуватися до змінних зовнішніх умов, підтримувати високий рівень енергетичної автономності та забезпечувати стабільне електропостачання навіть у складних експлуатаційних середовищах.

Мікромережі демонструють винятково ефективні рішення для електрозабезпечення в складних інфраструктурних умовах. Особливо корисними вони стають у регіонах з обмеженим доступом до централізованих електромереж, де критично важлива стійкість електропостачання.

Унікальна перевага таких автономних систем полягає в можливості суттєвого зменшення техногенного навантаження на довкілля. Завдяки пріоритетному використанню відновлюваних джерел енергії мікромережі сприяють скороченню вуглецевих викидів та підвищенню загальної екологічності енергетичного сектору.

Функціональна архітектура мікромережі забезпечує максимальну гнучкість та адаптивність. Система здатна динамічно перерозподіляти енергетичні потоки, оперативно реагувати на зміни споживацького навантаження та оптимізувати процеси генерації й акумуляції електроенергії.

Практична цінність мікромереж особливо відчутна в контексті децентралізації енергетичної інфраструктури, підвищення її стійкості та забезпечення локальної енергетичної незалежності, а їх побудову проілюстровано на рис. 1.9.

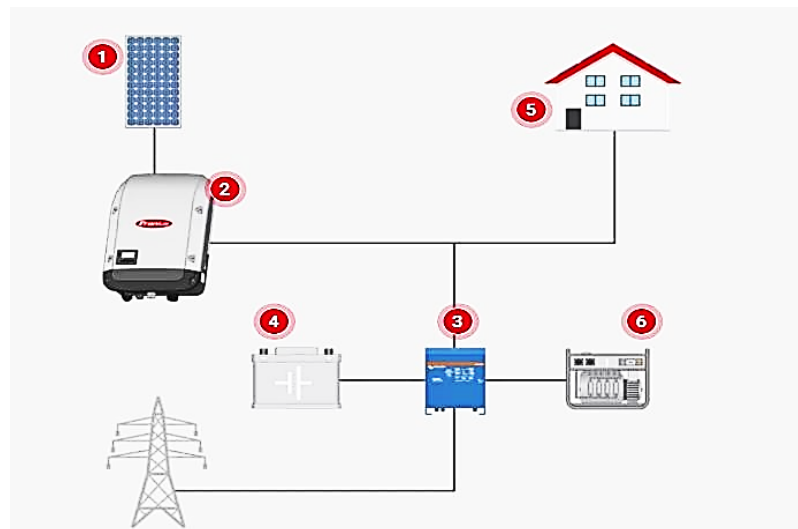


Рисунок 1.9 – Принцип підключення мікроенергетичних систем

Впровадження мікромереж відкриває принципово нові можливості для диверсифікації енергетичних систем. Вони дозволяють ефективно інтегрувати різноманітні джерела відновлюваної енергії, забезпечуючи максимальну гнучкість та адаптивність локальних енергетичних комплексів.

Технологічна концепція мікромереж сприяє не лише підвищенню надійності електропостачання, але й створює передумови для суттєвого зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Завдяки пріоритетному використанню екологічних джерел генерації електроенергії, такі системи стають важливим інструментом у боротьбі зі зміною клімату та просуванні принципів сталого розвитку.

Перспективність мікромереж полягає в їхній здатності забезпечувати енергетичну незалежність та стійкість локальних спільнот, створюючи передумови для більш децентралізованої та діджиталізованої моделі енергетичного господарства.

Контролер мікромережі – це високоінтелектуальний апаратно-програмний комплекс управління енергетичними ресурсами, призначений для забезпечення стабільності та ефективності локальної електричної системи.

Основні функціональні характеристики контролера включають:

Динамічне управління енергетичними активами в режимі реального часу, що передбачає: постійний моніторинг балансу генерації та споживання електроенергії; оптимізацію розподілу енергетичних потоків; миттєве реагування на зміни навантаження.

Системні переваги такого контролера полягають у: автоматизованій диспетчеризації активів з мінімізацією експлуатаційних витрат; здатності до прогнозування та упередження позштатних ситуацій; підтриманні стабільності електропостачання навіть в умовах аварійного відключення від централізованої мережі. Ключова особливість – швидкість прийняття рішень та адаптивність до динамічних змін у мікромережі, що забезпечує максимальну надійність енергетичної системи.

Управління системою мікромережі представляє собою комплексний процес, що базується на інтелектуальному моніторингу та контролі в режимі реального часу. Ефективність функціонування такої системи забезпечується завдяки впровадженню передових технологій енергоменеджменту.

Інтелектуальна система керування здійснює оптимальний розподіл електроенергії між підключеними активами, використовуючи складні алгоритми прогнозування та аналізу даних. Важливим аспектом є можливість врахування прогнозних метеорологічних умов для планування генерації від відновлюваних джерел енергії на найближчі години.

Локальний контролер отримує оперативні інструкції від системи енергоменеджменту, яка аналізує численні параметри та моделює майбутню

поведінку енергетичних активів. Це дозволяє оптимізувати роботу мікромережі на декілька днів наперед, забезпечуючи максимальну енергоефективність. При підключенні до централізованої електромережі система управління зосереджується на дотриманні технічних обмежень у точці приєднання, контролі параметрів трансформатора та наданні допоміжних послуг з регулювання частоти й напруги. Особлива увага приділяється максимізації економічної ефективності через оптимізацію фінансових потоків та забезпечення стабільності електропостачання навіть у випадку аварійних ситуацій.

Мікромережі демонструють новаторський підхід до організації локальних систем електропостачання, пропонуючи унікальне поєднання надійності та гнучкості. Їхня архітектура дозволяє функціонувати як у синхронізації з центральною електромережею, так і в повністю автономному режимі. Особлива цінність мікромереж проявляється у випадках, коли підключення до централізованої мережі ускладнене через географічні особливості місцевості, відсутність розвиненої інфраструктури або економічну недоцільність. Типовими прикладами є віддалені острівні території, гірські поселення чи промислові об'єкти у важкодоступних районах.

Інноваційний характер мікромереж розкривається через їхню здатність до автономізації в критичних ситуаціях. При виникненні природних катаклізмів, необхідності проведення технічного обслуговування або аварійних ситуацій система автоматично переходить на живлення від локальних джерел енергії.

Сучасні енергетичні спільноти активно впроваджують концепцію мікромереж, інтегруючи дахові сонячні електростанції з системами накопичення енергії. Такий підхід суттєво підвищує рівень енергетичної незалежності та оптимізує баланс між локальним виробництвом та споживанням електроенергії, створюючи стійку модель децентралізованого енергозабезпечення.

Характеристики та переваги мікромережевих систем. Сучасна мікромережа виступає надійним джерелом електропостачання, особливо актуальним для територій, де спостерігаються регулярні перебої з електроенергією або існує застаріла інфраструктура енергопостачання. Завдяки інтегрованим генераційним потужностям та системам акумулювання енергії така система гарантує безперебійне забезпечення електроенергією критично важливих об'єктів та споживачів.

Впровадження мікромережевих технологій створює можливості для суттєвої оптимізації енергетичних витрат шляхом інтеграції різноманітних відновлюваних джерел - сонячних панелей, вітрогенераторів, паливних елементів разом із накопичувачами енергії. Зниження залежності від традиційних викопних енергоресурсів безпосередньо впливає на скорочення операційних витрат та підвищення економічної ефективності енергосистеми в цілому.

Автономність та стратегічне значення мікромережевих технологій. Мікромережеві системи забезпечують унікальну можливість досягнення повної енергетичної незалежності через локальне виробництво та акумулювання електроенергії. Особливої актуальності такий підхід набуває для важкодоступних та периферійних територій, де традиційна інфраструктура електропостачання або відсутня, або має критично обмежені можливості.

Надзвичайно важливою перевагою децентралізованих енергетичних комплексів є їхня висока стійкість під час природних катаклізмів, техногенних аварій або масштабних соціальних потрясінь. Завдяки вбудованим механізмам автономної генерації та накопичення електроенергії мікромережі здатні підтримувати життєво важливі системи та об'єкти критичної інфраструктури навіть за умов повного колапсу централізованого енергопостачання.

Глобальний контекст впровадження мікромережевих рішень особливо виразно простежується в контексті подолання проблеми електрифікації віддалених регіонів. Статистичні дані свідчать, що понад 10% світового

населення досі позбавлені доступу до стабільного електропостачання. Автономні мікромережеві системи пропонують інноваційний та економічно ефективний інструмент вирішення цієї фундаментальної соціально-технологічної проблеми, особливо в країнах, що розвиваються, та в регіонах з обмеженою інфраструктурою.

Висновки до першого розділу

1. Виконаний узагальнений огляд стану питання та розвитку відновлюваної енергетики в світовому масштабі. Встановлено, що найбільш активно розвиваються сонячна, вітрова та гідроенергетика.

2. Стрімкий розвиток технологій відновлюваної енергетики у поєднанні з мікромережевими системами формує принципово новий підхід до організації енергетичного сектору. Інтеграція сонячних електростанцій та вітроенергетичних установок суттєво знижує екологічне навантаження та мінімізує залежність від вичерпних енергоресурсів. Децентралізовані енергетичні комплекси забезпечують створення автономних та високоефективних систем електропостачання, які успішно адаптуються до різноманітних споживчих потреб – від забезпечення житлових комплексів до енергопостачання промислових підприємств і віддалених територій.

3. Особливу перспективність демонструють комбіновані електроенергетичні системи енергопостачання, які органічно поєднують потенціал відновлюваних джерел із традиційними технологіями генерації. Така синергія дозволяє досягти оптимального балансу енергоспоживання з урахуванням специфічних умов експлуатації та локальних енергетичних потреб. Адаптивність гібридних комплексів гарантує безперебійність енергопостачання при одночасному скороченні шкідливих викидів, що відіграє ключову роль у глобальному енергетичному переході до сталого розвитку.

РОЗДІЛ 2

СХЕМНІ РІШЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Типові схемні рішення комбінованих електроенергетичних систем для об'єктів з малим електроспоживанням

Установки розподіленої генерації становлять важливий напрямок сучасної енергетичної трансформації, спрямованої на зменшення екологічного навантаження та підвищення ефективності електропостачання.

Технологічний спектр розподілених генераторів включає широкий діапазон відновлюваних та традиційних джерел електроенергії. Серед них – вітроенергетичні установки, сонячні фотоелектричні панелі, паливні елементи, біомасові генератори, а також мікротурбіни, газові та дизельні силові агрегати. Принципова перевага таких систем полягає в можливості безпосереднього наближення генерації до споживача, що суттєво мінімізує втрати при передачі електроенергії. Інтеграція розподілених генераторів з акумуляторними системами та адаптивними навантаженнями дозволяє формувати інноваційні низьковольтні мережеві архітектури, відомі як комбіновані мікроенергетичні системи.

Унікальність комбінованих рішень полягає в здатності функціонувати як в автономному режимі, так і в складі централізованої електромережі, що створює додаткові можливості для підвищення надійності та гнучкості енергетичних систем. Принциповий підхід до побудови таких систем проілюстрований на рис. 2.1.

Комбіновані електроенергетичні системи демонструють унікальні можливості інтеграції різнотипних джерел електрогенерації для підвищення ефективності та надійності електропостачання.

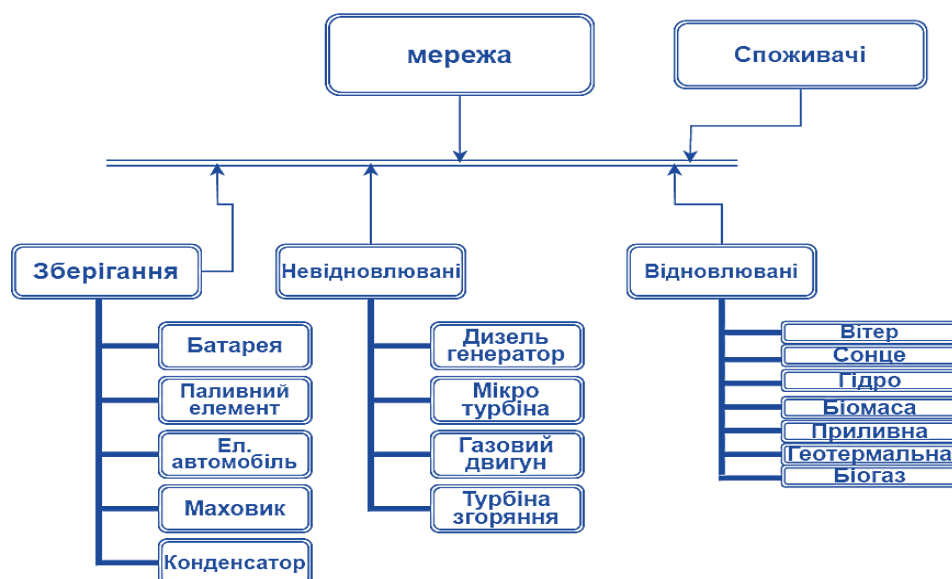


Рисунок 2.1 – Схема комбінованого електропостачання

Прикладом такого комплексного рішення слугує система, що поєднує біопаливні технології, сонячну генерацію та традиційні дизельні електростанції. Відповідна опису архітектура представлена на рис. 2.2, ілюструє принципи взаємодоповнення відновлюваних та традиційних джерел енергії. Використання біопалива забезпечує стабільне джерело електроенергії з відновлюваної сировини, сонячні панелі додають денну генерацію, а дизель-генератор слугує резервним та піковим джерелом. Такий підхід дозволяє мінімізувати залежність від єдиного типу генерації, підвищити екологічність та економічну ефективність енергетичної системи.

Зображена на рис. 2.2 конфігурація демонструє перспективність комбінованого підходу до електропостачання для забезпечення стабільного та адаптивного електроживлення.

Комбінована електроенергетична система передбачає використання дизельного генератора як резервного джерела електроживлення під час максимальних навантажень. Спеціалізований гібридний контролер виконує складні функції керування енергетичними потоками, забезпечуючи динамічну взаємодію різних джерел електроенергії. Технічні можливості контролера

включають неперервну синхронізацію сигналів напруги з різних генеруючих джерел та оптимальний розподіл електричного навантаження. Система здатна миттєво перемикатися між альтернативними джерелами живлення, підтримуючи стабільність електропостачання та максимізуючи ефективність використання наявних енергоресурсів.

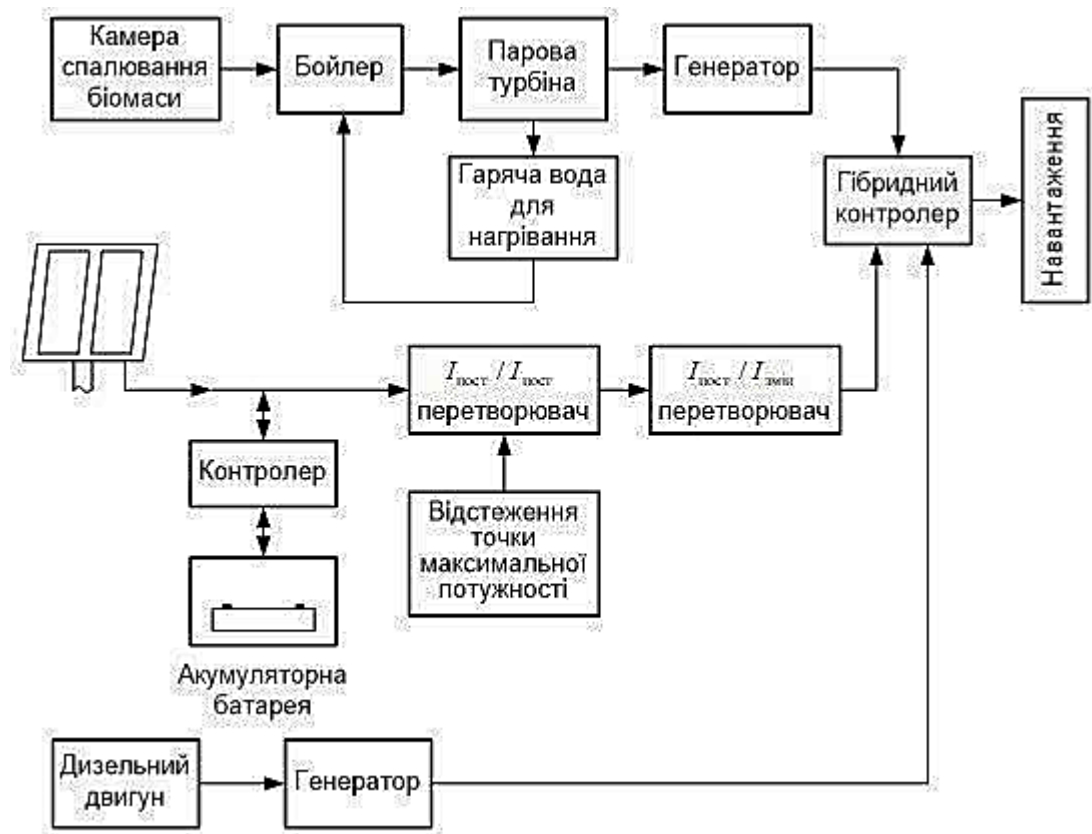


Рисунок 2.2 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з енергетичними установками на біопаливі, дизпаливі, фотоелектриці

Принципово важливим є раціональне управління черговістю підключення різних генераторів залежно від поточного навантаження та наявності первинних енергоносіїв. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити економічну ефективність та екологічність енергетичної системи.

