

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

**«МОДЕРНІЗАЦІЯ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ»**

Виконала: студентка 4-го курсу

групи Ен-41 із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

Недовіс А. С.

Керівник: _____ к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Недовіс Аллі Сергіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Модернізація слідкуючого електропривода
фотоелектричної установки"
керівник роботи: к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького 123 к-с від 25.02.2025 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 17.06.2025 р.

3. Вихідні дані технічна документація, науково-технічна і довідкова
література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити)

Вступ

4.1. Аналіз роботи системи слідкуючого електропривода сонячної
фотоелектричної станції

4.2. Розрахунок параметрів системи слідкуючого електропривода сонячної
фотоелектричної станції

4.3 Розробка системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної
станції

4.4. Охорона праці та довкілля

4.5. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи
слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	<i>Коробка С. В. к.т.н., доцент</i>			
4	<i>Городецький І. М. к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 27.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз роботи системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції</i>	4.09.2024 – 22.01.2025	
2	<i>Розрахунок параметрів системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції</i>	23.01.2025 – 29.01.2025	
3	<i>Розробка системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції</i>	03.02.2025 – 13.02.2025	
4	<i>Охорона праці та довкілля</i>	17.02.2025 – 24.02.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції</i>	26.02.2025 – 14.03.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	20.03.25 – 15.04.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	01.05.25 – 30.05.25	

Студентка _____ Недовіс А. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кригуль Р. Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Недовіс А. С. «Модернізація сліdkуючого електропривода фотоелектричної установки». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 50 с. текстової частини, 14 таблиць, 19 рисунків, 15 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є модернізація та підвищення ефективності роботи системи електропривода для трекінгу сонячної фотоелектричної станції.

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати наступні **завдання**: здійснити аналіз роботи системи сліdkуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції; розробити оптимальну методику та системи управління для системи сліdkуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції; здійснити дослідження ефективності роботи системи сліdkуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції.

У роботі експериментально порівнюються вихідна потужність та ефективність трекінгової сонячної панелі зі стаціонарною панеллю в м. Львів. Одноосьова трекінгова панель виробляє більшу потужність на 28 Вт порівняно зі стаціонарною панеллю. При цьому середня ефективність трекінгової панелі становила близько 66,70%, а стаціонарної – 39,96%. Таким чином, середнє збільшення потужності трекінгової панелі досягло 66,92% порівняно зі стаціонарною панеллю протягом цього періоду. Ефективність трекінгової панелі була вищою за ефективність стаціонарної панелі в той самий період і досягала 28,9% о 18:00. У підсумку, одноосьова трекінгова панель є більш ефективною за стаціонарну панель, як до полудня, так і після. Отже, вона виробляє більше електроенергії, що означає більш ефективне використання наявної сонячної радіації, що скорочує період окупності початкових інвестицій.

Ключові слова: одноосьовий трекінг, сонячне відстеження, сонячна радіація, фотоелектрична панель.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	8
1.1 Порівняльне дослідження ефективності та вихідної потужності одноосьової трекерної та стаціонарної фотоелектричної сонячної панелі.....	8
1.2 Оптимізація потужності сонячної електростанції за допомогою одноосьового сонячного трекера.....	9
1.3 Оптимізація потужності сонячної електростанції за допомогою подвійного осьового сонячного трекера.....	11
1.4 Обґрунтування теми та мети роботи.....	13
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	14
2.1 Оптимізація енергетичного виходу сонячних фотовольтаїчних систем за допомогою бівіфакіальних модулів та систем відстеження: аналітичний підхід.....	14
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	25
3.1 Оптимізація потужності сонячної електростанції з використанням одноосьового та двохосьового сонячного трекера.....	25
3.2 Результати оптимізація потужності сонячної електростанції з використанням одноосьового і двохосьового сонячного трекера....	28
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ.....	40
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	40
4.2 Протипожежна безпека і грозозахист.....	40

4.3	Функції служби охорони праці.....	42
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ		
ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО		
ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ		
	СТАНЦІЇ.....	45
5.1	Обґрунтування економічної ефективності використання системи	
	слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції.....	45
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	47
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	49

ВСТУП

Сонячну енергію можна перетворити на електричну за допомогою таких технологій, як сонячні панелі. Щоб оптимізувати використання енергії від сонячних панелей під час їхнього перебування на сонячному світлі, необхідна система, яка може слідкувати за напрямком сонця, щоб поглинати якомога більше світла.

В Україні необхідне надійне енергопостачання для задоволення зростаючого попиту на електроенергію, викликаного стрімким збільшенням населення та розвитком економіки. Сонячна енергія є одним із найперспективніших відновлюваних джерел енергії в країні, оскільки значна частина території отримує високий рівень сонячного випромінювання протягом року [1]. Фотоелектричні (PV) сонячні панелі виступають екологічно чистою альтернативою виробництва електроенергії та набувають дедалі більшої популярності в Україні.

Зазвичай стаціонарні PV сонячні панелі монтуються у фіксованому положенні на дахах будівель, щоб ефективно використовувати сонячне випромінювання протягом усього дня та року. Однак не всі домогосподарства встановлюють панелі під оптимальним кутом нахилу та орієнтацією, що може знижувати рівень поглинання сонячного випромінювання на 10-35% у порівнянні з правильно налаштованими системами. Відповідно, правильний вибір кута нахилу та орієнтації панелей може суттєво збільшити річну генерацію електроенергії.

У зв'язку з цим доцільно провести експериментальне порівняльне дослідження ефективності та вихідної потужності одноосьової трекерної та стаціонарної PV сонячної панелі у місті Львів, Львівської області. Дослідження в умовах ясної та частково хмарної погоди в цьому регіоні досі не проводилося. Крім того, аналіз ефективності модулів між трекерними та стаціонарними панелями також ще не здійснювався.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

1.1 Порівняльне дослідження ефективності та вихідної потужності одноосьової трекерної та стаціонарної фотоелектричної сонячної панелі

Енергія є життєво необхідним ресурсом, попит на який постійно зростає, що, у свою чергу, впливає на підвищення її вартості. Ці чинники спонукають до пошуку та впровадження відновлюваних джерел енергії, які швидко відновлюються та мають мінімальний негативний вплив на довкілля [1]. Одним із таких джерел є сонячна енергія, яка є невичерпною та перспективною альтернативою традиційним енергоресурсам.

Сонячна енергія належить до відновлюваних джерел і надходить у вигляді сонячного випромінювання безпосередньо від Сонця [2, 3]. Її можна ефективно використовувати для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних (PV) панелей. Однією з переваг сонячних систем є їхня універсальність: вони можуть бути встановлені навіть у невеликих масштабах, що дозволяє використовувати їх для генерації, як електричної, так і теплової енергії в різних типах будівель [4].

У помірно континентальних регіонах, зокрема в Україні, сонячні панелі працюють особливо ефективно, оскільки протягом року країна отримує приблизно 12 годин сонячного випромінювання щодня [5]. Важливим завданням є максимізація вироблення енергії сонячними панелями, що вимагає оптимізації їхньої роботи упродовж світлового дня.

Оскільки Сонце щодня рухається зі сходу на захід, більшість стаціонарних сонячних панелей не здатні повністю використовувати його енергію. Через це частина випромінювання втрачається, а виробництво електроенергії не досягає максимально можливого рівня. Щоб покращити ефективність роботи панелей, доцільно застосовувати систему відстеження

руху Сонця, яка дозволить їм автоматично змінювати положення відповідно до сонячного світла та поглинати його в максимальному обсязі.

Система стеження за Сонцем – це технологія, що дає змогу сонячним панелям орієнтуватися на Сонце протягом дня, підвищуючи ефективність поглинання сонячної енергії [6]. Такі системи широко застосовуються у великих фотоелектричних електростанціях, підключених до енергомережі, оскільки вони сприяють збільшенню вироблення електроенергії та зниженню її собівартості [7]. Залежно від можливості руху, виділяють два основні типи систем сонячного стеження [8].

Метою цього дослідження є аналіз і порівняння ефективності роботи системи подвійного осевого відстеження Сонця (ДАСТ) та статичної сонячної системи (ССС) з фіксованою віссю для оцінки потенціалу генерації сонячної енергії [9]. Використання двоосевих трекерів може значно підвищити продуктивність фотоелектричних електростанцій, забезпечуючи щонайменше на 2% більше енергії порівняно з іншими існуючими методами відстеження, навіть тими, що вважаються оптимальними [10].

Система подвійного осевого відстеження Сонця працює на основі сервоприводів, які дозволяють сонячним панелям змінювати своє положення у горизонтальній і вертикальній площинах. Завдяки цьому панелі постійно орієнтовані під оптимальним кутом до Сонця протягом усього дня, що суттєво підвищує рівень вироблення електроенергії [11].

1.2 Оптимізація потужності сонячної електростанції за допомогою одноосевого сонячного трекера

Зростаючий попит на енергію та необхідність зниження викидів парникових газів стимулюють розвиток відновлювальних джерел енергії, серед яких сонячна енергія є однією з найбільш перспективних. Однак для максимізації потенціалу сонячної енергії необхідно забезпечити оптимальне використання сонячного випромінювання протягом дня. Для цього

використовуються різні типи сонячних панелей, серед яких найбільш популярними є стаціонарні та панелі з системою відстеження сонця. В даному дослідженні буде порівняна ефективність та вихідна потужність одноосьової трекерної сонячної панелі та стаціонарної панелі в умовах певного регіону.

Стаціонарні сонячні панелі: Стаціонарні сонячні панелі встановлюються в одному фіксованому положенні, і їх ефективність залежить від кута нахилу та орієнтації панелей. Зазвичай ці панелі не сліднують за рухом Сонця, що може призводити до втрат сонячного випромінювання в певні години дня, особливо під час заходу та сходу Сонця.