Узагальнюючи концептуальні засади функціонування комбінованих електроенергетичних систем, можна стверджувати, що їхня принципова мета

полягає в інтеграції та оптимізації різноманітних джерел електроенергії. Основне завдання такої системи – забезпечити стаке й неперервне електропостачання споживачів шляхом динамічного перемикавання між наявними генеруючими потужностями.

Типова архітектура комбінованої електроенергетичної системи, яка поєднує сонячні та гідроелектростанції, передбачає комплексне використання відновлюваних джерел енергії приведена на рис. 2.3. Ключову роль в такій схемі відіграє інтелектуальний контролер, здатний оперативно перерозподіляти електричні потоки залежно від поточного навантаження та параметрів генерації. Інноваційність такого підходу полягає в максимальній адаптивності системи, здатності миттєво реагувати на зміни у виробництві та споживанні електроенергії, що підвищує надійність та ефективність електропостачання.

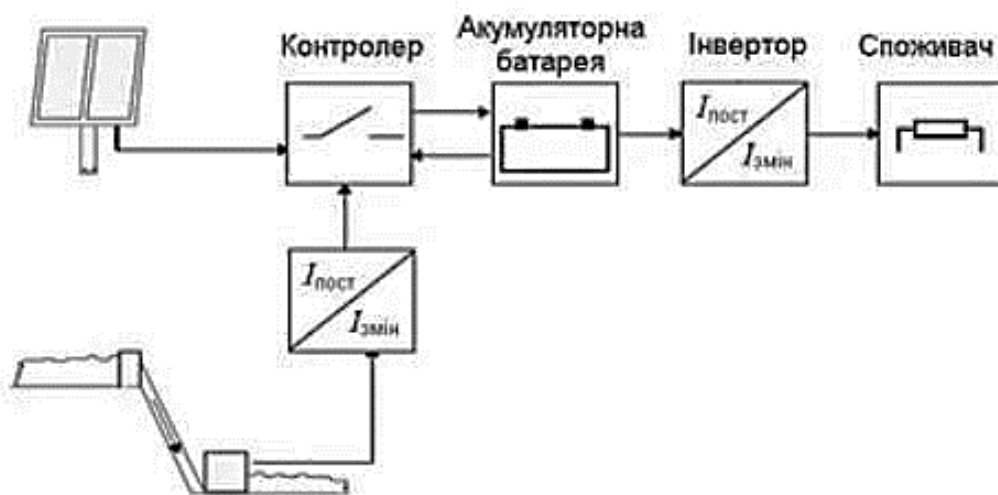


Рисунок 2.3 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з установками на фотоелектриці та гідравлічній енергії

У контексті інноваційних підходів до гідроенергетики особливого значення набуває використання компактних акумулюючих резервуарів, стратегічно розташованих з урахуванням місцевого ландшафту та

географічних особливостей. Ключовий принцип такої технології полягає у максимальному використанні природного рельєфу для створення ефективної системи накопичення та генерації електроенергії.

Функціональність гідроенергетичної системи визначається двома критичними параметрами: об'ємом акумульованої водної маси та інтенсивністю сонячного випромінювання. Інтеграція фотоелектричних технологій суттєво підвищує загальну продуктивність та стабільність системи, дозволяючи компенсувати можливі коливання водного потенціалу.

Типова комбінована електроенергетична система з вітроустановкою та фотоелектростанцією представлена на рис. 2.4, демонструє комплексний підхід до поєднання вітрової та сонячної генерації. Така архітектура забезпечує варіативність та резервування енергетичних джерел, що підвищує надійність електропостачання. Принципова перевага розглянутого підходу полягає в ефективному використанні природних ресурсів та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

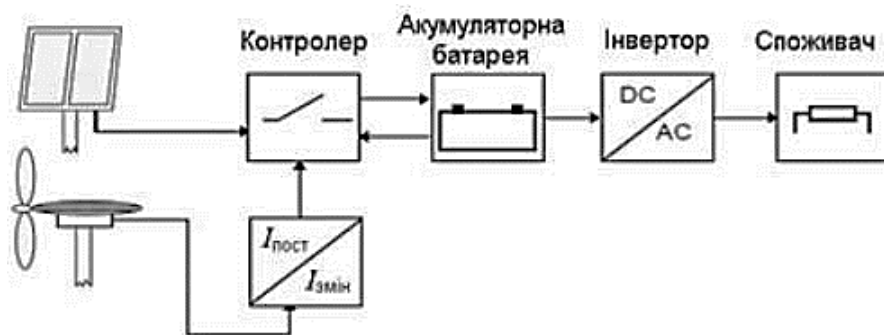


Рисунок 2.4 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з установками на фотоелектриці та енергії вітру

Комбінована електроенергетична система, що інтегрує сонячні та вітрові установки, являє собою інноваційний підхід до максимізації виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Інтелектуальний контролер відіграє ключову роль у забезпеченні оптимальної роботи

обладнання, динамічно визначаючи найефективніші режими генерації для кожного типу енергоустановок.

Система, представлена на рис. 2.5, демонструє комплексне поєднання різних технологій перетворення сонячної енергії: фотоелектричної та теплової, з додатковим підключенням до електричної мережі. Такий інтегрований підхід забезпечує високу надійність та гнучкість енергетичної інфраструктури. Принципова перевага зображеної системи полягає в здатності максимально ефективно використовувати наявні відновлювані джерела енергії, забезпечуючи стале та екологічно чисте електропостачання. Багатокомпонентна архітектура дозволяє системі адаптуватися до змінних погодних умов та коливань енергетичного навантаження.

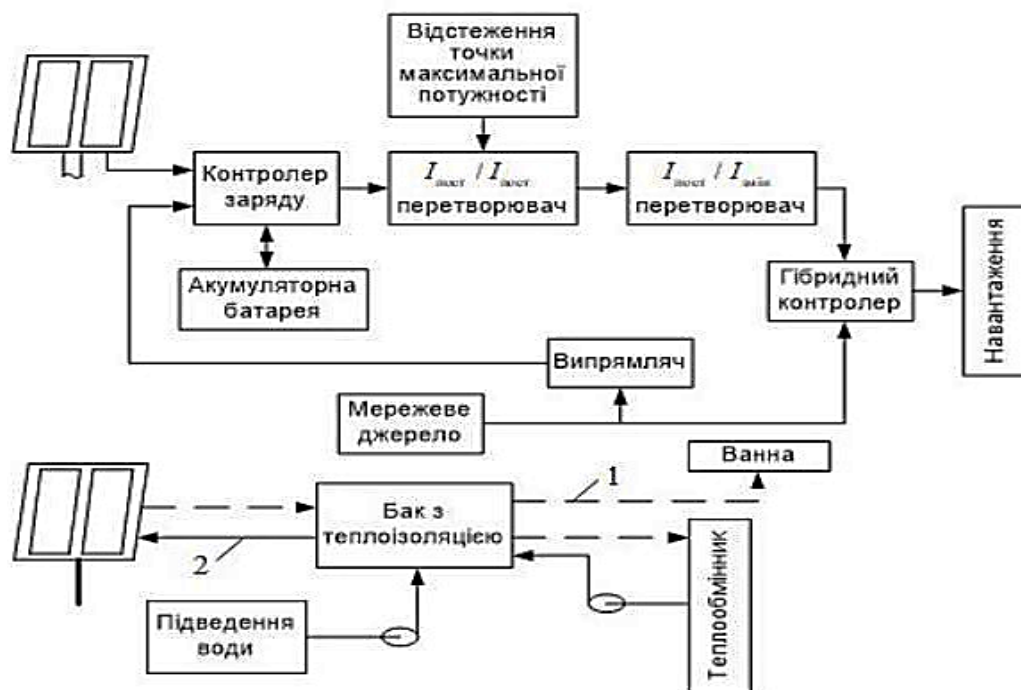


Рисунок 2.5 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з сонячними фотоелектричними та тепловими установками і електромережею

Комбінована електроенергетична система з інтегрованими технологіями фотовольтаїки та сонячної теплоенергетики представляє собою комплексне

рішення для ефективного використання сонячної енергії. Система поєднує два основні механізми перетворення сонячного випромінювання: фотоелектричні панелі для генерації електричної енергії та сонячні колектори для теплопостачання. Контролер керування забезпечує багатофункціональне управління енергетичними потоками. Він здійснює оптимізацію потужності, контролює процеси накопичення надлишкової електроенергії в акумуляторних системах та забезпечує інтеграцію з електричною мережею через бідірекційний двонаправлений інвертор.

Принципова перевага такого гібридного підходу полягає в максимальній ефективності використання відновлюваних енергетичних ресурсів, забезпеченні стабільного електропостачання та можливості двостороннього обміну електроенергією з централізованою мережею.

В подальших дослідженнях буде розглянуто дві схеми комбінованих електроенергетичних систем, що містять сонячну фотоелектростанцію та мікрогідроелектростанцію.

2.2 Некеровані елементи комбінованих електроенергетичних систем та їх моделі

На рис. 2.6 представлено найпростішу і типову комбіновану електроенергетичну систему, де сонячна електростанція працює паралельно з централізованою електричною мережею. Ключова особливість такої системи полягає в її здатності забезпечувати електропостачання різних типів навантажень за рахунок синергії двох джерел енергії. Трансформаторний вузол виступає критичним елементом, що дозволяє не лише споживати електроенергію від сонячної електростанції, але й передавати її надлишки до загальної електромережі.

Комбінована архітектура забезпечує високу гнучкість та надійність електропостачання, створюючи можливість для оптимізації енергетичних потоків та підвищення ефективності використання ВДЕ.

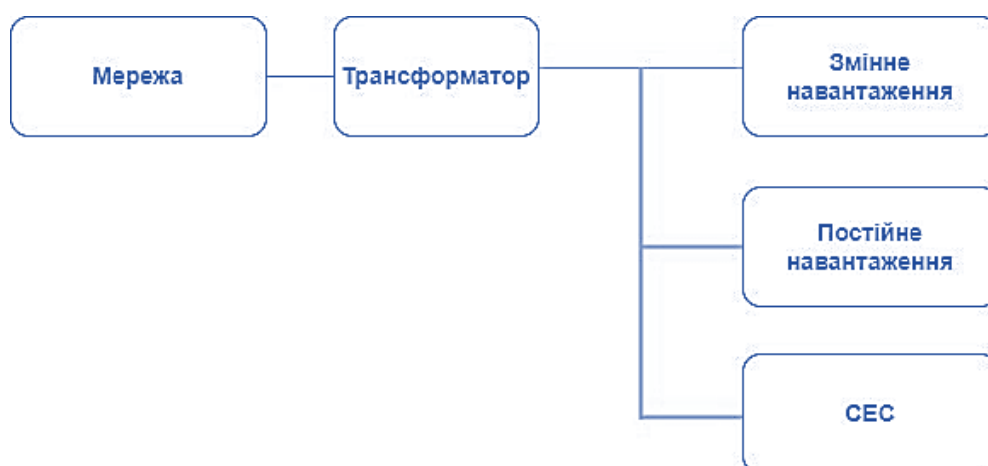


Рисунок 2.6 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з сонячною електростанцією та мережею централізованого живлення

Моделювання роботи комбінованої електроенергетичної системи виконано за допомогою потужного інтегрованого середовища для наукових та інженерних обчислень, що має широкий спектр застосування у різних галузях досліджень – MATLAB. Ключові характеристики MATLAB включають наявність власної мови програмування, бібліотек спеціалізованих функцій та блоків для моделювання складних систем. Особливої популярності програма набула серед науковців, інженерів та дослідників завдяки здатності ефективно опрацьовувати матричні дані, будувати складні математичні моделі і графіки.

MATLAB являє собою унікальне інтегроване середовище для наукових та інженерних обчислень з низкою важливих характеристик. Мова програмування MATLAB розроблена з орієнтацією на математичні операції, що забезпечує природній синтаксис для чисельних розрахунків.

Принципова особливість середовища полягає в ефективній роботі над матрицями та векторами, тому йому нема рівних як інструменту для лінійної алгебри та складних математичних перетворень. Вбудовані засоби візуалізації дозволяють представляти результати у вигляді графіків, діаграм та інших графічних форм. Потужна бібліотека математичних функцій охоплює

широкий спектр наукових та інженерних задач: від статистичного аналізу до оптимізаційних розрахунків. Додаткової гнучкості середовищу надає можливість інтеграції з іншими мовами програмування, зокрема C++, Python.

Вбудований модуль Simulink забезпечує поглиблене моделювання динамічних систем, що робить MATLAB потужним інструментом для наукових досліджень та інженерних розрахунків.

Для моделювання в середовищі MATLAB використовуються спеціалізовані блоки, які забезпечують ефективне представлення та опрацювання складних систем. Ключові блоки включають джерела сигналів, перетворювачі, контролери та блоки математичної обробки.

Типова структура моделювання передбачає використання взаємопов'язаних блоків, що дозволяють імітувати роботу електричних, механічних та інших систем. Кожен блок виконує специфічну функцію: генерує, перетворює або аналізує вхідні та вихідні сигнали.

Серед основних типів блоків можна виділити: генератори сигналів, підсилювачі, фільтри, перетворювачі координат, логічні блоки та блоки затримки. Такий модульний підхід дозволяє створювати складні багаторівневі моделі з високим ступенем деталізації та точності відтворення реальних процесів. Інтерактивне середовище дає широкі можливості для налаштування параметрів блоків, що підвищує гнучкість та інформативність моделювання.

Інструмент моделювання трифазного джерела живлення централізованої мережі. У контексті електроенергетичних систем трифазне джерело напруги є фундаментальним елементом моделювання. Характерною особливістю такої системи є наявність трьох фазних джерел, що генерують електричну напругу з взаємним зсувом на 120° . Структура включає трифазне джерело, послідовно з'єднане з гілкою R-L (резистивно-індуктивною). Резистивний компонент R відображає активний опір провідників, а індуктивний L характеризує електромагнітні властивості системи. Додатково в гілці може бути присутній конденсатор C, що розширює діапазон електричних характеристик для моделювання електричних процесів.

Принципова перевага такої моделі полягає в можливості детального аналізу електричних режимів, взаємодії різних компонентів та прогнозування поведінки енергетичних систем. Представлений на рис. 2.7, а блок задачі електричних параметрів системи живлення в точці підключення комбінованої електроенергетичної системи є потужним інструментом для моделювання та детального аналізу електричних кіл змінного струму в енергетичних мережах. Такий блок дозволяє провести комплексну оцінку електричних параметрів системи. Дослідження дозволяє визначити ключові характеристики: миттєві значення струму та напруги, розрахувати активну й реактивну потужність, простежити динамічні зміни параметрів у часовому вимірі.

Інструмент моделювання трифазного трансформатора. Трифазний трансформатор є ключовим елементом електроенергетичних систем, призначеним для перетворення електричної напруги. Унікальність конструкції полягає в можливості створення трифазного пристрою шляхом об'єднання трьох однофазних трансформаторів. Така структура складається з трьох окремих трансформаторних модулів, кожен з яких має власні первинну та вторинну обмотки. Первинна обмотка підключається до живлячого джерела, а вторинна живить навантаження. У трифазному трансформаторі функціонують три незалежні пари обмоток. Принципова перевага такої архітектури – можливість гнучкого налаштування параметрів перетворення електричної енергії, забезпечення ефективної передачі потужності та адаптації до різних режимів електропостачання. Конструктивні особливості дозволяють реалізувати різні схеми з'єднання обмоток: зірка, трикутник, що розширює функціональні можливості трансформатора в електричних мережах. Трифазний трансформатор є критичним компонентом електроенергетичних систем, що забезпечує неперервне живлення та ефективний розподіл електроенергії. Архітектура трансформатора з використанням трьох однофазних модулів дозволяє досягти високої гнучкості та надійності в роботі. Така конструкція забезпечує стабільне перетворення напруги та струму в

трифазних системах, що має принципове значення для промислових, комерційних та побутових електромереж.

Параметри трансформатора задаються у блоці, загальний вигляд якого представлений на рис. 2.7, б, демонструють технічні характеристики пристрою та особливості взаємодії окремих трансформаторних елементів. Організаційні рішення, зокрема підбір напруги живлення, дозволяють оптимізувати процеси передачі електричної енергії, мінімізувати втрати та підвищити загальну ефективність електропостачання.

Інструмент моделювання блоку варіативного навантаження. Блок варіативного електричного навантаження у сфері електротехніки репрезентує систему, що характеризується динамічною зміною електроспоживання та опору впродовж певного часового проміжку. Така характеристика притаманна широкому спектру електричних пристроїв, які функціонують у режимі змінного електричного струму, включаючи складні промислові та побутові системи. Відповідний блок для задання параметрів приведений на рис. 2.7, в.

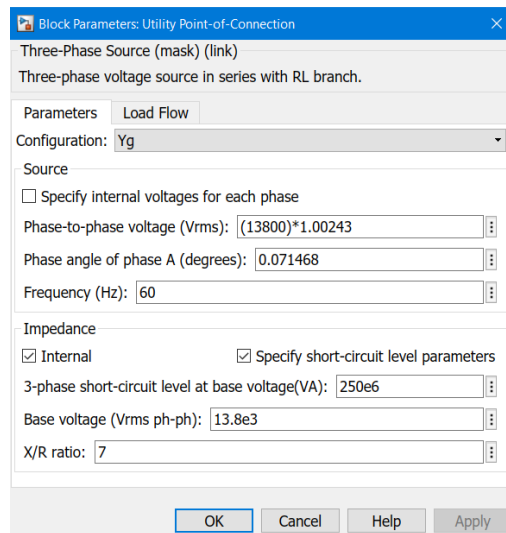
Електротехнічні дослідження засвідчують, що динамічні навантаження мають суттєвий вплив на показники потужності, енергоефективності та довговічності технічних систем. Вивчення особливостей таких навантажень дозволяє розробляти технічні рішення у галузі електроенергетики, створювати більш стабільні та адаптивні електричні мережі.

Інструмент моделювання постійного навантаження. Блок постійного навантаження являє собою складну електротехнічну конструкцію, що відтворює трифазне послідовне навантаження RLC з високою точністю моделювання електричних процесів. Така електрична система складається з трьох ідентичних гілок, які мають однакові параметри резистивності, індуктивності та ємності, що підключені послідовно в єдиному фазному просторі трифазної електромережі. Відповідний блок задачі параметрів приведений на рис. 2.7, г. Призначення даної системи полягає в комплексному дослідженні електричних характеристик та поведінки трифазних електричних мереж змінного струму. Використання подібних моделей доцільно для

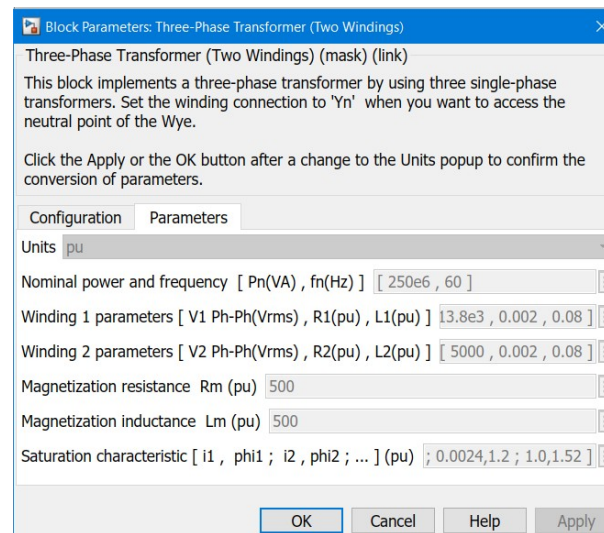
глибокого аналізу електродинамічних процесів, вивчення реакцій технічних систем на зовнішні впливи та навантаження.

Інструмент моделювання сонячної електростанції. Блок сонячної електростанції (SEC) репрезентує складну електротехнічну модель, що імітує роботу сонячної батареї з використанням трифазного динамічного навантаження. Архітектура блоку забезпечує комплексне моделювання процесів перетворення сонячної радіації на електричну енергію з подальшою інтеграцією в існуючу електромережу. Відповідний блок задачі параметрів приведений на рис. 2.7, д. Технологія «мережевого підключення» сонячних батарей являє собою інноваційний підхід до децентралізованої генерації електроенергії. За такої схеми фотоелектричні перетворювачі синхронізуються з традиційною електромережею, що дозволяє не лише споживати вироблену енергію безпосередньо, але й передавати її надлишкову частину назад в загальну електромережу.

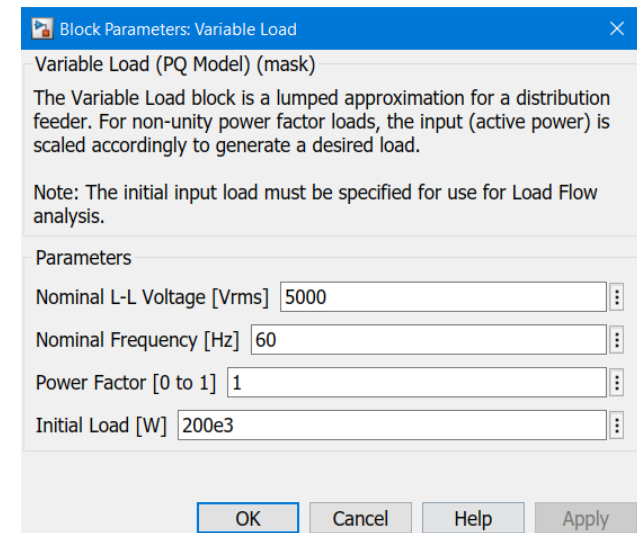
Цей електроенергетичний механізм має низку вагомих переваг: він сприяє підвищенню рівня енергоефективності, зменшує навантаження на традиційні викопні джерела енергії та створює передумови для формування більш екологічно орієнтованої моделі електропостачання. Подібні системи становлять ключовий елемент сучасної концепції розумних електромереж, демонструючи потенціал відновлюваної енергетики.



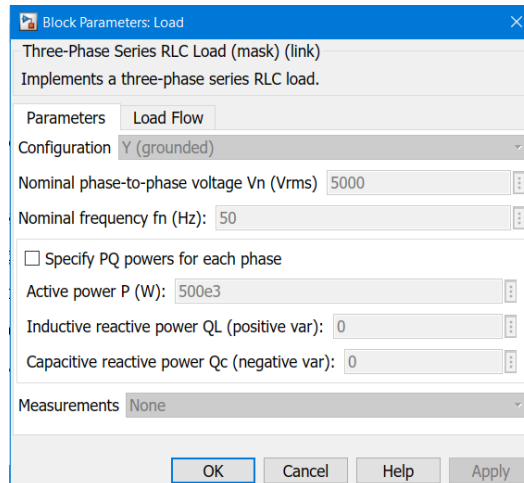
а) трифазне джерело напруги мережі



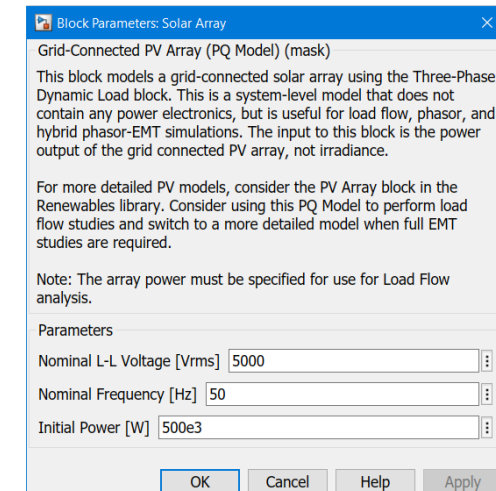
б) трифазний трансформатор



в) динамічне змінне навантаження



г) постійного навантаження



д) динамічне навантаження

Рисунок 2.7 – Параметри блоків моделювання некерованих елементів комбінованої електроенергетичної системи

2.3 Керовані елементи комбінованих електроенергетичних систем та їх моделі

На відміну від статичних систем з некерованим джерелом розподіленої генерації, багатокомпонентна електроенергетична система з диверсифікованими джерелами демонструє значно вищий рівень адаптивності та ефективності при забезпеченні електроживленням локальних споживачів, зокрема інфраструктури котеджних містечок та інших об'єктів з малим електроспоживанням.

Комбінована електроенергетична система, що поєднує сонячні та гідроелектростанції, являє собою інноваційний підхід до децентралізованого енергозабезпечення. Така архітектура дозволяє нівелювати основні недоліки монотехнологічних рішень, створюючи синергетичний ефект взаємодоповнення різних відновлюваних джерел енергії.

Гідроелектростанція виступає стабілізуючим компонентом, що забезпечує неперервність електрогенерації в періоди зниженої сонячної активності. Сезонна динаміка виробництва електроенергії враховується через раціональне перемикавання пріоритетності джерел: максимальне використання сонячних панелей у літній період та активізація гідрогенерації в зимовий час.

Така багатокомпонентна стратегія суттєво підвищує енергетичну незалежність локальних систем, мінімізує ризики дефіциту електроживлення та створює передумови для формування більш стійких і адаптивних локальних енергетичних утворень. На рис. 2.8 приведено структурну схему комбінованої електроенергетичної системи, що включає сонячну та гідроелектростанції.

Сонячні фотоелектричні панелі забезпечують можливість накопичення та акумуляції генерованої електроенергії засобами спеціалізованих систем енергозберігання. Така технологія дозволяє раціонально використовувати надлишкову електричну потужність, створюючи резервні енергетичні запаси для періодів зниженої сонячної активності.

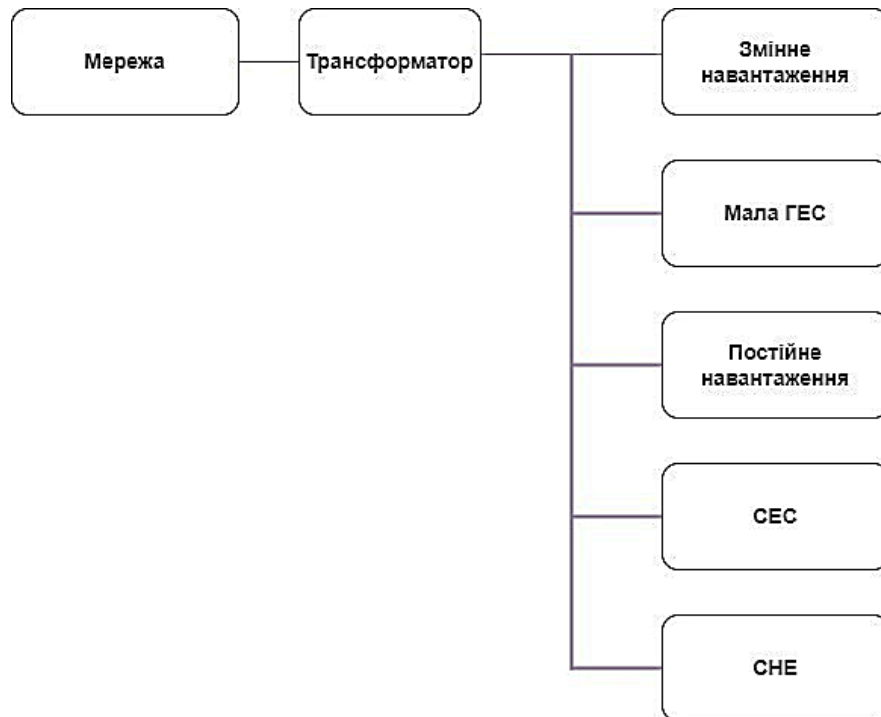


Рисунок 2.8 – Структура комбінованої електроенергетичної системи з сонячною, гідроелектростанцією та централізованою мережею

Гідроелектростанція виступає додатковим стабілізуючим компонентом у гібридній системі, що використовує кінетичну енергію водних потоків для обертання гідрогенераторних установок. Її основна перевага полягає у здатності забезпечувати стабільне електропостачання та компенсувати флуктуації сонячної генерації. Інтеграція різнотипних відновлюваних джерел енергії створює унікальну синергетичну модель електрогенерації, яка демонструє високий рівень адаптивності та ефективності в умовах мінливого природного середовища.

Розглянемо детальніше інструменти для моделювання роботи окремих елементів комбінованої електроенергетичної системи з керованими елементами.

Блок моделювання централізованої електричної мережі. Блок електричної мережі являє собою складну електротехнічну конструкцію, що моделює трифазне джерело напруги з послідовно включеною резистивно-

індуктивними вітками. Архітектура такої системи передбачає наявність трьох незалежних фаз, кожна з яких містить послідовно з'єднані електричні компоненти – резистор та котушку індуктивності. Такий принцип побудови дозволяє здійснювати детальне моделювання електродинамічних процесів у трифазних електричних системах. Трифазна структура забезпечує більш ефективний та збалансований розподіл електричного навантаження порівняно з однофазними системами. Кожна фаза має ідентичні електричні характеристики, адже представляє симетричне трифазне джерело живлення. Така конфігурація є типовою для багатьох промислових та енергетичних застосувань, де слід забезпечити стабільне та рівномірне електропостачання з мінімізацією втрат електричної потужності. Блок задачі параметрів приведений на рис. 2.9, а.

Блок моделювання роботи трансформатора зв'язку. Блок трансформатора репрезентує складну електротехнічну конструкцію, що базується на використанні трьох однофазних трансформаторних модулів для створення інтегрованої трифазної системи перетворення електричної потужності. Трифазні трансформатори виступають ключовим елементом електроенергетичних систем, демонструючи унікальні характеристики електродинамічної взаємодії. Принципова особливість такої архітектури полягає в забезпеченні високого рівня симетричності електричних параметрів у трьох фазах. Взаємна збалансованість величин напруги та струму дозволяє досягти принципово нової якості електропередачі: суттєво зменшити встановлену потужність, знизити масогабаритні показники та підвищити загальну ефективність перетворення електричної енергії порівняно з однофазними трансформаторами.

Коефіцієнт корисної дії трифазних трансформаторів демонструє надзвичайно високу ефективність та мінімальні показники енергетичних втрат при перетворенні електричної потужності між різними рівнями напруги. Блок задачі параметрів приведений на рис. 2.9, б. Технічні переваги такої конструкції дозволяють здійснювати максимально ефективну передачу

електроенергії з мінімальними витратами на інфраструктурні рішення. Багатофункціональність та висока адаптивність трансформаторних систем роблять їх фундаментальним елементом сучасної електроенергетичної інфраструктури, демонструючи тенденції до постійного технологічного вдосконалення.