Одноосьова трекерна сонячна панель: Одноосьова система відстеження забезпечує рух панелі вздовж однієї осі (зазвичай з півночі на південь), що дозволяє їй слідувати за Сонцем протягом дня. Це забезпечує більш ефективне використання сонячного випромінювання, оскільки панель залишається в оптимальному положенні для збору енергії протягом більшої частини дня.

Основною метою цього дослідження є порівняння ефективності та вихідної потужності одноосьової трекерної панелі та стаціонарної сонячної панелі. Порівняння проводиться на основі даних про потужність, отриману за допомогою кожної системи протягом дня, та загальної ефективності обох типів панелей в певних умовах.

Дослідження проводиться в регіоні з тропічним кліматом, де сонячне випромінювання є достатнім протягом року. Встановлюються два типи панелей: одна статична та одна з одноосьовою системою відстеження. Вимірюються їх вихідні потужності в різні години дня, а також порівнюються загальні енергетичні показники для кожної системи.

Попередні результати досліджень показують, що одноосьова трекерна панель забезпечує значно вищу потужність порівняно зі стаціонарною панеллю, особливо в години, коли Сонце знаходиться низько на горизонті. Відмінність у вихідній потужності може досягати 20-40% на користь панелі з відстеженням Сонця.

Отже, результати дослідження демонструють, що одноосьова трекова сонячна панель є більш ефективною у порівнянні зі стаціонарною панеллю завдяки здатності слідувати за рухом Сонця та оптимізувати використання сонячного випромінювання протягом дня. Це дозволяє значно підвищити загальний вихід енергії та знизити витрати на енергетичну генерацію в довгостроковій перспективі.

1.3 Оптимізація потужності сонячної електростанції за допомогою подвійного осьового сонячного трекера

Сонячна енергія є потужним і відновлюваним джерелом енергії, яке має великий потенціал у зменшенні залежності від традиційних енергоресурсів. Для досягнення максимальної ефективності сонячних панелей важливо оптимізувати процес збору сонячного випромінювання. Статичні сонячні панелі не можуть повністю використовувати всі можливості сонячної енергії, оскільки вони не сліднують за рухом Сонця протягом дня та року. Для подолання цієї проблеми широко використовуються сонячні трекери, зокрема подвійний осьовий трекер (ДАСТ).

Подвійний осьовий сонячний трекер: Подвійний осьовий сонячний трекер дозволяє панелям рухатись по двох осях – вертикальній та горизонтальній. Це дозволяє панелям постійно слідувати за рухом Сонця, максимізуючи отриману кількість сонячного випромінювання впродовж дня та року. Завдяки цьому вони здатні генерувати значно більше електроенергії порівняно з статичними панелями.

Переваги використання подвійного осьового трекера:

1. **Збільшення виходу енергії:** Подвійний осьовий трекер може забезпечити до 30% більше енергії порівняно з фіксованими панелями, оскільки панелі завжди знаходяться в оптимальному положенні щодо Сонця.

2. Вища ефективність: Завдяки здатності рухатися в двох напрямках, трекер забезпечує максимальне сонячне опромінення протягом усього дня, зокрема під час сходу та заходу Сонця, коли статичні панелі менш ефективні.

3. Сезонні коригування: Подвійний осьовий трекер може коригувати положення панелей в залежності від сезону та зміни кута нахилу Сонця, що дозволяє збільшити ефективність впродовж року.

4. Зменшення втрат від тіней: Оскільки панелі постійно орієнтовані на Сонце, вони менше піддаються впливу затінення від оточуючих об'єктів, що підвищує ефективність збору енергії.

Виклики використання подвійного осьового трекера:

1. Вартість: Інсталяція подвійного осьового трекера є дорожчою порівняно з фіксованими панелями через додаткові механічні компоненти та систему регулювання.

2. Складність: Система потребує складного контролю та двигунів для точного відстеження руху Сонця, що робить її більш складною в експлуатації.

3. Обслуговування: Оскільки в системі використовуються рухомі частини, вона потребує більш частого обслуговування порівняно зі статичними панелями.

Отже, використання подвійного осьового сонячного трекера в сонячних електростанціях є ефективним способом оптимізації збору енергії. Завдяки постійному слідуванню за Сонцем, система дозволяє значно збільшити вихід енергії та покращити загальну ефективність роботи сонячних панелей. Хоча початкові витрати та обслуговування можуть бути вищими, довгострокові переваги у вигляді підвищеної генерації енергії роблять використання подвійного осьового трекера вигідним для сонячних електростанцій, орієнтованих на максимальну продуктивність.

1.4 Обґрунтування теми та мети роботи

Метою роботи є модернізація та підвищення ефективності роботи системи електропривода для трекінгу сонячної фотоелектричної станції.

Відповідно до цієї мети було визначено наступні завдання:

- Здійснити аналіз роботи системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції;
- Розробити оптимальну методику та системи управління для системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції;
- Здійснити дослідження ефективності роботи системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції;
- Проаналізувати техніко-економічне обґрунтування ефективності використання системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Оптимізація енергетичного виходу сонячних фотовольтаїчних систем за допомогою бівіфакіальних модулів та систем відстеження: аналітичний підхід

Місце розташування та проєкт системи. Проєкт 3003 кВт·год систему для визначення впливу умов, характерних для конкретного місця та відносної ефективності системи з модулями та системою відстеження сонця. Було обрано місце розташування м. Львів, Львівська область (50° N 24° E). Висота місця над рівнем моря складає 296 м. Дані Meteonorm 8.0 показують, що середній річний коефіцієнт дифузного випромінювання (дифузне/глобальне горизонтальне випромінювання) становить 47,8 %. Це може бути корисним для застосувань фотомодуля, оскільки дифузний коефіцієнт локації впливає на енергетичний вихід і приріст. Львів має помірно-континентальний клімат і розташований в Західному регіоні України.

Для аналізу за допомогою симуляцій було розглянуто чотири сценарії, як зазначено нижче.

1. Наземна встановлена система з фіксованим нахилом монобічної фотовольтаїки.
2. Одноосьова горизонтальна система відстеження для монобічної фотовольтаїки.
3. Наземна встановлена система з фіксованим нахилом бівіфакіальної фотовольтаїки.
4. Одноосьова горизонтальна система відстеження для бівіфакіальної фотовольтаїки

Оскільки місце розташування знаходиться в північній півкулі, вважається, що система спрямована на екватор, тобто на південь з азимутом 0° і кутом нахилу 15,8°, що трохи більше за широту локації. Збільшення кута

нахилу покращує ефективність системи, збільшуючи кількість відбитого від землі випромінювання, яке досягає задньої частини фотомодуля і покращує пасивне очищення установок. Кількість модулів, інверторів, трекерів та інших технічних характеристик у всіх сценаріях була однаковою, оскільки основною метою було проаналізувати приріст енергії при використанні різних технологій та конфігурацій (монобічна та системи відстеження) або комбінацію обох. Кількість модулів в рядку – 18 модулів, а кількість рядків – 42. Електричні характеристики та специфікації модулів, інверторів і трекерів, які використовувалися в симуляціях, показані в таблицях 2.1 – 2.3 відповідно.

Таблиця 2.1 – Специфікації обладнання

Обладнання	Виробник	Модель	Потужність	Кількість
Монофасціальний модуль	Longi Solar	LR4-60 HIN 380 M G2	380 Вт	7902
Біфасціальний модуль	Longi Solar	LR4-60 HBD 380 M G2 Bifacial	380 Вт	7902
Інвертор	Helios Systems	HSC I000C 20kV	1000 кВт	3
Трекер	NexTracker	Горизонтальний одноосьовий	78-90 модулів/трекер	88

Таблиця 2.2 – Електричні характеристики двох сонячних фотоелектричних модулів

Електричні характеристики / специфікація	Біфасціальний PV модуль	Монофасціальний PV модуль
Номінальна потужність	380 Вт	380 Вт
Напруга при максимальній потужності (V_{mpp})	34,7 В	34,8 В
Струм при максимальній потужності (I_{mpp})	10,96 А	10,92 А
Напруга холостого ходу (V_{oc})	41,44 В	41,30 В
Струм короткого замикання (I_{sc})	11,67 А	11,69 А
Температурний коефіцієнт	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C

Інструмент для симуляцій. Для симуляцій використовувався PVsyst 7.2, оскільки це складний інструмент з численними функціями для детального

проектування фотовольтаїчної системи та швидким часом симуляції. В декількох порівняльних дослідженнях це програмне забезпечення отримало високу оцінку і рекомендації, на відміну від Homer та Retscreen, які не мають можливості 3D-моделювання будівель та аналізу тіней від сусідніх будівель.

Теоретична основа. Глобальна горизонтальна іррадіація (GHI) у конкретному місці може бути визначена за допомогою супутникових даних, наземної метеостанції або моделі ясного неба. Моделі ясного неба використовуються для оцінки індексу прозорості атмосфери з метою визначення максимальної сонячної радіації у певному місці.

Модель ясного неба Кастена-Цеплака (КС) для глобальної горизонтальної і радіації (Вт/м^2) задається як:

$$GHI = 910 \cdot \cos \theta_z - 30 \quad (2.1)$$

$$\cos \theta_z = \cos L \cdot \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2.2)$$

де θ_z – zenітний кут сонця, тобто кут, утворений сонячними променями та вертикальним напрямком. Він є додатковим до кута висоти сонця, який визначає висоту або підйом між сонячними променями та горизонтальною площиною; L – це широта місцевості; δ – кут схилення; H – кутовий час. Глобальна горизонтальна освітленість складається з дифузної горизонтальної (DHI) та прямої нормальної освітленості (DNI). Для визначення цих компонентів можна використовувати моделі декомпозиції:

$$GHI = DHI \cdot \cos \theta_z + DNI \quad (2.3)$$

$$DHI = E_0 \cdot \tau^{AM} \quad (2.4)$$

$$DHI = 0,3 \cdot (1 - \tau^{AM}) E_0 \cdot \cos \theta_z \quad (2.5)$$

де E_0 – це позаземне випромінювання, τ – коефіцієнт пропускання, AM – повітряна маса.