Блоки моделювання постійного та змінного навантаження. У контексті комбінованої електроенергетичної системи, що включає до свого складу сонячні та гідроелектростанції, блоки змінного та постійного навантаження демонструють ідентичні параметри порівняно із комбінованою електроенергетичною системою з однією лише сонячною установкою, які були розглянуті в попередньому розділі. Це забезпечує уніфіковану архітектуру моделі комбінованої електроенергетичної системи.

Блок моделювання гідроелектростанції. Блок малої гідроелектростанції репрезентує інноваційний підхід до локальної відновлюваної електрогенерації, що використовує гідродинамічний потенціал природних водотоків для перетворення кінетичної енергії на електричну.

Технічні характеристики малих гідроелектростанцій передбачають генерацію електроенергії в діапазоні від кількох десятків кіловат до декількох сотень мегават. Унікальність таких станцій полягає в їхній здатності забезпечувати автономне електропостачання віддалених сільських територій та важкодоступних населених пунктів.

Екологічна перевага малих гідроелектростанцій визначається мінімальним антропогенним впливом на природні екосистеми порівняно з традиційними великими гідроелектростанціями. Такі станції демонструють високий рівень стійкості та адаптивності в умовах різноманітних ландшафтних та кліматичних середовищ. Локальні гідроелектростанції становлять перспективний напрямок децентралізованої «зеленої» енергетики, що створює передумови для формування більш автономних та ефективних електроенергетичних систем.

Малі гідроелектростанції репрезентують комплексне технічне рішення для локальної електрогенерації, що передбачає використання інноваційних конструктивних підходів. Технологічний арсенал малих гідроелектростанцій включає підводні турбінні генератори, протипаводкові споруди та спеціалізовані гідротехнічні елементи, призначені для ефективного перетворення кінетичної енергії водних потоків на електричну потужність.

Істотною перевагою малих гідроелектростанцій є їхня здатність забезпечувати енергетичну автономію для важкодоступних та віддалених територій, де традиційні джерела електропостачання є економічно неефективними або технічно складними для впровадження. Такі станції створюють принципово нові можливості для електрифікації сільських районів та периферійних населених пунктів. Відповідний блок задачі параметрів приведений на рис. 2.9, в.

Локальні гідроелектростанції демонструють високий потенціал для вирішення проблем енергетичної незалежності шляхом використання місцевих водних ресурсів. Їхня архітектура дозволяє генерувати електроенергію з мінімальними екологічними ризиками та високою ефективністю перетворення гідравлічної потужності.

Блок моделювання сонячної електростанції. Параметри блоку для моделювання роботи сонячної електростанції в складі комбінованої електроенергетичної системи з малою гідроелектростанцією повністю ідентичні попередній схемі. Блок задачі параметрів уже був приведений раніше на рис. 2.7

Блок моделювання системи накопичення енергії. Блок системи накопичення електроенергії репрезентує складну електротехнічну конструкцію, призначену для акумуляції та ефективного перерозподілу електричної потужності в межах локальної енергетичної системи.

Система енергонакопичення (Energy Storage System) виступає ключовим елементом сучасних інтелектуальних електромереж, здатним забезпечувати буферизацію електричної потужності для подальшого використання. Основна

функціональність такої системи полягає в оптимізації режимів електроспоживання шляхом акумуляції надлишкової електроенергії та її дозованої видачі в моменти підвищеного навантаження.

Визначальною характеристикою акумуляторної системи є її ємність, що вимірюється у ватт-годинах. Цей параметр відображає здатність системи накопичувати та віддавати електричну потужність протягом певного часового проміжку.

Впровадження локальних систем накопичення електроенергії створює передумови для формування більш гнучких, адаптивних та ефективних електроенергетичних інфраструктур. Електричні характеристики системи накопичення енергії визначаються сукупністю параметрів напруги та струму, які демонструють варіативність залежно від специфіки конкретних акумуляторних технологій. Відповідний блок задачі параметрів приведений на рис. 2.9, г. Ефективність функціонування електроакумуючої системи характеризується коефіцієнтом корисної дії, що відображає рівень енергетичних втрат під час процесів накопичення та генерації електричної потужності. Цей показник безпосередньо впливає на загальну результативність використання системи накопичення електроенергії.

Визначальними факторами при моделюванні систем енергонакопичення виступають: тривалість автономного електропостачання, алгоритми оптимального керування зарядними та розрядними процесами, врахування специфічних характеристик різних типів акумуляторних комірок.

Багатокомпонентний підхід до моделювання систем накопичення електроенергії дозволяє розробникам створювати максимально адаптивні та ефективні рішення для локальних електроенергетичних інфраструктур.

Комбінована електроенергетична система, що інтегрує сонячну електростанцію та малу гідравлічну електричну станцію, репрезентує інноваційний підхід до формування стійких та ефективних локальних енергетичних комплексів. Синергетичний ефект поєднання геліо- та гідроенергетичних джерел забезпечує:

- диверсифікацію відновлюваних джерел електрогенерації;
- зниження залежності від традиційних викопних енергоносіїв;
- підвищення загальної стабільності електропостачання.

Унікальність такої архітектури полягає в здатності генерувати електричну потужність незалежно: сонячні панелі акумулюють енергію сонячного випромінювання в денний час, а мала гідроелектростанція забезпечує стабільну генерацію протягом року. Подібний підхід демонструє високий потенціал для створення більш адаптивних, екологічно чистих та технологічно досконалих локальних електроенергетичних систем.

Інтеграція різноманітних відновлюваних джерел електроенергії становить ключову стратегію забезпечення стабільності та незалежності енергетичних систем. Поєднання сонячних та гідроелектростанцій дозволяє нівелювати ризики, пов'язані з коливаннями енергетичних факторів природних умов та сезонними особливостями генерації струму.

Синергія двох альтернативних технологій створює унікальну модель енергетичної інфраструктури, яка характеризується високою адаптивністю та резистентністю до зовнішніх викликів. Завдяки взаємодоповненню геліоенергетики та мікрогідроенергетики можливо досягти оптимального балансу потужностей, мінімізуючи технологічні та економічні втрати.

Такий підхід не лише забезпечує енергетичну автономію та надійність постачання електроенергії, але й суттєво зменшує негативний антропогенний вплив на навколишнє природне середовище. Комбіновані електроенергетичні системи демонструють потужний потенціал у контексті глобальної трансформації енергетичного сектору, просуваючи концепцію сталого розвитку та декарбонізації.

Принципова перевага запропонованої моделі полягає в її здатності створити диверсифіковане, екологічно чисте та економічно рентабельне джерело електричної енергії, яке зменшує залежність від традиційних викопних носіїв та підвищує стійкість локальних енергетичних мереж.

а) трифазне джерело напруги мережі

б) трифазний трансформатор

в) мала гідроелектростанція

г) система акумулювання

д) динамічне навантаження

Рисунок 2.9 – Параметри блоків моделювання керованих елементів комбінованої електроенергетичної системи

Висновки до другого розділу

1. Комплексні електроенергетичні системи є інноваційним напрямком трансформації сучасного енергетичного сектору. Такі інтегровані системи передбачають мультиджерельне вирорблення електричної потужності, орієнтоване на досягнення максимальної надійності та ефективності енергозабезпечення. Архітектура подібних рішень дозволяє поєднувати потенціал альтернативних відновлюваних генераторів, що створює передумови для диверсифікації та підвищення стабільності енергетичних процесів в різноманітних експлуатаційних середовищах.

2. Геліоенергетика постає визначальним компонентом комбінованих електроенергетичних комплексів, де фотоелектричні модулі трансформують сонячну радіацію в електричну потужність. Застосування геліотехнологій сприяє суттєвому зниженню техногенного навантаження та мінімізації залежності від традиційних викопних джерел, формуючи екологічно безпечний та поновлюваний механізм електрозабезпечення.

3. Поєднання геліоелектричних установок з мікрогідроелектростанціями розширює можливості відновлюваної енергетики. Мікрогідроелектростанції, що використовують кінетичну енергію водних потоків, забезпечують стабільне генерування електроенергії впродовж різних сезонних періодів. Взаємодоповнення геліо- та гідроджерел базується на раціональному використанні природно-кліматичних умов та технічного інструментарію.

4. Таким чином комбіновані електроенергетичні рішення, що інтегрують геліоелектричні та гідроелектричні потужності, формують принципово новий парадигмальний підхід до генерування електроенергії. Такі системи забезпечують підвищення надійності та результативності енергетичних процесів, слугуючи дієвим інструментом розбудови еколого-орієнтованої, збалансованої, ресурсоефективної енергетичної інфраструктури.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

3.1 Моделювання комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з некерованими установками

Розглянемо представлену на рис. 3.1 архітектуру комбінованої електроенергетичної системи, яка розкриває інноваційний підхід інтеграції відновлюваної сонячної електростанції з традиційною електричною мережею. Графічна модель, створена у відповідності із рис. 2.6 другого розділу цієї роботи за допомогою інструментарію MATLAB, наочно демонструє механізми взаємодії альтернативного джерела генерації електроенергії з централізованою інфраструктурою.

Принципова особливість запропонованої схеми полягає в забезпеченні двостороннього енергообміну. Трансформаторний вузол дозволяє не лише передавати надлишкову електроенергію в загальну мережу, але й компенсувати дефіцит потужності за рахунок централізованого постачання.

Розрахункова модель передбачає живлення локальної інфраструктури з базовим навантаженням 500 кВт та житловим комплексом, що складається з восьми котеджів. Кожен котедж має максимальну розрахункову потужність споживання 25 кВт, сумарне навантаження житлової зони становить 200 кВт.

Такий підхід демонструє ефективність та гнучкість комбінованих електроенергетичних систем, де сонячна генерація виступає важливим доповненням до традиційних мереж електропостачання.

У розробленій схемі приведеній на рис. 3.1 представлено складну інтегровану систему, яка демонструє інноваційний підхід до використання сонячної енергетики. Попередню характеристику блоків та параметрів детально розглянуто в попередньому (другому) розділі цього дослідження, де

особливу увагу приділено моделюванню споживачів котеджного містечка через блок варіативного навантаження.

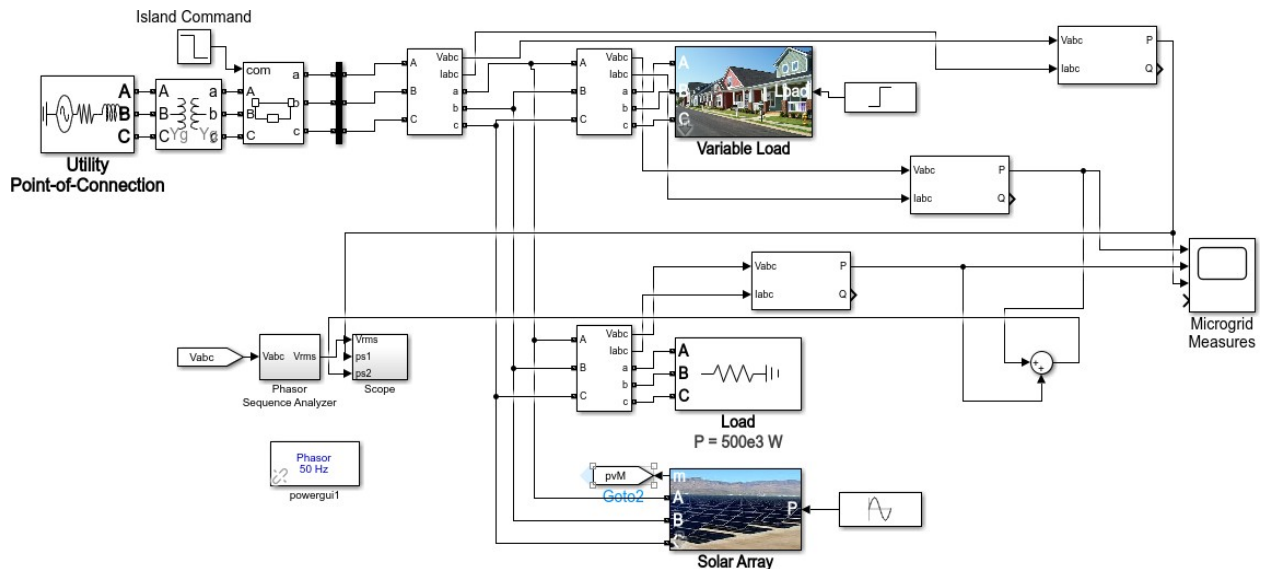


Рисунок 3.1 – Комп’ютерна модель схеми комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з некерованими установками

Блок сонячної електростанції являє собою складну інтегровану технологічну платформу, що поєднує передові геліоенергетичні рішення з інтелектуальними системами трифазного перетворення електроенергії. Архітектура блоку передбачає комплексне перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію з подальшою синхронізацією та інтеграцією в мережу змінного струму.

Принципова особливість запропонованої конструкції полягає в максимальній оптимізації процесів генерації, трансформації та розподілення електроенергії. Використання сучасних напівпровідникових технологій та інтелектуальних алгоритмів керування дозволяє суттєво підвищити ефективність перетворення сонячної радіації та забезпечити стабільність роботи всієї енергетичної системи.

Комплексне імітаційне моделювання розробленої електроенергетичної системи, виконане в професійному середовищі MATLAB, надає вичерпну інформацію для всебічного аналізу її функціональних характеристик. Графічна презентація результатів на рис. 3.2 розкриває детальну картину процесів генерації, трансформації та розподілення електроенергії.

Методологія дослідження передбачає багатофакторну оцінку ключових параметрів геліоенергетичної установки, зокрема: коефіцієнту корисної дії фотоелектричних перетворювачів; динаміку зміни потужності залежно від зовнішніх умов; ефективність інтеграції сонячної станції в мережу; адаптивність системи до варіативних навантажень.

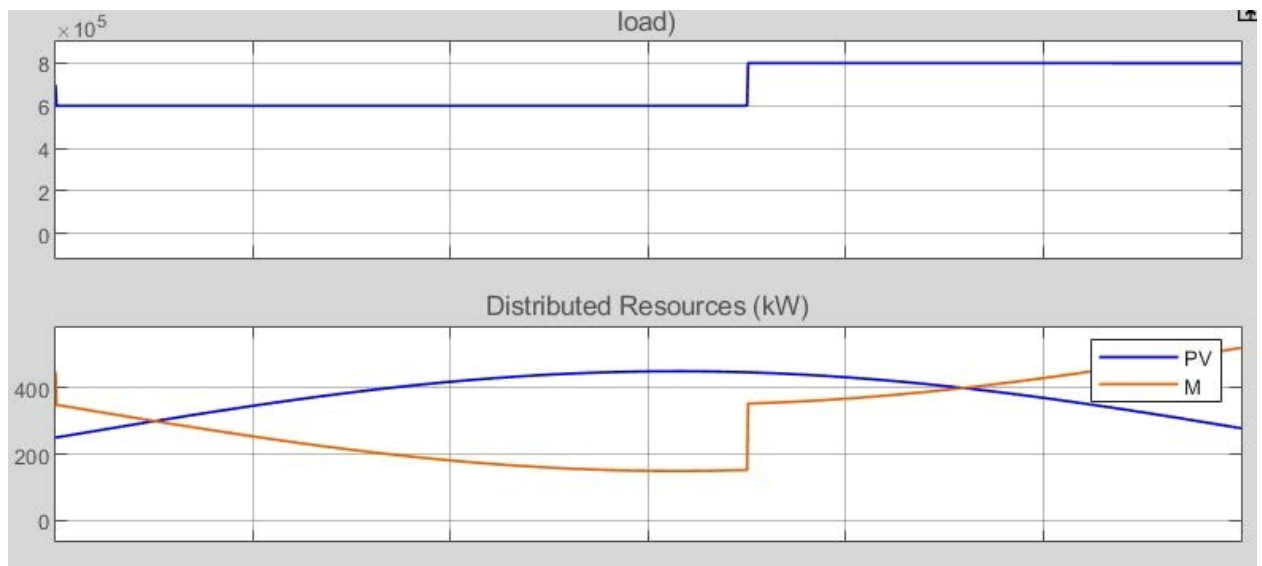


Рисунок 3.2 – Результати комп’ютерного моделювання схеми комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з некерованими установками

Аналіз приведених на рис. 3.2 результатів моделювання розкриває особливості функціонування інтегрованої комбінованої електроенергетичної системи з використанням сонячної електростанції. Верхній графік відображає

динаміку електричного навантаження котеджного містечка, демонструючи характерні коливання споживання протягом досліджуваного періоду.