Для похилої площини використовується модель транспозиції, щоб визначити рівень випромінювання на площині масиву. Пряме випромінювання на площину масиву можна розрахувати за допомогою спеціальних формул.

Якщо уявити це простіше, то сонячне випромінювання схоже на світло, що проходить через різні шари атмосфери, як крізь скло з різною прозорістю. Повітряна маса визначає, скільки «скла» сонячні промені повинні пройти, перш ніж досягти поверхні. А модель транспозиції – це наче коригування кута дзеркала, щоб спрямувати більше світла на потрібну поверхню:

$$E_{dir} = DNI \cdot \cos AOI \quad (2.6)$$

де AOI – це кут падіння між прямим нормальним випромінюванням (DNI) та передньою/задньою стороною сонячного модуля.

Для транспозиції випромінювання використовувалася модель Переса, оскільки вона враховує ізотропні, солярні та горизонткові дифузні компоненти.

Відбите від ґрунту випромінювання визначається за формулою:

$$E_g = GHI \cdot \rho \cdot \frac{(1 - \cos T)}{2} \quad (2.7)$$

де ρ – альbedo, T – кут нахилу.

Альbedo визначається як кількість сонячного випромінювання, що відбивається від поверхні. Зазвичай воно записується у відсотках або десяткових значеннях, де 1 означає ідеальний відбивач (наприклад, сніг або будь-яка біла поверхня), а 0 – поверхню, що повністю поглинає випромінювання (наприклад, чорні пофарбовані поверхні).

Сума випромінювання на площині масиву записується як:

$$E_s = E_{bs} + E_{ds} + E_{gs} \quad (2.8)$$

де E_s – це сума всього випромінювання на площині, E_{bs} – пряме нормальне випромінювання, E_{ds} – сума дифузного випромінювання від неба, а E_{gs} – сума випромінювання, відбитого від ґрунту, з урахуванням впливу альbedo на площину масиву.

Температурна модель, реалізована в PVsyst, представлена таким чином:

$$T_c = T_a + E_{POA} \frac{\alpha(1 - \eta_{tm})}{U_0 + U_1 \cdot W \cdot S} \quad (2.9)$$

де T_c (°C) – температура комірки; T_a (°C) – температура навколишнього середовища; E_{POA} (Вт/м²) – опромінення, що падає на площину масиву або

модуля; α – коефіцієнт поглинання модуля (значення за замовчуванням у PVsyst – 0,9); η_{m} – ефективність PV-модуля (значення за замовчуванням у PVsyst – 0,1); U_0 (Вт/м²·К) – постійна складова теплопередачі; U_1 (Вт/м²·К) – конвективна складова теплопередачі, WS (м/с) – швидкість вітру.

Потужність і вихідна енергія будь-якої фотоелектричної системи можуть бути визначені за допомогою:

$$P_{\text{power output}} = FF V_{\text{oc}} I_{\text{sc}} (1 + \alpha_{\text{mpp}} (T_c - 25^\circ\text{C})) \quad (2.10)$$

де FF – це фактор заповнення, V_{oc} – напруга холостого ходу, I_{sc} – струм короткого замикання, α_{mpp} – температурний коефіцієнт, T_c – температура модуля.

Температура комірки модуля впливає на його напругу, а отже, визначає вихідну потужність фотоелектричної (PV) системи.

Річна вироблена енергія позначається як Y і визначається як відношення річного вироблення енергії (Вт·год/рік) до встановленої потужності PV-системи (Вт).

Річна енергетична віддача виражається, як:

$$Y = \sum_n \frac{P_{\text{power output } n}}{P_{\text{install capacity}}} \Delta t \quad (2.11)$$

Порівнюючи енергетичну віддачу монофазних і біфазних систем, визначають загальний приріст енергії для біфазної системи, а також переваги використання трекінгової системи.

Таблиця 2.3 – Електричні характеристики інвертора та сонячного трекера

Характеристики	Інвертор	Характеристики	Сонячний трекер
Номінальна потужність	1000 кВт	Напруга стрінги	1500 В DC або 1000 В DC
Мінімальна напруга M_{pp}	450 В	Потужність	Автономне живлення: 30 або 60 Вт (смарт-панель) Живлення від мережі: 120-240 В AC
Максимальна напруга M_{pp}	820 В	Тип двигуна	Безщітковий двигун постійного струму 24 В
ККД	97,7 %	Допустима швидкість вітру	225 км/год

Біфасний приріст відображає збільшення питомої енергетичної віддачі біфасних фотоелектричних (PV) систем у порівнянні з монофасними.

Розрахунок біфасного та трекінгового приросту для кожної конфігурації представлений у такому вигляді:

$$BGFT = \left(\frac{Y_{fixed\ bifacial}}{Y_{fixed\ monofacial}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.12)$$

$$BGTK = \left(\frac{Y_{tracker\ bifacial}}{Y_{tracker\ monofacial}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.13)$$

$$TGMF = \left(\frac{Y_{monofacial\ tracker}}{Y_{monofacial\ fixed}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.14)$$

$$TGBF = \left(\frac{Y_{bifacial\ tracker}}{Y_{bifacial\ fixed}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.15)$$

$Y_{fixed\ bifacial}$ і BGFT відповідно представляють енергетичну віддачу та біфасний приріст для біфасної фотоелектричної (PV) системи з фіксованим нахилом у порівнянні з монофасною системою.

$Y_{tracker\ bifacial}$ і BGTK – це відповідно енергетична віддача та біфасний приріст для біфасної PV-системи з трекером відносно монофасної системи з трекінговою технологією.

TGMF – додатковий приріст від встановлення трекера для відстеження сонця в монофасній системі порівняно з фіксованою нахиленою монофасною PV-системою, а TGBF – приріст від додавання трекера до біфасної PV-системи порівняно з фіксованою нахиленою біфасною PV-системою.

Енергетична віддача для фіксованої монофасної системи та монофасної системи з трекером позначаються відповідно як $Y_{fixed\ monofacial}$ і $Y_{monofacial\ tracker}$.

Усі ці показники оцінюються для визначення ефективності системи.

Крім того, було проведено аналіз чутливості для оцінки впливу вибраних параметрів, таких як висота від землі та альbedo, на продуктивність фіксованої нахиленої біфасної системи та біфасної PV-системи з трекером.

Налаштування симуляції. Для всіх систем ширина панелей становить 3,04 м, а відстань між рядами була розрахована, як 9 м.

Кут підйому для найгіршого сценарію (грудень) у Північній півкулі та висота від землі були враховані для визначення достатнього кроку з метою уникнення затінення.

Висота від землі становила 1.5 м, а альbedo для пустельного середовища прийнято рівним 0,4.

Таблиці 2.4 і 2.5 містять параметри системи для чотирьох досліджуваних сценаріїв. Значення параметрів системи відповідають специфікаціям PVsyst 7.2 та NEXTracker.

Таблиця 2.4 – Геометрія фіксованих нахилених фотомодулів

Параметр	Значення
Альbedo	0,4
Висота від землі	1,5 м
Ширина модуля	3,04 м
Довжина модуля	1,8 м
Кут нахилу	15°
Азимут модуля	0°

Таблиця 2.5 – Геометрія фотомодулів із горизонтальною віссю трекінгу

Параметр	Значення
Альbedo	0,4
Висота масиву	1,3-1,8 м
Ширина модуля	3,04 м
Азимут осі	0°
Кут нахилу	Змінний
Діапазон руху трекера	±60°
Коефіцієнт покриття ґрунту	0,338

Кут освітлення поверхні довільної орієнтації розраховують за загальною формулою (2.16), в якій умовно сталі протягом дня вхідні величини об'єднують в окремі коефіцієнти [7]:

$$\cos\theta = A\sin\omega\tau + B\cos\omega\tau + C; \quad (2.16)$$

$$A = \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma; \quad (2.17)$$

$$B = \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma; \quad (2.18)$$

$$C = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma. \quad (2.19)$$

Годинні кути $(\omega\tau)_{\text{сх/зх}}$ і моменти $\tau_{\text{сх/зх}}$ сходу/заходу Сонця для цієї площини отримують, як розв'язки рівняння (2.14) після низки попередніх тригонометричних перетворень, наведених у монографії [11]:

$$\begin{aligned} A\sin\left[2(\omega\tau / 2)\right] + B\cos\omega\tau + C &= \\ &= 2A\cos(\omega\tau / 2)\sin(\omega\tau / 2) + B\cos\omega\tau + C = \\ &= 2A\sqrt{(1 + \cos\omega\tau) / 2} \times \sqrt{(1 - \cos\omega\tau) / 2} + B\cos\omega\tau + C = 0. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Після піднесення до квадрата і перестановки доданків отримують таке квадратне рівняння відносно годинного кута $\omega\tau$:

$$(A^2 + B^2)\cos^2\omega\tau + 2BC\cos\omega\tau + (C^2 - A^2) = 0, \quad (2.21),$$

звідки

$$\cos\omega\tau = \frac{-BC \pm \sqrt{A^4 + A^2B^2 - A^2C^2}}{B^2 + A^2}. \quad (2.22)$$

У практичних розрахунках останнє співвідношення використовують після деякого спрощення з метою уточнення розв'язків і усунення неоднозначності результатів тригонометричних перетворень. Передусім вводять такі заміни:

$$x^2 = B^2 / A^2; \quad y^2 = C^2 / A^2; \quad (2.23)$$

$$\cos\omega\tau = \frac{-xy \pm \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1}; \quad (2.24)$$

$$x = \frac{\cos\varphi}{\sin\gamma \operatorname{tg}\beta} + \frac{\sin\varphi}{\operatorname{tg}\gamma}; \quad (2.25)$$

$$y = \operatorname{tg} \delta \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \gamma \operatorname{tg} \beta} - \frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \gamma} \right). \quad (2.26)$$

Якщо прийняти до уваги, що годинний кут сходу або заходу Сонця нахиленої поверхні фізично ніколи не може перевищувати такий для горизонтальної поверхні

$$|\omega \tau_{cx/3x}(\beta, \gamma \neq 0)| \leq |\omega \tau_{cx/3x}(\beta = 0)|, \quad (2.27)$$

то формулу (2.19) записують у чотирьох різних варіантах для початку і звершення інсоляції (2.28) – (2.32) і залежно від знака азимуту поверхні γ . У цитованому першоджерелі [11], годинним кутам $\omega \tau$ зранку і відповідним відхиленням на схід Сонця та поверхні присвоюють знак (+), а на захід відповідно (–). У системі координат з відліком часу відносно полудня, знаки цих величин протилежні, що потрібно враховувати під час інтерпретації результатів, наведених у різних публікаціях. Зокрема для поверхні, орієнтованої у південно-східному напрямку, де $\gamma > 0$ (за версією [11]), годинні кути сходу/заходу – початку/закінчення інсоляції – розраховують за формулами (2.28) і (2.29):

$$\omega \tau_{cx} = \min \left[\omega \tau(\beta = 0); \arccos \left(\frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right], \quad (2.28)$$

$$\omega \tau_{3x} = -\min \left[\omega \tau_{3x}(\beta = 0); \arccos \left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right]. \quad (2.29)$$

Тут годинний кут, який при $\beta = 0$ відповідає моменту природного сходу/заходу Сонця відносно лінії горизонту, узалежнений від нахилу поверхні. Умова $\min$ перед квадратними дужками означає, що розраховане значення не може перевищувати природного для горизонтальної поверхні. Відтак після додаткового порівняння приймається мінімальне значення з присвоєнням відповідного знака.

При орієнтації поверхні на південний захід (за версією [11] $\gamma < 0$) використовують такі ж формули, але з протилежними знаками:

$$\omega\tau_{cx} = \min \left[\omega\tau(\beta = 0); \arccos \left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right], \quad (2.30)$$

$$\omega\tau_{zx} = -\min \left[\omega\tau(\beta = 0); \arccos \left(\frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right]. \quad (2.31)$$

Очевидно, що в обох випадках моменти початку і закінчення інсоляції розраховують діленням відповідного годинного кута на кутову швидкість ω :

$$|\tau_{cx/zx}(\beta, \gamma \neq 0)| = \frac{|\omega\tau_{cx/zx}(\beta, \gamma \neq 0)|}{\omega}. \quad (2.32)$$

Ефективність стеження зазвичай оцінюють шляхом порівняння денних експозицій стежної поверхні з фіксованою, наприклад, горизонтальною [1]. Однак горизонтальна поверхня освітлюється лише прямими та дифузними потоками сонячної радіації, тоді як похилі й стежні поверхні додатково сприймають відбиті потоки різної інтенсивності. Тому доцільніше оцінювати цей показник через відношення денних енергетичних експозицій досліджуваної поверхні до експозиції ідеального двовісного пристрою.

Таблиця 2.6 – Енергетична ефективність стеження на широті 50° при $T_L = 2$

Пристрій	Розрахована експозиція, Вт·год/м ²			Частка від двовісного стеження, %		
	Період			Період		
	ВРД	ЛС	ЗС	ВРД	ЛС	ЗС
Двовісний	10222	14207	5438	100	100	100
Полярно-поворотний	10222	12915	4989	100	91,2	91,7
Вертикально-поворотний	9825 $\beta = 50^\circ$	$\beta = (50^\circ - \delta)$	12338	96,1	86,8	99,4
		$\beta = 50^\circ$	13487		94,9	
$H(N-S)$	8268	13440	2628	80,9	94,6	48,3
$H(E-W)$	7228	9926	4823	70,7	69,9	88,7
$\beta = 0^\circ$	4549	8623	1111	44,5	60,7	20,4
Умовні позначення: ВРД – весняне рівнодення; ЛС – літнє сонцестояння; ЗС – зимове сонцестояння; $H(N-S)$ і $H(E-W)$ – горизонтально поворотний пристрій						

Оцінки, отримані за цією методикою в умовах дуже прозорої атмосфери, наведені в табл. 2.6 і загалом узгоджуються з даними табл. 2.7 [10]. Відмінності між результатами пояснюються використанням різних вхідних параметрів під час моделювання інсоляційних характеристик. Зокрема, відповідно до [6], точність оцінювання суттєво залежить від вибраного коефіцієнта мутності атмосфери та прийнятої моделі розподілу яскравості неба протягом дня.

Таблиця 2.7 – Енергетична ефективність стеження за даними [10]

Пристрій	Зареєстрована сонячна енергія, кВт·год/м ²			Частка двовісного стеження, %		
	Період			Період		
	ВРД	ЛС	ЗС	ВРД	ЛС	ЗС
Двовісний	8,43	10,60	5,70	100	100	100
Полярно-поворотний	8,43	9,73	5,23	100	91,7	91,7
$H(N-S)$	7,51	10,36	4,47	89,1	97,7	60,9
$H(E-W)$	6,22	7,85	4,91	73,8	74,0	86,2
Умовні позначення: ВРД – весняне рівнодення; ЛС – літнє сонцестояння; ЗС – зимове сонцестояння; $H(N-S)$ і $H(E-W)$ – горизонтально поворотний пристрій і напрям осі вказано у дужках						

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Оптимізація потужності сонячної електростанції з використанням одноосьового та двохосьового сонячного трекера

У цьому дослідженні використовується кількісний експериментальний метод із підходом, що включає проєктування системи та аналіз даних [12] [13]. Отримані дані за допомогою двовісної системи стеження за Сонцем будуть порівняні з результатами, отриманими від статичних сонячних панелей [14] [15].

Вимірювальна система працює без навантаження, а основними досліджуваними параметрами є сила струму, напруга та вихідна потужність сонячних панелей. У таблиці 3.1 наведено технічні характеристики сонячних панелей, що використовуються.

Таблиця 3.1 – Характеристики сонячної панелі (20 Вт):

Параметр	Значення
Пікова потужність (P_{max})	20 Вт
Робоча напруга (V_{mp})	18 В
Робочий струм (I_{mp})	1,14 А
Напруга холостого ходу (V_o)	1,29 А
Розміри	36 × 2 × 45 см

На рис. 3.1 показує блок-схему роботи двовісної системи стеження за Сонцем. Для визначення інтенсивності світла використовується фоторезистор (LDR – Light-Dependent Resistor), який розташований у чотирьох різних напрямках: верхній-правий, верхній-ліворуч, нижній-правий і нижній-ліворуч.

Кожен LDR-сенсор зчитує аналогове значення на своєму куті. Для аналізу беруться значення від двох сусідніх фоторезисторів з обох сторін (наприклад, зверху і знизу, зліва і справа), після чого обчислюється середнє значення.

Отримавши середню інтенсивність світла для кожної сторони, розраховують різницю між значеннями на суміжних сторонах.

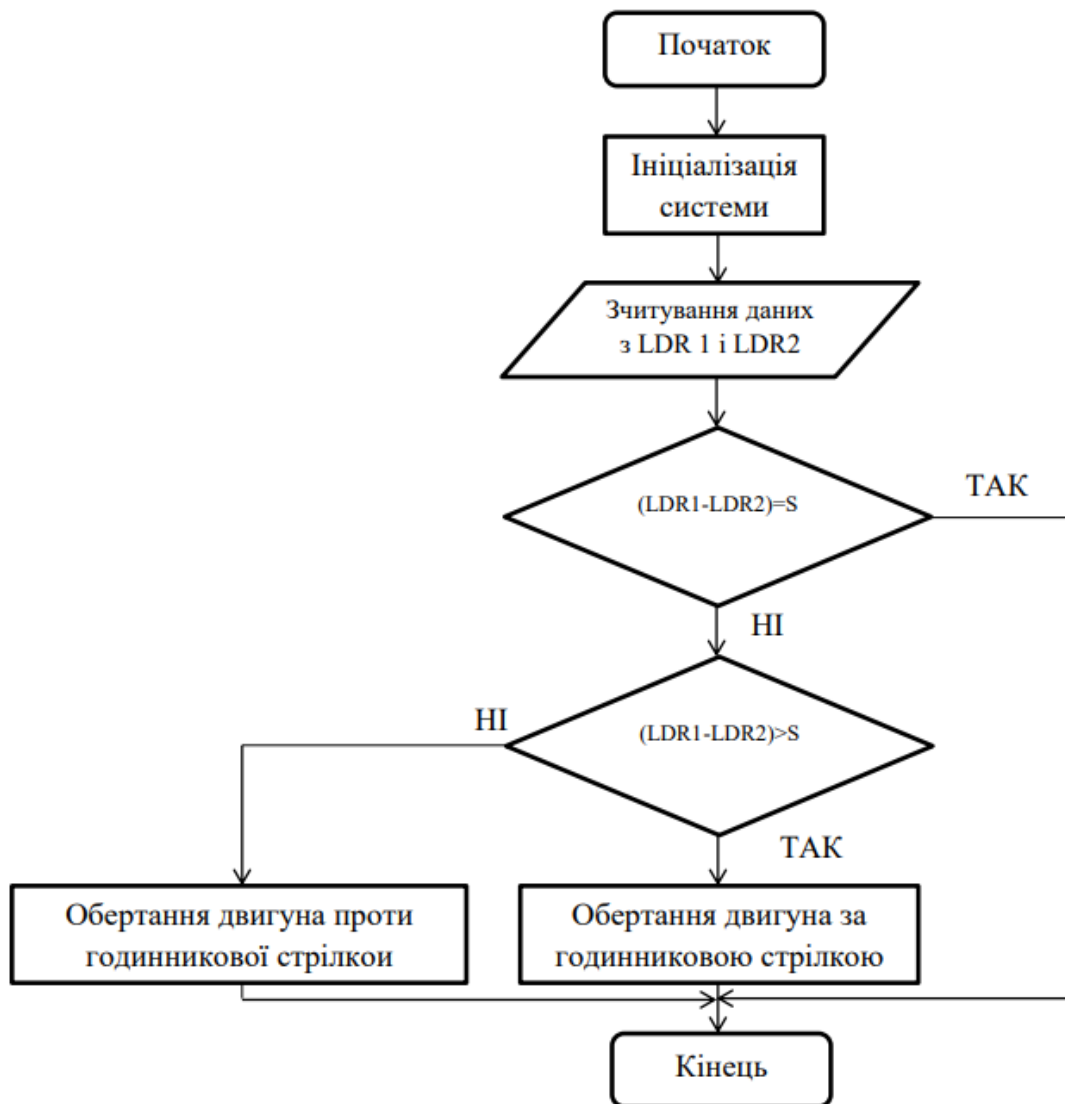


Рисунок 3.1 – Блок-схема системи двовісного стеження за Сонцем.