Нижній графік наочно ілюструє механізм покриття електропотреб через два основні джерела: пряму генерацію сонячної електростанції (позначену жовтим кольором) та підтримку з електричної мережі (позначену синім кольором). Жовтий сегмент графіка показує потенціал сонячної генерації в забезпеченні локального енергоспоживання, а синій – компенсаційні можливості централізованої мережі в періоди малої сонячної активності.

Представлена візуалізація демонструє гнучкість комбінованої електроенергетичної системи, здатної динамічно балансувати між відновлюваним джерелом та традиційною мережею. Такий підхід забезпечує стабільне електропостачання котеджного містечка з максимальним використанням сонячної генерації. Також графічне представлення результатів моделювання на рис. 3.2 підтверджує ефективність запропонованого технічного рішення та перспективність інтеграції сонячних електростанцій у локальні енергетичні системи.

3.2 Моделювання комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з керованими установками

Представлена на рис. 3.3 комбінована електроенергетична система змодельована в середовищі MATLAB з використанням попередніх напрацювань, демонструє інтегрований підхід до комбінування сонячної електростанції та гідроелектростанції. За основу для побудови такої схеми було обрано розглянуту раніше структуру, яка зображена на рис. 2.8.

Система охоплює два основні споживацькі контури: базове навантаження потужністю 500 кВт та містечко котеджного типу на вісім котеджів. Кожен котедж має максимальне споживання 25 кВт, формуючи сукупне навантаження 200 кВт.

компоненти: загальну шину, електричну мережу, трансформатор, змінне навантаження (котеджне містечко), малу гідроелектростанцію, сонячну електростанцію та систему акумуляування енергії.

Детальні параметри всіх блоків схеми розглянуті в другому розділі дослідження. Моделювання виконано в середовищі MATLAB-Simulink, що надає потужний інструментарій для імітації складних енергетичних систем.

Принциповою особливістю запропонованої архітектури є можливість динамічної взаємодії різнотипних генеруючих потужностей через уніфіковану шину, що забезпечує гнучкість та стабільність енергопостачання.

Вимірювальна схема для контролю режимних параметрів роботи комбінованої електроенергетичної системи була змодельована засобами MATLAB та приведена на рис. 3.4. Вона дозволяє здійснити комплексний аналіз енергетичних потоків, оцінити ефективність інтеграції відновлюваних джерел та продемонструвати перспективність комбінованих енергетичних рішень.

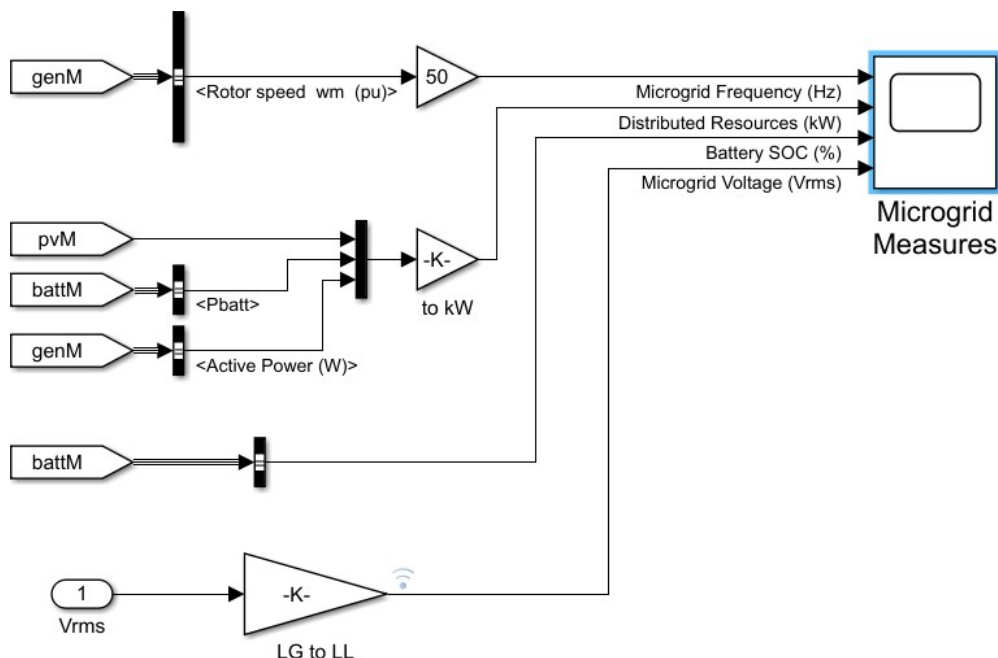


Рисунок 3.4 – Змодельована за допомогою засобів MATLAB
вимірювальна схема

У представленій схемі ключову роль відіграє мультиметр, який в середовищі MATLAB Simulink реалізується через спеціалізовані вимірювальні блоки для аналізу параметрів електричних сигналів. Блок Scope (осцилограф) є класичним інструментом для візуалізації динаміки сигналів у часовому вимірі. Однак для забезпечення високої точності вимірювань використовуються спеціалізовані блоки, що розширюють функціональність традиційного мультиметра.

На рис. 3.5 представлено результати моделювання роботи комбінованої електроенергетичної системи електрозабезпечення, що інтегрує сонячну електростанцію та міні гідроелектростанцію. Графічне представлення дозволяє детально проаналізувати особливості взаємодії різних генеруючих джерел. Використання професійного інструментарію MATLAB Simulink надає унікальну можливість комплексного дослідження складних енергетичних систем, демонструючи потенціал гібридних технологій у забезпеченні стабільного електропостачання.

Графік на рис. 3.5 демонструє комплексну динаміку роботи комбінованої електроенергетичної системи.

Верхній графік відображає коливання частоти електричної мережі, які виникають внаслідок змін навантаження та генерації. Ці флуктуації є важливим індикатором стабільності роботи енергосистеми.

Нижній графік ілюструє роботу різних генеруючих джерел: синій колір представляє сонячну електростанцію, блакитний – малу гідроелектростанцію, а помаранчевий – систему накопичення енергії. Колірна диференціація дозволяє наочно оцінити внесок кожного джерела в загальне електрозабезпечення.

Третій графік висвітлює навантаження котеджного містечка, демонструючи динаміку електроспоживання досліджуваного періоду.

Представлена візуалізація підтверджує ефективність комбінованого підходу в забезпеченні стабільного та диверсифікованого електропостачання.

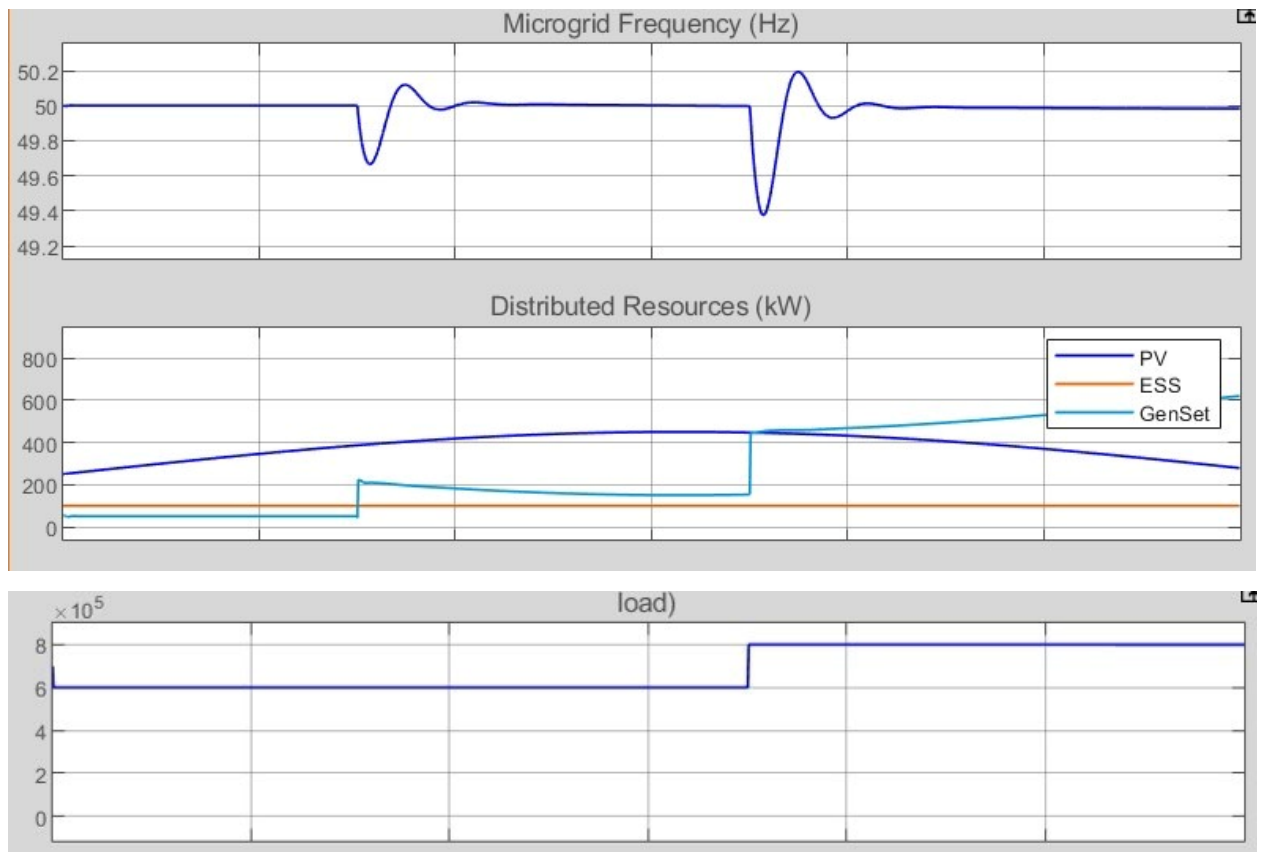


Рисунок 3.5 – Результати комп’ютерного моделювання схеми комбінованої електроенергетичної системи електропостачання з керованими установками

3.3 Порівняльний аналіз результатів моделювання роботи комбінованих електроенергетичних систем

Порівняльний аналіз роботи двох комбінованих електроенергетичних систем виявив суттєві відмінності в їхній ефективності.

Перша схема (рис. 3.1), що поєднує сонячну електростанцію та електричну мережу, демонструє часткову спроможність забезпечення електроенергією кожного містечка. Виявлено, що потужності сонячної електростанції недостатньо для повного покриття навантаження, внаслідок чого відбувається компенсація з боку централізованої мережі.

Друга схема (рис. 3.3) включає додатковий елемент – малу гідроелектростанцію та систему накопичення енергії, що розширює

можливості комбінованої електроенергетичної системи. Введення додаткового відновлюваного джерела та системи акумуляторного накопичення підвищує стабільність та автономність енергозабезпечення.

Порівняльний аналіз показує, що друга комбінована система є більш ефективною для електропостачання котеджного містечка через: диверсифікацію джерел генерації, наявність системи накопичення енергії, підвищену стійкість до коливань генерації та навантаження.

Саме тому можна наполегливо рекомендувати обрати другу схему як більш прогресивне технічне рішення.

Результати моделювання другої схеми приведені на рис. 3.6 та переконливо демонструють ефективність комбінованої електроенергетичної системи електрозабезпечення з поєднанням малої гідроелектростанції та сонячної електростанції.

Ключова перевага запропонованої архітектури полягає в синергії різних відновлюваних джерел: керованої гідрогенерації та некерованої сонячної генерації. Мала гідроелектростанція забезпечує стабільне та передбачуване виробництво електроенергії, а сонячна електростанція доповнює її в періоди максимальної сонячної активності.

Система накопичення електроенергії грає критичну роль у балансуванні потужностей, дозволяючи акумулювати надлишкову електроенергію та використовувати її в періоди зниження генерації або підвищення навантаження.

Графічне представлення на рис. 3.6 наочно підтверджує здатність комбінованої електроенергетичної системи виробити електроенергією для котеджного містечка в необхідному обсязі навіть при максимальному споживанні, що демонструє високу ефективність запропонованого рішення.

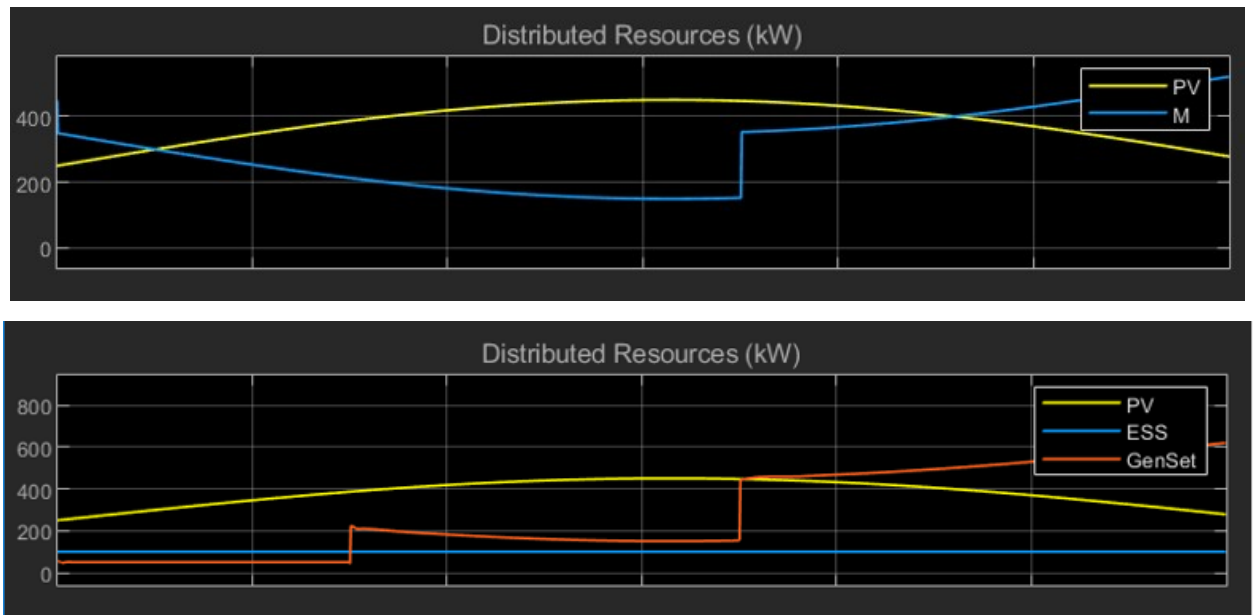


Рисунок 3.6 – Підсумки комп'ютерного моделювання схеми з керованими та некерованими установками

3.4 Порівняльний аналіз техніко-економічних показників комбінованих електроенергетичних систем обраних для моделювання

Економічний аналіз інтегрованої системи електропостачання з використанням альтернативних джерел генерації електроенергії передбачає комплексну багатофакторну оцінку фінансово-технологічних аспектів впровадження відновлюваних енергетичних технологій.

Методологія дослідження включає детальну калькуляцію наступних ключових параметрів:

- капітальні витрати на спорудження геліо- та гідроелектростанцій;
- прогнозовані операційні витрати протягом повного життєвого циклу;
- потенційний економічний ефект від заміщення традиційних джерел електроенергії;
- терміни окупності інвестованих коштів;
- рівень екологічної та економічної альтернативності проєкту.

Проведений аналіз має на меті не лише визначити економічну доцільність комбінованої електроенергетичної системи, але й оцінити її потенційну конкурентоспроможність на ринку альтернативної енергетики, враховуючи довгострокові тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії.

Економічний аналіз вартості сонячної електростанції вимагає комплексного підходу з урахуванням широкого спектру технічних та фінансових параметрів. Принципово важливо розуміти, що кожен проект геліоенергетичної системи має унікальні характеристики, залежить від специфічних локальних умов та інженерних завдань.