Ця різниця використовується для регулювання положення сервоприводу з метою орієнтації на джерело світла. Якщо різниця в інтенсивності світла перевищує заданий поріг, код змінює положення сервоприводу відповідно до зміни напрямку світла.

Етапи створення конструкції двовісної системи стеження за Сонцем виконувалися за допомогою програмного забезпечення SketchUp 2021. Результати 3D-моделювання цього пристрою показані на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Вид зверху конструкції системи стеження за Сонцем.

Конструкція апаратної частини двовісної системи стеження за Сонцем використовує мікроконтролер Arduino Mega 2560 як контролер. Сонячні панелі виконують функцію генерації енергії. Для визначення інтенсивності світла використовується LDR-сенсор, який активує сервопривід у відповідь на зміни освітленості.

Механізм руху сонячної панелі реалізований за допомогою сервомотора з кутом обертання 180 градусів. Для зберігання енергії використовується акумулятор 12 В, який накопичує електроенергію, вироблену сонячними панелями. Щоб знизити напругу перед подачею на Arduino, застосовується Step Down DC to DC MP1584EN Mini.

Двовісна система стеження за Сонцем коригує положення сонячної панелі так, щоб вона завжди була спрямована на джерело світла (Сонце). Ця

система оснащена LDR-сенсорами для вимірювання інтенсивності світла. Робочий принцип двовісної системи стеження полягає в тому, що сонячні панелі автоматично слідують за рухом Сонця у двох площинах – горизонтальній та вертикальній, як показано на рис. 3.3.

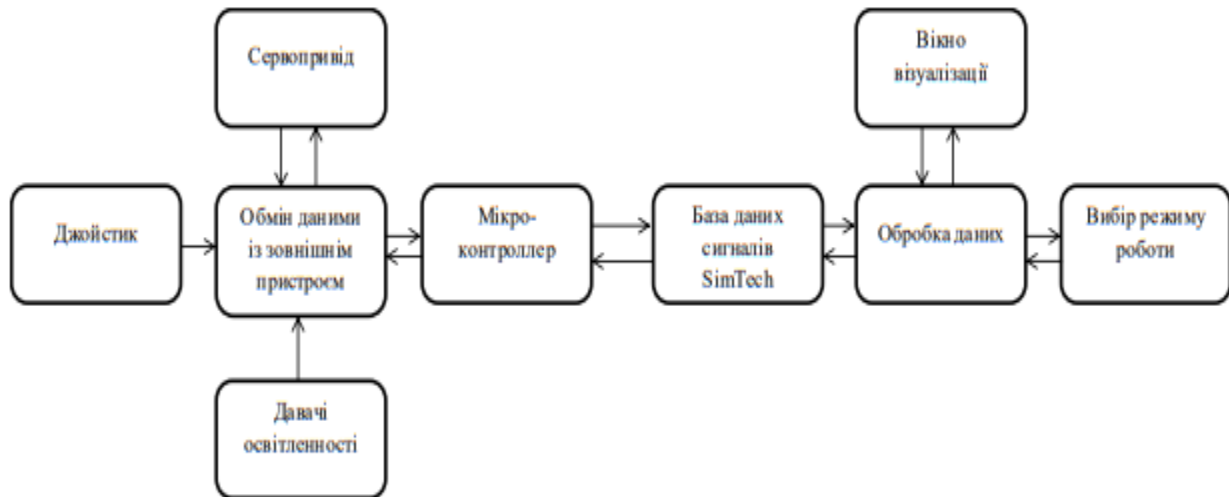


Рисунок 3.3 – Робоча система двовісного стеження за Сонцем.

3.2 Результати оптимізація потужності сонячної електростанції з використанням одноосьового і двохосьового сонячного трекера

Сонячна панель потужністю 20 Вт була встановлена на моделі системи двовісного стеження для експериментальних випробувань, щоб розрахувати вихідну потужність, що показана на рис. 3.4. Для порівняння, сонячна панель потужністю 20 Вт була встановлена статично (нерухомо), орієнтуючись на північний схід, з кутом нахилу панелі, встановленим на 30° (координати: (49°50'33" пн. ш. 24°01'56" сх. д.). Випробування проводились на території Львівського національного університету природокористування в лабораторії відновлювальних джерел енергії.



Рисунок 3.4 – Сонячний трекер з системою стеження.

Тестування проводилося шляхом обчислення значень сили струму, напруги та вихідної потужності сонячної панелі без використання навантаження. Було проведено десять вимірювань за одну годину, де тестування сонячних панелей з використанням двовісної системи стеження проходило з 09:00 WIB до 16:00 WIB.

Рисунок 3.5 показує результати тестування між струмом, виробленим сонячною панеллю з двовісною системою стеження, і статичною сонячною панеллю. Максимальний струм, вироблений двовісним сонячним трекером, становить 0,89 А о 15:00, тоді як максимальний струм, вироблений статичною сонячною панеллю, складає 0,56 А о 12:00. З рис. 3.5 можна зробити висновок, що використання двовісної системи стеження за Сонцем забезпечує більш ефективне вироблення струму.

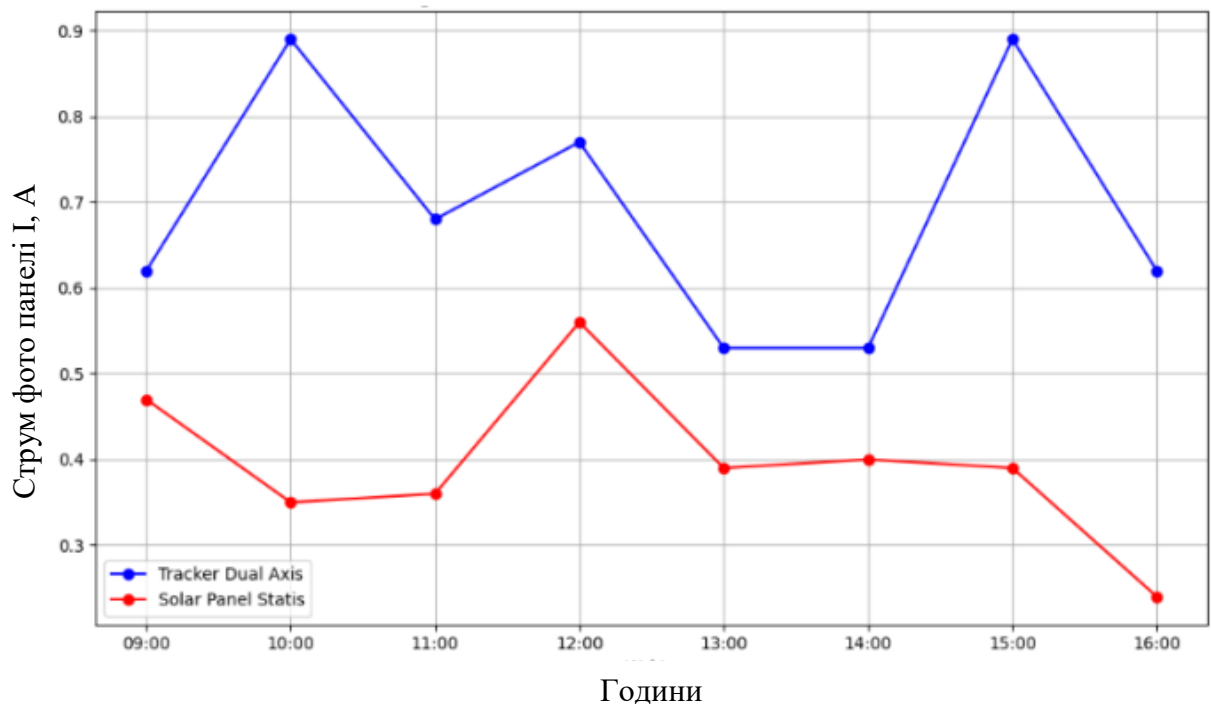


Рисунок 3.5 – Порівняння значень електричного струму між сонячними панелями з двовісним стеженням і статичними сонячними панелями.

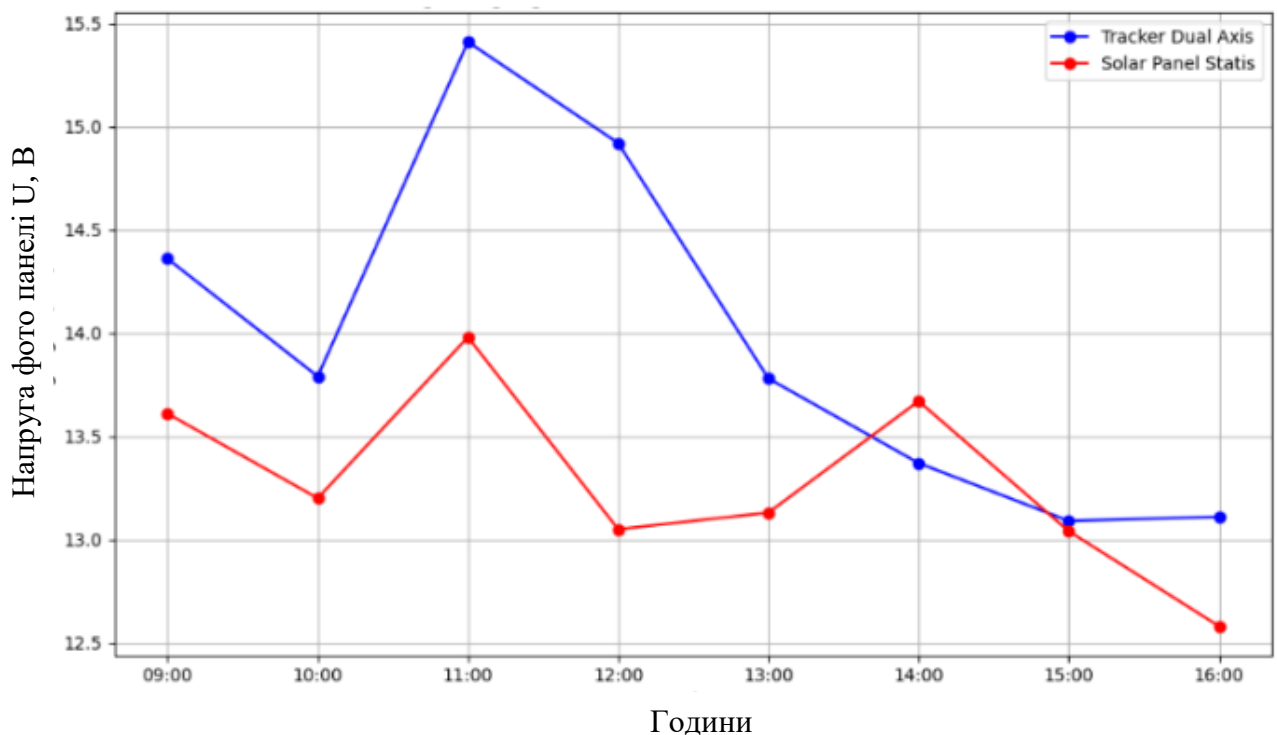


Рисунок 3.6 – Порівняння значень напруги між сонячними панелями з двовісним стеженням і статичними сонячними панелями.

На рис. 3.6 максимальна напруга, яку виробляє двовісний сонячний трекер, становить 15,41 В (відбувається о 11:00), тоді як максимальна напруга,

вироблена статичною сонячною панеллю, складає 13,98 В (відбувається о 11:00).

Аналіз розрахунку потужності.

З даних потужності, записаних у таблиці 3.2, видно зміну інтенсивності сонячного світла з 09:00 WIB до 16:00 WIB, при цьому найвища інтенсивність сонячного світла була досягнута о 13:00 WIB, коли інтенсивність світла склала 11 093 Люкса. Тим часом найнижча інтенсивність світла була о 09:00, коли вона становила 2597 Люксів.

Порівняння потужності, виробленої сонячними панелями з двовісною системою стеження і сонячними панелями в статичному положенні, можна побачити о 10:00 з інтенсивністю світла 4631 люкс, коли двовісний сонячний трекер виробляє максимальну потужність 12,27 Вт. У той час як максимальна потужність, вироблена статичними сонячними панелями, спостерігається о 12:00 WIB з інтенсивністю світла 5196 люкс, що дає потужність 7,31 Вт.

Таблиця 3.2 – Характеристики сонячної панелі 20 Вт.

Час	Двовісний Сонячний Трекер (Вт)	Статична Сонячна Панель (Вт)	Різниця (Вт)
09:00	8,90	6,40	2,51
10:00	12,27	4,62	7,65
11:00	10,48	5,03	5,45
12:00	11,49	7,31	4,18
13:00	7,30	5,12	2,18
14:00	7,09	5,47	1,62
15:00	11,65	5,09	6,56
16:00	8,13	3,02	5,11

З даних таблиці 3.2 порівняння потужності двовісного сонячного трекера та статичної сонячної панелі можна побачити на графіку в рис. 3.7.

Було отримано збільшення потужності на 83% при використанні двовісного сонячного трекера порівняно зі статичними сонячними панелями, що є результатом різних факторів оптимізації. У порівнянні з попередніми дослідженнями, проведеними в 2025 році, де було досягнуто збільшення ефективності на 73,84%, ефективність двовісного сонячного трекера, отримана в цьому дослідженні, була вищою на 9,16% [16]. Двовісний сонячний трекер є

одним із рішень для максимізації потужності [17]. Двовісний сонячний трекер здатний динамічно слідувати за рухом Сонця, уникати тіней, які знижують продуктивність панелей, і забезпечувати оптимальні кути поглинання протягом дня. Завдяки цим перевагам сонячні панелі можуть максимально використовувати потенціал сонячної енергії, яка ефективно та ефективно перетворюється на електричну енергію.

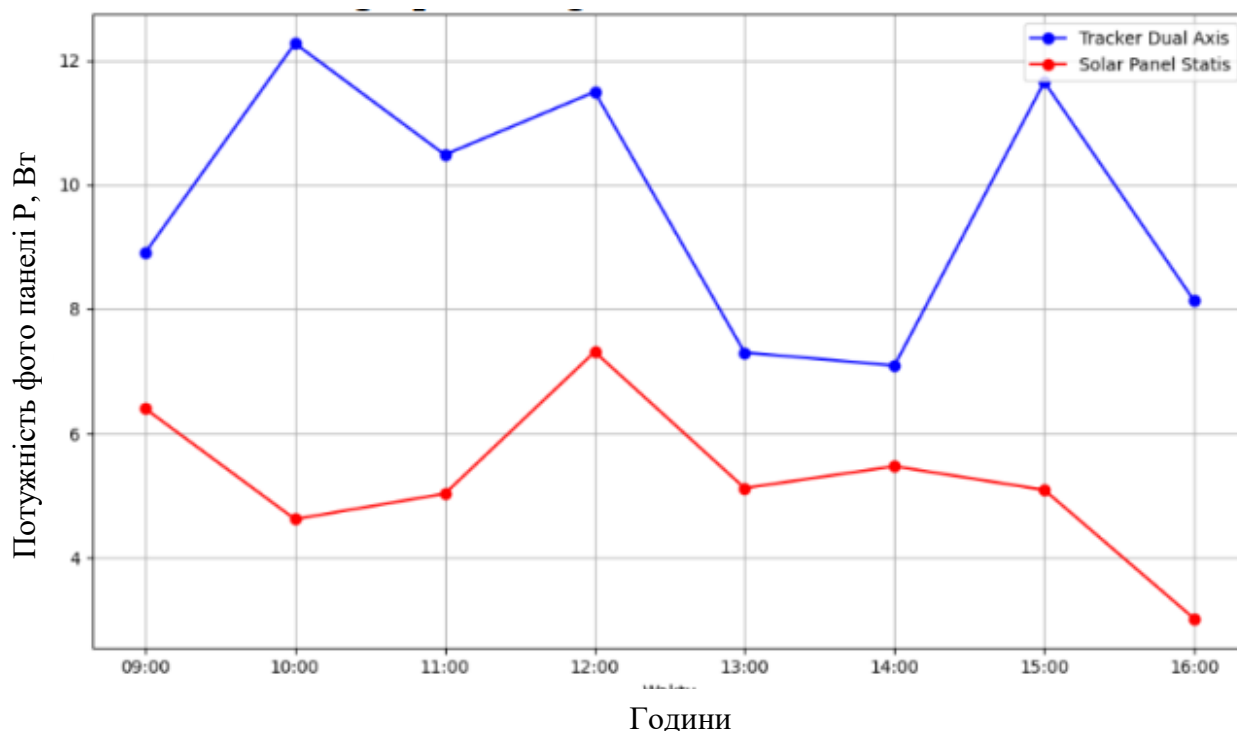


Рисунок 3.7 – Порівняння значень потужності між сонячними панелями з двовісним стеженням і статичними сонячними панелями.

Система двовісного сонячного трекера з LDR-сенсором, що контролюється за допомогою Arduino Mega 2560 і двох сервомоторів на осях x і y, була успішно застосована до сонячної панелі потужністю 20 Вт. Використання двовісних сонячних трекерів у системах сонячної енергетики має потенціал значно збільшити вироблену потужність порівняно зі статичними сонячними панелями. Оптимізуючи струм, напругу і потужність, а також досягаючи максимальної потужності раніше, ця система може підвищити ефективність і продуктивність сонячної енергії. На основі результатів тестування сонячних панелей з двовісним трекером, різниця в енергії досягла

83% за день, при тестуванні, яке тривало 8 годин. Це показує, що використання двовісного стеження за Сонцем є більш ефективним і може допомогти максимізувати поглинання сонячного світла на сонячних панелях порівняно з звичайними (статичними) сонячними панелями.

Розрахунок ККД. ККД сонячної панелі було розраховано за допомогою рівняння:

$$\eta_p = \left(\frac{P_0}{P_{\max}} \right) \quad (3.1)$$

де η_p – ККД сонячної панелі, P_0 – вихідна потужність панелі, $P_{\max}$ – максимальна вихідна потужність панелі.

ККД модуля фотоелектричної панелі оцінювався за допомогою рівняння:

$$\eta_p = \left(\frac{P_0}{A_c \cdot G} \right) \quad (3.2)$$

де A_c – площа фотоелектричної панелі, G – горизонтальна глобальна сонячна радіація.