Орієнтуючись на параметри, представлені на рис. 2.9, проведемо попередню оцінку економічної ефективності проєкту. Важливо наголосити, що наведені розрахунки мають приблизний характер і потребують подальшої деталізації з урахуванням специфіки конкретного майданчика та технічного завдання. Додатковим фактором, що впливає на загальну вартість комбінованої електроенергетичної системи, є рівень локалізації обладнання, наявність державних програм підтримки альтернативної енергетики та потенціал подальшої модернізації системи.

Комплектація сонячної електростанції потужністю 500 кВт являє собою складну інженерну систему, що включає низку високотехнологічних компонентів для ефективної генерації та розподілу електроенергії.

Основні складові комплекту включають:

- інверторне обладнання: десять мережевих трифазних інверторів марки Solis-50K-5G-DC з системою моніторингу, пристрій для регуляції генерування Solis EPM-5G-Plus;

- геліоенергетичні модулі: тисячу сто шістдесят дві сонячні панелі моделі RSM156-6-430M із сукупною потужністю панелей 500 кВт;

- електроматеріали для виконання монтажу: спеціальний провід Solar для прокладки сонячних фотоелектричних систем загальною довжиною 5010 м, кабель ВВГнг довжиною 752 м для підключення інверторів по стороні змінного струму;

- системи захисту обладнання від нештатного режиму роботи: один комплект захисту по стороні постійного струму DC (запобіжники, обмежувачі перенапруги), один комплект захисту по стороні змінного струму AC (автоматичні вимикачі, пристрої захисного відключення);

- допоміжні складові елементи та витрати;
- металоконструкції та засоби і матеріали кріплення;
- проектно-монтажні роботи;
- транспортні витрати.

Економічний аналіз передбачає детальну оцінку вартості кожного компонента з урахуванням поточних ринкових цін, логістичних витрат та особливостей локальної інфраструктури.

Принципова перевага представленої комплектації полягає у використанні високоефективних технологічних рішень від провідних світових виробників, що гарантує надійність та стабільність роботи геліоелектростанції. За даними виробників та постачальників було складено орієнтовну калькуляцію витрат на встановлення сонячної електростанції номінальною потужністю 500 кВт, що приведена в табл. 3.1.

Для забезпечення високої точності техніко-економічного аналізу сонячної електростанції обрано професійне програмне забезпечення PVsyst – провідний інструментальний комплекс для моделювання проєктів з використанням геліоенергетичних установок. Програма PVsyst характеризується унікальними аналітичними можливостями: детальне імітаційне моделювання геліосистем; багатофакторний аналіз кліматичних параметрів; розрахунок очікуваної генерації електроенергії; прогнозування технічних та економічних показників; імітація впливу зовнішніх факторів на продуктивність.

Методологія дослідження передбачає комплексне використання інструментарію PVsyst для визначення оптимальної конфігурації геліоустановки, оцінки ефективності використаних технологічних рішень, прогнозування довгострокової економічної доцільності проєкту. Додатковою

перевагою обраного програмного забезпечення є можливість створення деталізованих звітів з графічною інтерпретацією результатів моделювання.

Таблиця 3.1 – Калькуляція по встановленню сонячної електростанції

Поз.	Найменування	Вартість, євро
1	Первинне дослідження реалізованості проектного завдання: - виїзд безпосередньо на місце розташування енергооб'єкта; - комплексна оцінка потенціалу та перспектив локації; - ретельне вивчення наявної документації; - формування попереднього комерційного пропозиційного плану на базі зібраних даних.	101
2	Підготовка та проектна стадії, супровід процедури отримання «зеленого» тарифу та необхідної документації: - деталізація та уточнення вхідної інформації; - розроблення технічної та кошторисної документації; - погодження та експертиза підготовленої проектної документації; - отримання офіційного дозволу на електрогенерацію (ліцензії); - активація механізму «зеленого» тарифоутворення; - комплексний правовий та документальний супровід інвестиційного проекту.	12501
3	Обладнання для сонячної електростанції відповідно до приведенного переліку	205001
4	Роботи по монтуванню, налагодженню, випробуванню та запуску в роботу обладнання	15001
Разом по проекту		232504

У рамках роботи були вказані налаштування програми з урахуванням прийнятих параметрів геліоустановки, зокрема кут нахилу сонячних панелей до горизонтальної площини у 30 градусів та азимутальне положення -15° , що відображено на рис. 3.7.

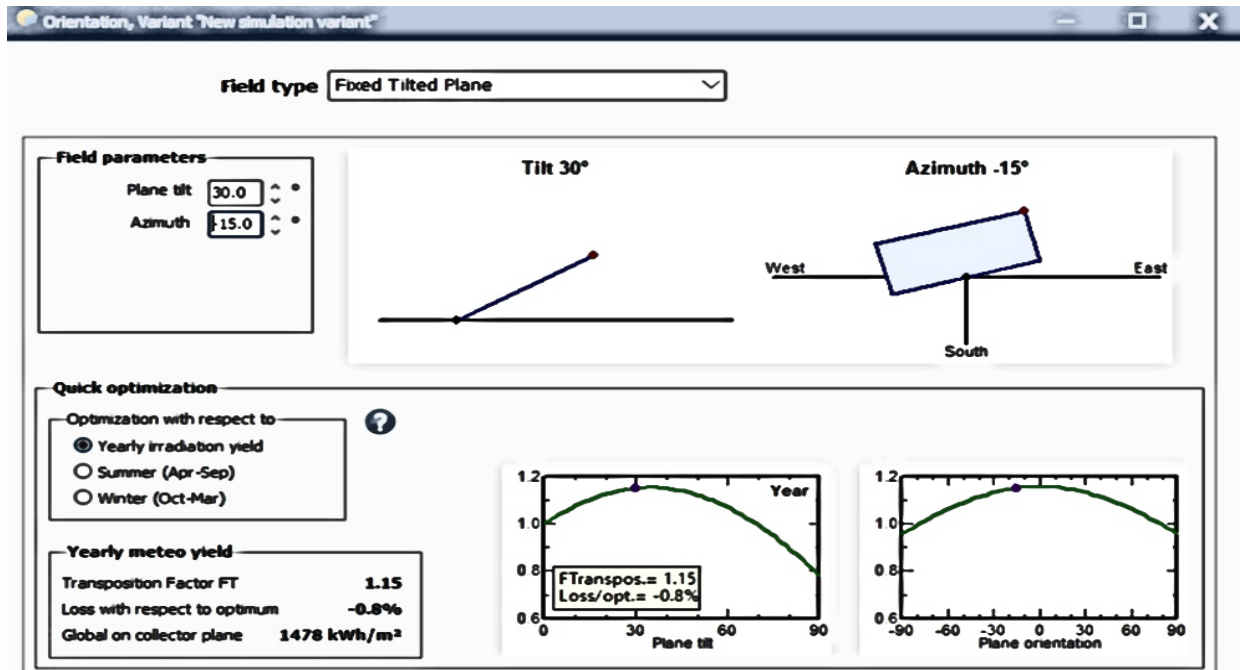


Рисунок 3.7 – Задання параметрів кутів нахилу панелей та азимута в PVsyst

Засобами програмного комплексу PVsyst було виконане дослідження об'єму виробленої електроенергії, враховуючи специфічні параметри геометричного розташування сонячних панелей. Зокрема, визначено потенціал генерації електричної енергії при встановленні панелей під описаними вище кутами. Відповідно на рис. 3.8 представлені результати.

На рис. 3.9 представлено вікно інтерфейсу програми PVsyst для задання ключових технічних параметрів фотоелектричних панелей та фотоелектричної системи в цілому, які необхідні для моделювання сумісної роботи з електричною централізованою мережею.

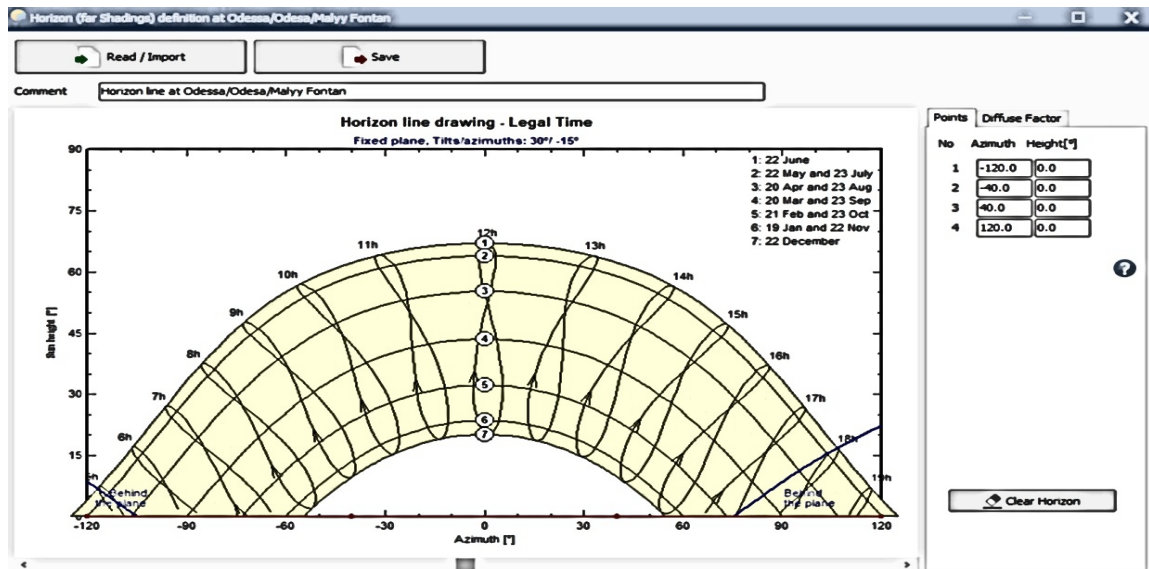


Рисунок 3.8 – Вибір лінії орієнтації горизонту

Name	#Mod #Inv.	#String #MPPT
AE Solar - AE 500MD-132BD	17	59
SMA - Sunny Tripower STP50-...	8	47

Global system summary	
Nb. of modules	1003
Module area	2380 m²
Nb. of inverters	7.8
Nominal PV Power	502 kWp
Maximum PV Power	474 kWDC
Nominal AC Power	392 kWAC
Prom ratio	1.280

Рисунок 3.9 – Вікно задання параметрів сонячної електростанції в PVsyst

Графічне представлення результатів моделювання в програмі PVsyst (рис. 3.10) відображає процес надходження та трансформації сонячної енергії

на електростанції. Щоденний вхід (Daily Input) характеризує обсяг сонячного випромінювання, отриманого геліоустановкою протягом світлового дня. Натомість щоденний вихід (Daily Output) репрезентує кінцевий результат перетворення сонячної радіації – обсяг електричної енергії, що генерується станцією та спрямовується або до електромережі, або на власне споживання.

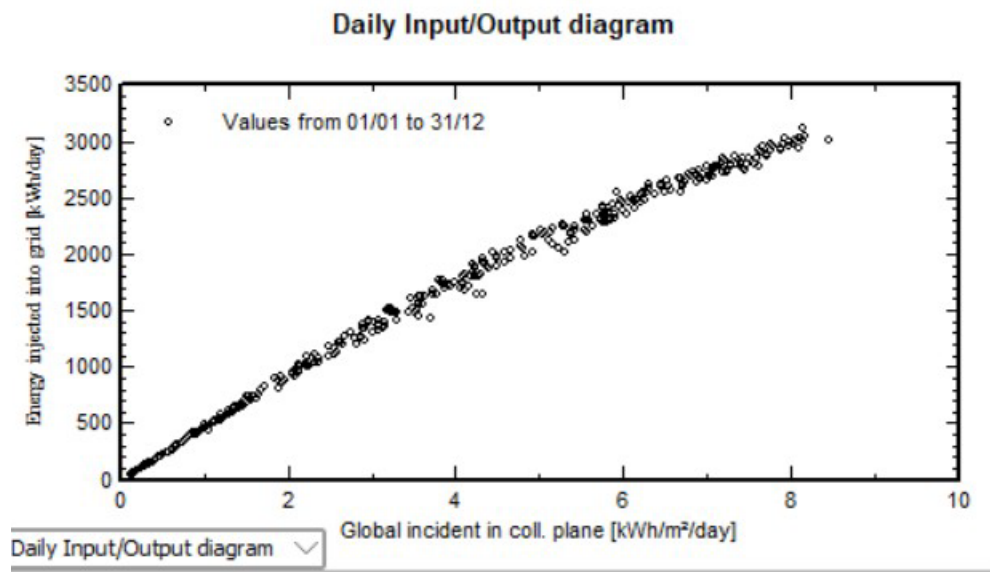


Рисунок 3.10 – Діаграма продуктивності фтоелектричних панелей

На рис. 3.11 представлено графік зміни значення середньомісячного коефіцієнта продуктивності геліоелектростанції.

Цей коефіцієнт відображає здатність геліоустановки перетворювати сонячну радіацію в електричну енергію з урахуванням сезонних варіацій та різноманітних зовнішніх чинників. Графічна інтерпретація дозволяє простежити місячні коливання продуктивності, що виникають через нерівномірність сонячного випромінювання, зміни кліматичних умов та інші параметри навколишнього середовища.

Детальний аналіз щомісячного коефіцієнта продуктивності надає фахівцям важливу інформацію про реальну ефективність роботи сонячної електростанції. Він демонструє, наскільки раціонально геліоустановка

використовує доступну сонячну енергію для генерації електроструму, що є критичним показником для оцінки економічної доцільності та технічної досконалості геліоенергетичного проекту.

Також на рис. 3.12 приведена зміна річного вироблення електричної енергії сонячної електростанції.

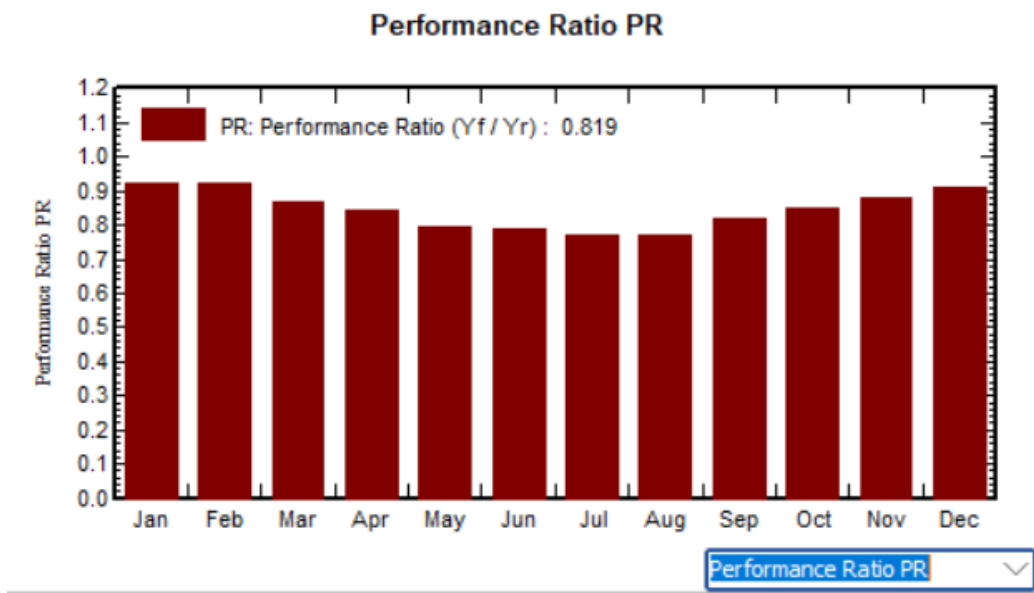


Рисунок 3.11 – Графік зміни значення коефіцієнта продуктивності СЕС

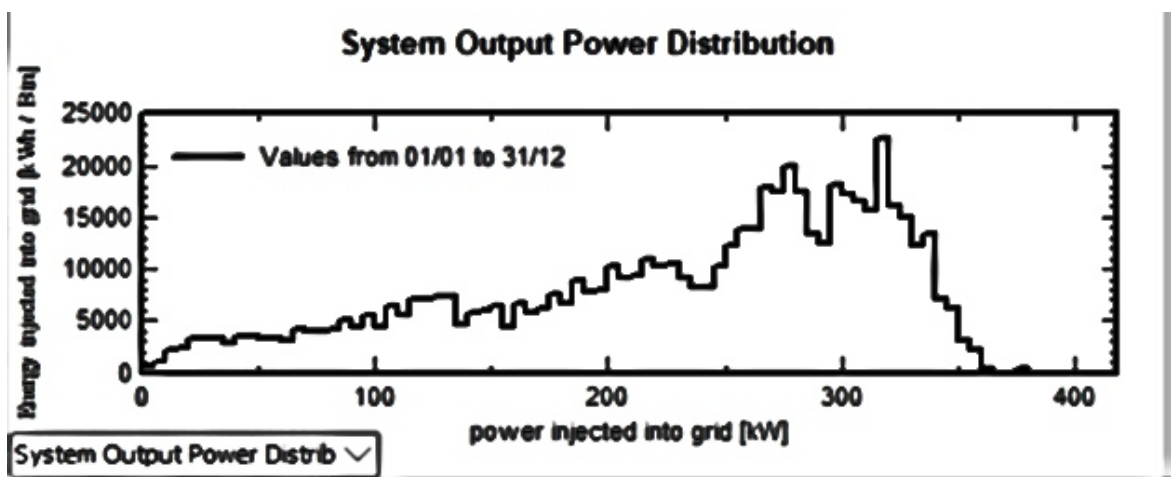


Рисунок 3.12 – Зміна генерації електричної енергії сонячною електростанцією протягом року.