Ясний день. Експеримент проводився, як у ясний день, так і в частково хмарний день. Ці два добові моделі часто спостерігалися в м. Львів, Україна, протягом року. У ясний день було зафіксовано, що сонячне випромінювання поступово зростає, поки не досягає максимальної інтенсивності приблизно 950 Вт/м² опівдні, а після 15:00 поступово зменшується, досягнувши 215 Вт/м² о 18:00, що показано на рис. 3.8.

Паралельно на рис. 3.8 представлено графік вихідної потужності фотоелектричних панелей з одноосьовим стеженням та фіксованою орієнтацією. Панель з одноосьовим стеженням підтримувала стабільну потужність приблизно 30-35 Вт упродовж дня з 9:00 до 18:00. Це пояснюється тим, що датчик стеження постійно визначає напрямок найбільшої сонячної радіації і орієнтує панель у відповідному напрямку.

На відміну від цього, потужність фіксованої панелі слідувала квадратичному розподілу, що відповідає зміні сонячного випромінювання протягом дня. Було виявлено, що до 11:00 та після 15:00 вихідна потужність

фіксованої панелі була неоднорідною і значно нижчою у порівнянні з панеллю зі стеженням.

Проте фіксована панель може виробляти таку ж потужність, як і одноосьова система стеження панелі, коли сонце знаходиться перпендикулярно до її поверхні в обідній час. Це чітко видно на рис. 3.9, де в цей період додатковий приріст потужності панелі зі стеженням становить менше 2,5 Вт і наближається до нуля.

Однак вранці та ввечері додатковий приріст потужності від відстежувальної панелі може досягати 28 Вт. Таким чином, панель зі стеженням забезпечує стабільну вихідну потужність протягом усього дня, тоді як фіксована панель значною мірою залежить від інтенсивності сонячного випромінювання та положення сонця.

Загальна енергія, вироблена панеллю з одноосьовим стеженням у ясний день, склала 280 Вт·год, що показано на рис. 3.10. Це приблизно на 32,7% більше, ніж енергетичний вихід фіксованої панелі в цей день. Дане спостереження узгоджується з результатами дослідників, наведеними в літературі.

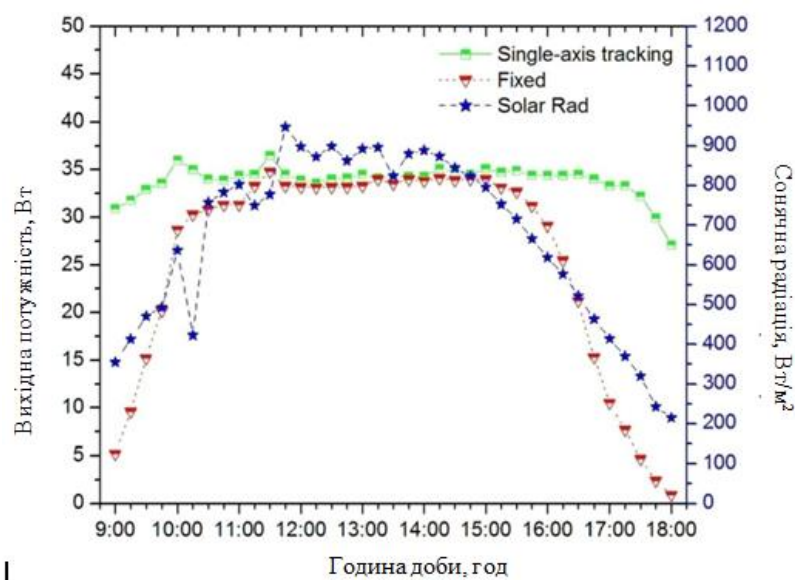


Рисунок 3.8 — Порівняння вихідної потужності між одноосьовою відстежувальною та фіксованою сонячною панеллю у ясний день.

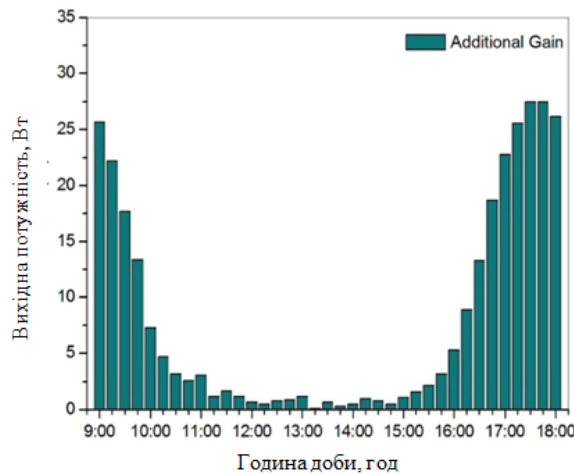


Рисунок 3.9 – Додатковий приріст потужності від одноосьової відстежувальною сонячної панелі у ясний день.

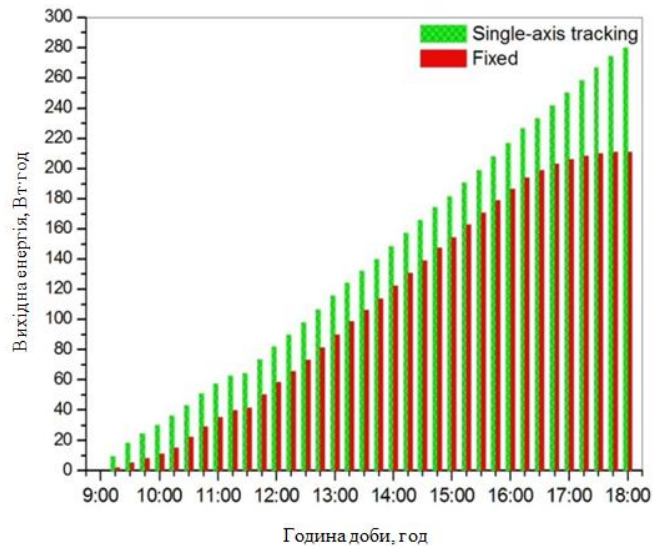


Рисунок 3.10 – Загальний вихід енергії від одноосьової відстежувальною та фіксованої сонячної панелі у ясний день.

Частково хмарний день. На відміну від ясного дня, сонячне випромінювання у частково хмарний день має нерегулярний характер через велику кількість хмар, що проходять у ранковий та вечірній час. Проте опівдні інтенсивність випромінювання досягає приблизно 1050 Вт/м^2 , як показано на рис. 3.11. У цей день передбачити панелі випромінювання складно, оскільки він залежить від ступеня хмарності у конкретний момент.

Через це ані відстежувальна, ані фіксована панель не можуть забезпечити стабільний вихід потужності до полудня. Однак у полуденний та вечірній час відстежувальна панель виробляє стабільну потужність на рівні 35-37 Вт. Її

вихідна потужність була вищою, ніж у ясний день, оскільки після розсіювання хмар сонячне випромінювання надходило безпосередньо.

Вихідна потужність фіксованої панелі, як і раніше, точно повторює розподіл сонячного випромінювання протягом дня.

Найбільший додатковий приріст потужності від одноосьової відстежувальної панелі спостерігався після 15:00 і досяг 28 Вт о 18:00, що видно на рис. 3.12.

Загальний вихід енергії від відстежувальної панелі у частково хмарний день склав 242 Вт·год, що показано на рис. 3.13. Це приблизно на 28,0% більше, ніж у фіксованої панелі в цей день.

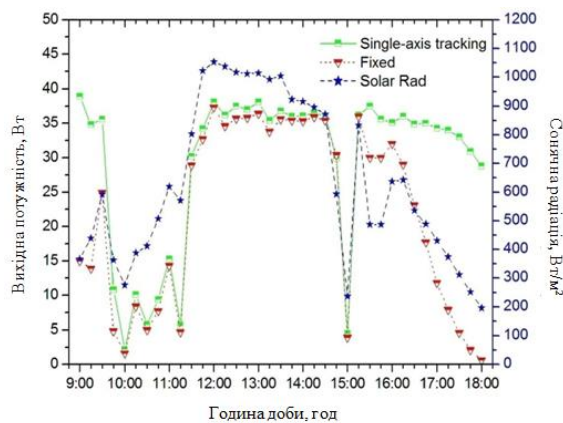


Рисунок 3.11 – Порівняння вихідної потужності між двохосьовою відстежувальною та фіксованою сонячною панеллю у частково хмарний день.

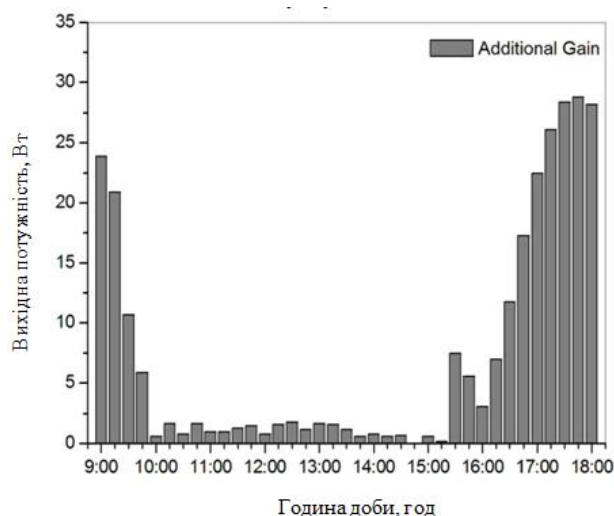


Рисунок 3.12 – Додатковий приріст потужності від двохосьової відстежувальною сонячної панелі у частково хмарний день.