Представлені графічні матеріали на рис. 3.13 надають комплексну характеристику впливу температурних режимів на продуктивність фотоелектричних модулів та особливості генерації електричної енергії. Рис. 3.13 демонструє залежність ефективності PV модулів від температури навколишнього середовища. Температурні коливання безпосередньо впливають на здатність сонячних панелей перетворювати сонячне випромінювання в електричну енергію, що визначає їхню загальну продуктивність.

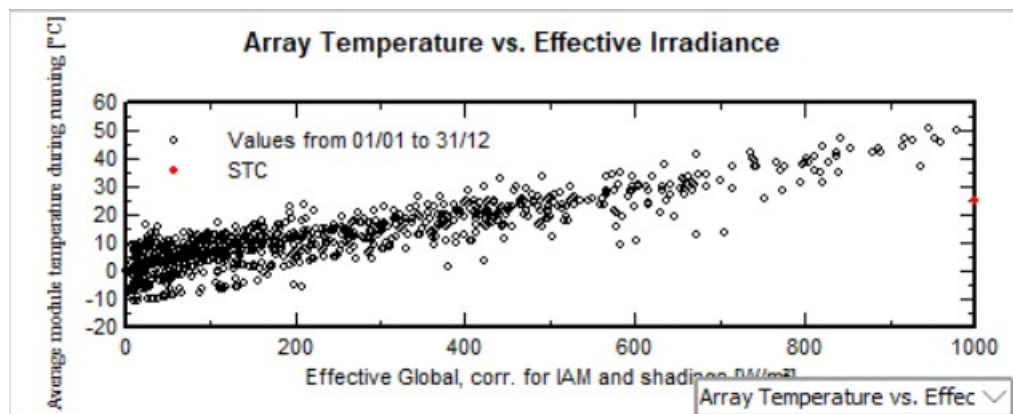


Рисунок 3.13 – Діаграма залежності температури середовища оточення на ефективність модулів фотоелектростанції

На рис. 3.14 та 3.15 представлено скріншоти-звіти за результатами роботи програми PVsyst, про щомісячну генерацію електроенергії, втрати в системі електрозабезпечення та безпосередньо в самих фотоелектричних модулях. Графічні матеріали дозволяють провести глибокий аналіз ефективності роботи геліоустановки, визначити потенційні резерви підвищення її продуктивності та оцінити технічні та економічні показники роботи.

Комплексне представлення даних про температурні режими, генерацію та втрати електроенергії надає вичерпну картину функціонування сонячної електростанції.

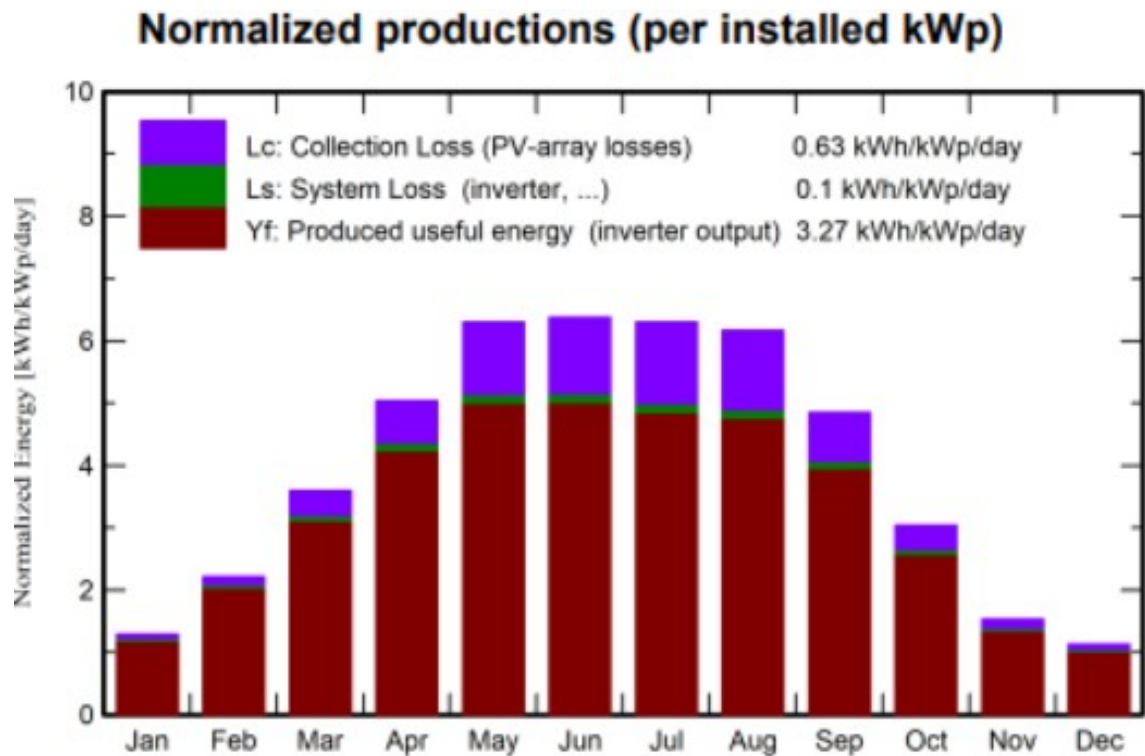


Рисунок 3.14 – Дані по щомісячній генерації та втратах електричної енергії у фотоелектричній станції

Balances and main results								
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	28.0	20.30	-0.70	40.0	39.1	19130	18511	0.922
February	45.4	29.40	0.10	61.8	60.4	29473	28642	0.923
March	90.9	49.90	4.60	111.3	108.9	49844	48463	0.868
April	134.6	69.80	10.30	151.0	147.6	65741	63936	0.844
May	187.1	73.20	16.90	195.2	190.7	80091	77841	0.795
June	192.5	78.30	21.10	191.1	186.3	77727	75508	0.788
July	193.3	80.10	24.00	195.5	190.7	77803	75567	0.771
August	173.3	69.60	23.80	191.1	186.9	76270	74080	0.773
September	116.5	49.50	17.00	145.5	142.4	61344	59629	0.817
October	69.7	36.30	11.00	94.2	92.1	41358	40168	0.851
November	31.7	20.20	6.70	45.9	44.7	20934	20257	0.880
December	22.9	15.70	1.50	34.8	34.0	16455	15877	0.909
Year	1285.9	592.30	11.42	1457.4	1423.7	616170	598478	0.819

Рисунок 3.15 – Помісячні числові дані по генерації та втратах в сонячній електростанції з програми PVsyst.

Представлені в табл. 3.2 і табл. 3.3 дані демонструють комплексний аналіз генерації та споживання електроенергії для сонячної електростанції та котеджного містечка.

Таблиця 3.2 відображає деталізовану інформацію про місячну генерацію електроенергії, отриману в результаті моделювання за допомогою програми PVsyst та розрахунок грошової вартості виробленої електроенергії. Це дозволяє оцінити сезонні коливання продуктивності геліоустановки.

У таблиці 3.3 наведено щомісячне споживання електричної енергії для одного котеджу, що слугує базою для подальших розрахунків споживання комплексу містечка враховуючи загальну кількість котеджів у 8 одиниць та сумарне річне споживання і базове навантаження для всього містечка.

Таблиця 3.4 містить результати розрахунку окупності сонячної електростанції, виконаного засобами Excel. Цей аналіз дозволяє оцінити економічну ефективність впровадженого геліоенергетичного проекту. Відзначимо що розрахунки проводилися при урахуванні курсу євро до національної валюти на рівні 43,70 грн/євро, вартості електроенергії виробленої фотоелектричними станціями 0,146 євро/кВт*год, відсотку відрахувань на ренновацію та експлуатацію на рівні 15%.

Графічне та числове представлення даних надає вичерпну інформацію про технічні та економічні аспекти функціонування сонячної електростанції в контексті енергозабезпечення котеджного містечка.

Таблиця 3.4 демонструє детальний розрахунок повернення капіталовкладень для сонячної електростанції протягом 25-річного періоду. Аналіз показує, що простий термін окупності лежить в межах 5 років, а з урахуванням зміни вартості грошових потоків на протязі років (дисконтування) складає близько 8 років.

Фінальна вартість реалізації проекту по закінченні експлуатації та без урахування ліквідаційної складової становить 6117 тис. грн.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання генерації електроенергії сонячною установкою та її вартості

Місячна генерація сонячною електростанцією, кВт/год.													
Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
	18511,0	28642,0	48463,0	63936,0	77841,0	75508,0	75567,0	74080,0	59629,0	40168,0	20257,0	15877,0	598478,0
Місячна вартість виробленої електроенергії, тис. грн													
Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
тис. грн.	118,100	182,736	309,194	407,912	496,626	481,741	482,117	472,630	380,433	256,272	129,240	101,295	3818,290

Таблиця 3.3 – Результати моделювання споживання електричної енергії котеджами і базовим навантаженням

Місячні та річне електроспоживання одного котеджу, кВт*год													
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	За рік
Один котедж	1538,0	1384,0	957,0	855,0	783,0	747,0	696,0	738,0	913,0	1089,0	1374,0	1543,0	12617,0
Вісім котеджів	12304,0	11072,0	7656,0	6840,0	6264,0	5976,0	5568,0	5904,0	7304,0	8712,0	10992,0	12344,0	100936,0
Базове навантаження	186000,0	174000,0	186000,0	180000,0	186000,0	180000,0	186000,0	186000,0	180000,0	186000,0	180000,0	186000,0	2196000,0
Сумарне навантаження	198304,0	185072,0	193656,0	186840,0	192264,0	185976,0	191568,0	191904,0	187304,0	194712,0	190992,0	198344,0	2296936,0

Таблиця 3.4 – Розрахунок окупності комбінованої електроенергетичної системи з сонячною електростанцією з урахуванням дисконтування

Номер року	Капітальні витрати, тис. грн.	Витрати обслуговування, тис. грн	Надходження коштів, тис. грн	Річний грошовий потік, тис. грн	Кумулятивне значення грошового потоку Кумм. CF, тис. грн	Фактор поточної вартості, в.о.	Чиста теперішня вартість грошового потоку, тис. грн	Кумулятивне значення чистої теперішньої вартості грошового потоку, тис. грн
0	10160,425			-10160,425	-10160,425	1,000	-10160,425	-10160,425
1		1524,064	3818,3	2294,236	-7866,189	0,881	2 021,354	-8 139,071
2		1524,064	3818,3	2294,236	-5571,952	0,776	1 780,928	-6 358,143
3		1524,064	3818,3	2294,236	-3277,716	0,684	1 569,100	-4 789,043
4		1524,064	3818,3	2294,236	-983,480	0,603	1 382,467	-3 406,576
5		1524,064	3818,3	2294,236	1310,757	0,531	1 218,032	-2 188,544
6		1524,064	3818,3	2294,236	3604,993	0,468	1 073,156	-1 115,388
7		1524,064	3818,3	2294,236	5899,229	0,412	945,512	-169,876
8		1524,064	3818,3	2294,236	8193,465	0,363	833,050	663,175
9		1524,064	3818,3	2294,236	10487,702	0,320	733,965	1397,140
10		1524,064	3818,3	2294,236	12781,938	0,282	646,665	2043,805
11		1524,064	3818,3	2294,236	15076,174	0,248	569,749	2613,554
12		1524,064	3818,3	2294,236	17370,411	0,219	501,982	3115,536
13		1524,064	3818,3	2294,236	19664,647	0,193	442,275	3557,810
14		1524,064	3818,3	2294,236	21958,883	0,170	389,669	3947,479
15		1524,064	3818,3	2294,236	24253,119	0,150	343,321	4290,800
16		1524,064	3818,3	2294,236	26547,356	0,132	302,485	4593,286
17		1524,064	3818,3	2294,236	28841,592	0,116	266,507	4859,793
18		1524,064	3818,3	2294,236	31135,828	0,102	234,808	5094,601
19		1524,064	3818,3	2294,236	33430,065	0,090	206,879	5301,480
20		1524,064	3818,3	2294,236	35724,301	0,079	182,272	5483,752
21		1524,064	3818,3	2294,236	38018,537	0,070	160,592	5644,345
22		1524,064	3818,3	2294,236	40312,773	0,062	141,491	5785,836
23		1524,064	3818,3	2294,236	42607,010	0,054	124,662	5910,497
24		1524,064	3818,3	2294,236	44901,246	0,048	109,834	6020,332
25		1524,064	3818,3	2294,236	47195,482	0,042	96,770	6117,102

Для подальшої оптимізації енергетичної системи розглядається варіант створення комбінованої електростанції, що включає сонячну електростанцію, систему накопичення та мікро-гідроелектростанцію МГЕС. Графічний матеріал на рис. 3.16 відображає капітальні витрати на обладнання.

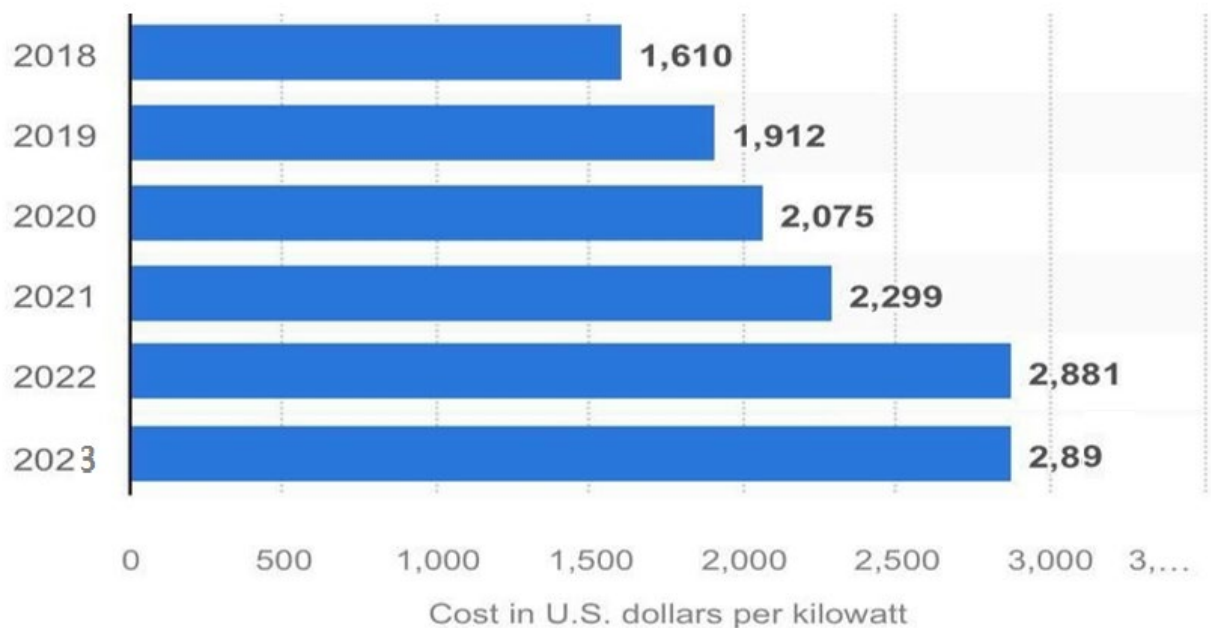


Рисунок 3.16 – Ілюстрація динаміки зміни вартості одиниці встановленої потужності для малих гідроелектричних станцій тис. дол. США

Відповідно до даних Міненергетики США 1 кВт ціна встановленої потужності малої гідроелектростанції у 2023 році становила 2,89 тис. дол. США. Для МГЕС потужністю 150 кВт загальна вартість обладнання складе орієнтовно 18943,8 тис. гривень. Такий підхід дозволить створити комплексну та диверсифіковану систему генерації електроенергії з використанням альтернативних джерел.

У таблиці 3.5 представлено детальні параметри системи накопичення електроенергії СНЕ виробництва BYD B-Box.

Це літій-залізо-фосфатна (LiFePO_4) акумуляторна батарея, обладнана системою керування, призначена для роботи з додатковим інвертором.

Вартість однієї такої системи накопичення становить 1738 тис. гривень. Для повноцінного моделювання та забезпечення необхідної потужності використовувалося 5 таких акумуляторних систем.

Таблиця 3.5 – Характеристики системи накопичення енергії BYD B-Box 10.0

Виробник	BYD (China)
Тип акумуляторного блоку	LiFePO4
Ємність акумулятора	200 А·год
Напруга	51,18 В
Число циклів заряд-розряд	6 тис.
Термін дії гарантії	10 років
Струм заряджання (максимальний)	35 А
Температура експлуатації мінімальна/максимальна	-10° / 50°

Технологія LiFePO4 забезпечує високу надійність, безпеку та тривалий термін служби акумуляторної батареї, що робить її оптимальним рішенням для систем накопичення електроенергії в геліоенергетичних проектах.

Згідно прийнятих даних у вигляді табл. 3.6 проведено деталізовані розрахунки економічної ефективності комбінованої електроенергетичної системи протягом 25-річного періоду експлуатації. Аналіз показує, що простий термін окупності лежить в межах 6 років, а з урахуванням зміни вартості грошових потоків на протязі років (дисконтування) складає близько 11 років. Фінальна вартість реалізації проекту по закінченні експлуатації та без урахування ліквідаційної складової становить 11 382,80 тис. грн.

Така відносно тривала окупність компенсується значними перевагами впровадження сучасних технологій мікро-гідроелектростанції МГЕС. Зниження собівартості обладнання та підвищення його технічних характеристик дозволяє створювати більш ефективні та економічно привабливі енергетичні комплекси з використанням відновлюваних джерел енергії.

Таблиця 3.6 – Розрахунок окупності комбінованої електроенергетичної системи з сонячною електростанцією та мікрогідроелектростанцією з урахуванням дисконтування

Номер року	Капітальні витрати, тис. грн.	Витрати обслуговування, тис. грн	Надходження коштів, тис. грн	Річний грошовий потік, тис. грн	Кумулятивне значення грошового потоку Кумм. CF, тис. грн	Фактор поточної вартості, в.о.	Чиста теперішня вартість грошового потоку, тис. грн	Кумулятивне значення чистої теперішньої вартості грошового потоку, тис. грн
0	37794,23			-37794,23	-37794,23	1,000	-37794,23	-37794,23
1		5669,13	12600,39	6931,26	-30862,97	0,881	6106,83	-31687,39
2		5669,13	12600,39	6931,26	-23931,71	0,776	5380,47	-26306,92
3		5669,13	12600,39	6931,26	-17000,46	0,684	4740,50	-21566,42
4		5669,13	12600,39	6931,26	-10069,20	0,603	4176,65	-17389,77
5		5669,13	12600,39	6931,26	-3137,95	0,531	3679,87	-13709,89
6		5669,13	12600,39	6931,26	3793,31	0,468	3242,18	-10467,72
7		5669,13	12600,39	6931,26	10724,57	0,412	2856,54	-7611,17
8		5669,13	12600,39	6931,26	17655,82	0,363	2516,78	-5094,39
9		5669,13	12600,39	6931,26	24587,08	0,320	2217,43	-2876,97
10		5669,13	12600,39	6931,26	31518,34	0,282	1953,68	-923,29
11		5669,13	12600,39	6931,26	38449,59	0,248	1721,30	798,02
12		5669,13	12600,39	6931,26	45380,85	0,219	1516,57	2314,58
13		5669,13	12600,39	6931,26	52312,10	0,193	1336,18	3650,76
14		5669,13	12600,39	6931,26	59243,36	0,170	1177,25	4828,02
15		5669,13	12600,39	6931,26	66174,62	0,150	1037,23	5865,25
16		5669,13	12600,39	6931,26	73105,87	0,132	913,86	6779,10
17		5669,13	12600,39	6931,26	80037,13	0,116	805,16	7584,26
18		5669,13	12600,39	6931,26	86968,38	0,102	709,39	8293,65
19		5669,13	12600,39	6931,26	93899,64	0,090	625,02	8918,67
20		5669,13	12600,39	6931,26	100830,90	0,079	550,67	9469,34
21		5669,13	12600,39	6931,26	107762,15	0,070	485,18	9954,52
22		5669,13	12600,39	6931,26	114693,41	0,062	427,47	10381,99
23		5669,13	12600,39	6931,26	121624,67	0,054	376,62	10758,61
24		5669,13	12600,39	6931,26	128555,92	0,048	331,83	11090,44
25		5669,13	12600,39	6931,26	135487,18	0,042	292,36	11382,80

Висновки до третього розділу

У межах проведеного дослідження було виконано моделювання роботи комбінованих електроенергетичних систем з використанням відновлюваних джерел енергії за допомогою програмного середовища MATLAB.

Результати виконаного моделювання комбінованої електроенергетичної системи згідно першої схеми, що складається з сонячної електростанції та підключення до загальної електромережі, виявили певні особливості, а саме потужність сонячної електростанції, навіть за умови її подвійної встановленої потужності, є недостатньою для повного забезпечення електроенергією всього котеджного містечка. Водночас підключення до централізованої електромережі дозволяє компенсувати дефіцит електроенергії, створюючи збалансовану систему живлення. Економічний аналіз показав, що термін окупності комбінованої системи становить близько 8 років, що є прийнятним для подібних інфраструктурних проектів у сфері альтернативної енергетики.

У ході другого етапу моделювання гібридної системи електропостачання, що включає малу гідроелектростанцію МГЕС, сонячну електростанцію СЕС та систему накопичення, отримано інші результати. Змодельована конфігурація продемонструвала здатність повністю забезпечити електроенергією електроспоживачів котеджного містечка, включаючи режими максимального споживання. Ключова перевага такої схеми полягає у використанні накопичувачів, що дозволяють акумулювати надлишкову електроенергію та використовувати її в періоди зниженої генерації. Економічний аналіз показав, що система окупиться за 11 років, генеруючи дохід інвесторам на рівні 11382,8 тис. грн. Досягнення такої ефективності стало можливим завдяки суттєвому зниженню собівартості сучасних технологій мікро-гідроелектростанцій.

Порівняння першої та другої схем комбінованих електроенергетичних систем виявило принципові відмінності в їхній ефективності. На відміну від першої схеми з некерованим джерелом розподіленої генерації, друга схема з

декількома керованими джерелами розподіленої генерації демонструє значно вищу гнучкість та ефективність. Особливо це проявляється при забезпеченні базового навантаження та електропостачанні котеджного містечка. Комбінована електроенергетична система, що об'єднує сонячну електростанцію разом з гідроелектростанцією в одній системі, виявилася оптимальним рішенням для виробництва електроенергії. Такий підхід забезпечує надійне енергопостачання в умовах змінних кліматичних умов та різноманітних енергетичних потреб, демонструючи перевагу комплексного використання відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організація безпечної експлуатації та обслуговування електричного обладнання малих гідроелектростанцій

Забезпечення безпечної експлуатації електричного обладнання малих гідроелектростанцій (МГЕС) є складним і багатогранним процесом, що вимагає комплексного підходу та неухильного дотримання чинних нормативних вимог. Фундаментальною основою такої діяльності слугують «Правила улаштування електроустановок» (ПУЕ) та «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (ПБЕЕ), які регламентують усі аспекти роботи електроенергетичних об'єктів.

Особливої уваги потребує кадровий склад, задіяний в експлуатації МГЕС. Персонал повинен мати не лише глибокі теоретичні знання, але й практичні навички роботи з електрообладнанням. Кожен співробітник проходить ретельний відбір, що включає професійну атестацію, медичний огляд та перевірку психофізіологічної придатності до роботи в умовах підвищеної електронебезпеки. Системи підготовки кадрів передбачають не лише первинне навчання, але й постійне підвищення кваліфікації, щорічні інструктажі та позапланові навчання у разі впровадження нового обладнання чи зміни технологічних процесів.

Технічне обслуговування електрообладнання МГЕС являє собою складну, багаторівневу систему превентивних та профілактичних заходів. Основним принципом такого обслуговування є випередження можливих несправностей шляхом регулярних діагностичних процедур. Фахівці здійснюють комплексний моніторинг стану всіх систем, включаючи детальний огляд ізоляційних конструкцій, електричних з'єднань, механізмів захисту та контрольно-вимірювальних приладів.

Електробезпека на МГЕС забезпечується системою взаємопов'язаних технічних та організаційних рішень. Важливе місце посідають інженерні методи захисту: заземлення, занулення, встановлення діелектричних бар'єрів, використання спеціальних матеріалів з високими ізоляційними властивостями. Не менш значущими є організаційні заходи: розробка детальних інструкцій, створення безпечних алгоритмів роботи, впровадження суворої дисципліни та контролю.

Специфіка гідроелектростанцій накладає додаткові вимоги до експлуатаційних процесів. Постійний моніторинг гідравлічних параметрів, стану гідротехнічних споруд, врахування сезонної динаміки водності та пов'язаних із цим навантажень на обладнання потребує високої кваліфікації та уваги персоналу. Особливо критичними є періоди весняного водопілля та осінніх дощів, коли навантаження на гідроенергетичні системи максимальні.

Протиаварійний захист є невід'ємною складовою безпечної експлуатації МГЕС. Сучасні системи передбачають багаторівневий захист з використанням автоматизованих комплексів моніторингу та миттєвого реагування. Впроваджуються інтелектуальні системи, здатні не лише фіксувати позштовхові ситуації, але й прогнозувати потенційні ризики на основі аналізу поточних параметрів обладнання.

Документальне супроводження експлуатаційних процесів набуває статусу окремого важливого напрямку роботи. Кожен технологічний крок, кожна зміна параметрів обладнання фіксуються в уніфікованих журналах, створюючи повну картину життєвого циклу технічних систем МГЕС. Такий підхід дозволяє накопичувати статистику, аналізувати тенденції та приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації та розвитку електроенергетичної інфраструктури.

Експлуатація електричного обладнання малих гідроелектростанцій - це складний, багатогранний процес, який вимагає комплексного підходу, постійного навчання, технологічної пильності та глибокого розуміння як технічних, так і людських чинників безпеки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений в роботі науковий аналіз виявив принципову значимість та доцільність удосконалення комплексних енергетичних комплексів з диверсифікованими джерелами живлення. Дослідження приділило особливу увагу інтегрованим рішенням, що поєднують потенціал сонячної генерації та потужності малих гідроелектричних установок.

У межах дослідження різноманітних енергетичних технологій встановлено, що синергія фотоелектричних та гідроенергетичних установок спроможна суттєво оптимізувати надійність електричного живлення та загальну продуктивність системи. Нестабільність генерації електроенергії сонячними панелями успішно нівелюється більш прогнозованим та стабільним виробництвом потужності малими гідроелектростанціями, що забезпечує формування більш збалансованого та ефективного енергетичного комплексу.

Поглиблений аналіз змодельованих інтегрованих енергетичних комплексів, де в якості другого базового елементу виступає мініатюрна гідроелектрична станція, надав можливість ідентифікувати найбільш раціональні налаштування подібних систем задля досягнення максимальної ефективності та стійкості функціонування.

Резюмуючи проведені дослідження, отримані результати переконливо демонструють потенціал впровадження інтегрованих енергетичних комплексів, що об'єднують сонячну генерацію та потужності малих гідроелектричних станцій для забезпечення надійного й стабільного електропостачання. Особливої актуальності такий підхід набуває в контексті значних коливань електровиробництва фотоелектричними установками. Наукова робота робить суттєвий внесок у сферу відновлюваної енергетики, окреслюючи оптимальні стратегічні рішення для формування збалансованих та стійких енергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IRENA (2024), Renewable Energy Etatistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Режим доступу: <https://www.ilo.org/publications/renewable-energy-and-jobs-annual-review-2024>
2. Сонячна енергетика в Україні. Режим доступу: <https://avenston.com/articles/solar/>
3. Badwawi R.A., Mallick T.K. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. Smart Science. 2015. V 3. P. 127–138.
4. Кузнєцов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. Відновлювана енергетика. Київ, 2018. № 2. С. 5–16.
5. Okinda V.O., Odero N.A. A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. Issue 11. P. 153–163.
6. Кузнєцов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Задачі оптимізації комбінованих енергосистем за економічними критеріями. Відновлювана енергетика. Київ, 2019. № 4. С. 6–14.
7. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ: Вікторія, 2012. 60 с.
8. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами): навч.-метод. посіб. Харків, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2003. 52с.
9. Kyari I.B., Muhammad J.Y.. Hybrid renewable energy systems for electrification: A Review. Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2019. 8(2). P. 32–39.
10. Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M.A., M.El-Rifaie A. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage. Energies. 2019. V. 12.

11. Sawle Y.; Gupta S.C.; Bohre A.K. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. V. 81. P. 2217-2235.
12. Bocklisch T. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia.* 2015. V. 73. P. 103-111.
13. Кузнєцов М.П., Мельник О.А., Смертюк В.М. Вплив параметрів системи акумуляування електроенергії на балансування комбінованої енергосистеми. *Відновлювана енергетика.* Київ, 2021. № 1. С. 6-17.
14. Кузнєцов М.П., Мельник О.А., Смертюк В.М. Моделювання процесу акумуляування електроенергії в комбінованій енергосистемі. *Відновлювана енергетика.* Київ, 2020. № 4. С. 22-30.
15. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія. / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик. Вінниця: ВНТУ, 2014. 204 с.
16. Інтернет магазин «СонцеДІМ. Центр відновлюваної енергетики». Технічний паспорт інвертора Solis-50K-5G-DC. Режим доступу: <https://soncedim.com.ua/uploads/Datasheet-Solis-50K.pdf>
17. Інтернет магазин компанії «Аванте». Технічний паспорт батареї сонячної RISEN RSM156-6-430M/9BB. Режим доступу: <https://avante.com.ua/>
18. О. Галінський та ін. ДБН А.3.2-2-2009 ССБП. «Охорона праці і промислова безпека в будівництві. Основні положення», Київ, Україна, 2012.
19. Солдатенко В.П. Автоматичне керування генерацією активної потужності відновлюваних джерел енергії в комбінованій електроенергетичній системі: дис. канд.техн. наук: 05.13.07 – Кропивницький, 2019. – 185 с.
20. Лекарь, М. С. Вибір оптимального місця приєднання сонячної електростанції до розподільної електричної мережі : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / наук. кер. В. П. Солдатенко ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 100 с.