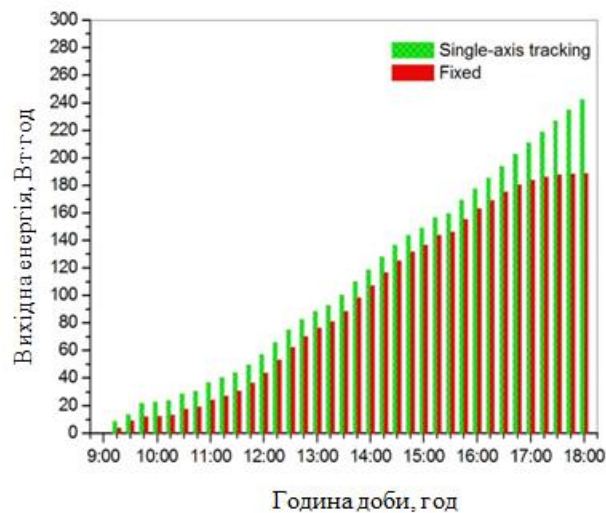


Рисунок 3.13 – Ефективність фотоелектричної сонячної панелі

У ясний день середній ККД одноосьової відстежувальної панелі протягом дня становив приблизно 67,65%, що показано у таблиці 3.3. У той час як середній ККД фіксованої панелі складав лише 51,65%.

Відсоткове збільшення середньої вихідної потужності відстежувальної панелі порівняно з фіксованою становило 30,12%. Однак відстежувальна панель демонструвала вищу вихідну потужність до 11:00 та після 15:00. У цей період середній ККД відстежувальної панелі становив 66,70%, тоді як у фіксованої – 39,96%. Таким чином, приріст середньої вихідної потужності завдяки стеженню досягав 66,92% у порівнянні з фіксованою панеллю. ККД модуля відстежувальної панелі також перевищував ККД фіксованої панелі у цей період, досягаючи 28,9% о 18:00, як видно з таблиці 3.4.

Однак опівдні ефективність обох панелей була майже однаковою, а максимальна різниця становила лише 0,3%. Це пояснюється тим, що обидві панелі отримували однакову кількість сонячного випромінювання, коли його напрям був перпендикулярним до поверхні панелей.

У частково хмарний день середній ККД одноосьової відстежувальної панелі становив 61,22%, тоді як у фіксованої – лише 46,61%. Отже, відсоткове збільшення середньої вихідної потужності становило 31,37%, що майже збігається з показником у ясний день (різниця лише 1%).

Проте, до 11:00 та після 15:00 середній ККД відстежувальної панелі був 56,80%, тоді як у фіксованої – 32,67%. Це означає, що приріст вихідної потужності від відстежувальної панелі у цей період досягав 73,81% порівняно з фіксованою.

Аналогічно, ККД модуля відстежувальної панелі перевищував ККД фіксованої у вечірній час, досягаючи 33,7% о 18:00.

Таблиця 3.3 – ККД фотоелектричної сонячної панелі

Умови дня	Панель	Середня вихідна потужність (Вт)	Середній ККД панелі (%)	Середня вихідна потужність до 11:00 та після 15:00 (Вт)	Середній ККД панелі до 11:00 та після 15:00 (%)
Ясний день	Відстежувальна	33,82	67,65	33,35	66,70
	Фіксована	25,83	51,65	19,98	39,96
Частково хмарний день	Відстежувальна	30,61	61,22	28,40	56,80
	Фіксована	23,30	46,61	16,34	32,67

Крім того, було відзначено, що ККД обох панелей чітко повторював зміну сонячного випромінювання протягом полудня, а максимальна різниця між ними становила лише 0,6%.

Таблиця 3.4 – ККД модуля

Умови дня	Панель	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Ясний день	Відстежувальна	20,0%	13 %	9,8 %	8,7 %	8,9 %	8,8 %	10,1 %	12,7 %	18,4 %	28,9 %
	Фіксована	3,4%	10,3 %	8,9 %	8,5 %	8,6 %	8,7 %	9,8%	10,8 %	5,8%	1,0%
Частково хмарний день	Відстежувальна	24,3%	1,8%	5,7 %	8,3 %	8,6 %	9,0 %	4,4%	12,6 %	18,2 %	33,7 %
	Фіксована	9,4%	1,3%	5,3 %	8,1 %	8,2 %	8,8 %	3,8%	11,5 %	6,3%	0,7%

Отже, у цьому дослідженні було вивчено ефективність одноосьової відстежувальної та фіксованої сонячної панелі. Можна зробити кілька важливих висновків:

1. Одноосьова відстежувальна панель є більш ефективною за фіксовану панель лише до полудня та після полудня.

2. Опівдні обидві панелі виробляли порівнянну кількість потужності.

3. Одноосьова відстежувальна панель виробляє більшу потужність порівняно з фіксованою протягом усього дня, що свідчить про ефективне використання більшої частини доступного сонячного випромінювання. Це дозволяє зменшити період окупності початкових інвестицій в технологію.

Подальші дослідження повинні включати порівняння системи з двоосьовим стеженням з одноосьовою системою, зокрема для цього Західного регіону України.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Служба охорони праці створюється на підприємствах з кількістю працівників 50 і більше. На підприємстві з кількістю працівників менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва особи, які мають відповідну підготовку.

На підприємстві з кількістю працівників менше 20 осіб для виконання функцій служби охорони праці можуть залучатися сторонні спеціалісти на договірних засадах, які мають відповідну підготовку.

Зазвичай виокремлення служби охорони праці як такої в структурі підприємства не практикується. Її функції покладаються на традиційні структурні підрозділи – відділи охорони праці (відділи охорони праці та промислової безпеки, охорони праці та пожежної безпеки).

Підпорядковується служба охорони праці згідно із законодавством безпосередньо роботодавцеві. Проте роботодавець може доручити функціональне управління (кураторство) діяльністю служби іншій посадовій особі, скажімо, головному інженерові, заступникові директора з охорони праці тощо.

Покладення таких обов'язків потрібно закріпити наказом або відобразити в посадовій інструкції уповноваженої особи. Робота служби охорони праці підприємства має здійснюватись відповідно до плану роботи та графіків обстежень, затверджених роботодавцем.

4.2 Протипожежна безпека і грозозахист

Блискавко захист – це комплекс захисних захистів від блискавки, які гарантують безпеку людей, збереження людей і споруд, обладнання та матеріалів від вибухів, загоряння й руйнування. Найпростішими і надійними

засобами від блискавки є створення блискавковідводів. Схема блискавкозахисту будівлі показана на рис. 4.1.

Струмопровід виконується сталлю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15....20 Ом.

Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

$$R_0 = 1.5 \cdot h, \text{ м. } R_0 = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м.}$$

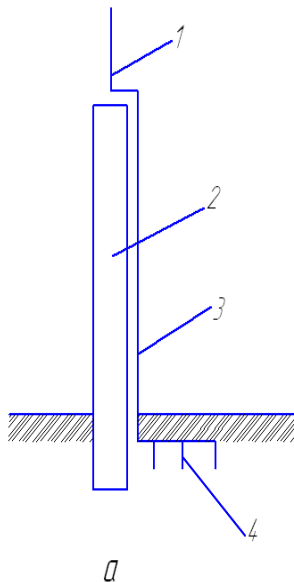


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,

2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

Для будинку довжиною L кількість одиночних блискавковідводів визначаємо через радіус конуса R_0 в якому ймовірність попадання 95% за формулою:

$$Nb = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт,} \quad Nb = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

Усі з'єднання в процесі монтажу системи блискавко захисту (Блискавко приймач – струмовідвід, струмовід – заземлювач) виконують за допомогою зварювання. Болтові з'єднання застосовують лише для тимчасових блискавко захисних пристроїв.

4.3 Функції служби охорони праці

1. Підготовка проектів наказів (розпоряджень) з питань охорони праці і внесення їх на розгляд роботодавцю. Проведення спільно з представниками інших структурних підрозділів і за участю представників професійної спілки підприємства або, за її відсутності, уповноважених найманими працівниками осіб із питань охорони праці перевірок дотримання працівниками вимог нормативно-правових актів з охорони праці.

2. Проведення з працівниками вступного інструктажу з питань охорони праці.

3. Ведення обліку та проведення аналізу причин виробничого травматизму, професійних захворювань, аварій на виробництві, заподіяної ними шкоди.

4. Забезпечення належного оформлення і зберігання документації з питань охорони праці, а також своєчасної передачі її до архіву для тривалого зберігання згідно з установленим порядком.

5. Складання звітності з охорони праці за встановленими формами.

6. Складання за участю керівників підрозділів підприємства переліків професій, посад і видів робіт, на які повинні бути розроблені інструкції з охорони праці, що діють в межах підприємства, надання методичної допомоги під час їх розроблення.

Служба охорони праці:

- складає за участю керівників підрозділів, служб головних спеціалістів (головного технолога, головного механіка, головного енергетика, головного 60 металурга, інших фахівців), служби організації праці та заробітної плати переліки професій і видів робіт, для яких повинні бути розроблені інструкції, надає методичну допомогу під час їх розроблення;

- бере участь у розробленні інструкцій, зокрема на основі нормативно правових актів з охорони праці, забезпечення якими підрозділів покладено на службу;

- реєструє інструкції, що вводяться в дію (переглядаються) в журналі реєстрації інструкцій з охорони праці на підприємстві;

- видає примірники інструкцій керівникам структурних підрозділів (служб) з реєстрацією в журналі обліку видачі інструкцій з охорони праці на підприємстві;

- систематично контролює своєчасність розроблення нових і відповідність чинних інструкцій вимогам законодавства, періодичність перегляду та своєчасність внесення змін і доповнень до них;

- забезпечує підрозділи стандартами, іншими нормативно-технічними та організаційно-методичними документами з охорони праці.

7. Інформування працівників про основні вимоги законів, інших нормативно-правових актів та актів з охорони праці, що діють в межах підприємства.

8. Розгляд:

- питань про підтвердження наявності небезпечної виробничої ситуації, що стала причиною відмови працівника від виконання дорученої роботи відповідно до законодавства (у разі необхідності);

- листів, заяв, скарг працівників підприємства, що стосуються питань додержання законодавства про охорону праці.

9. Організація:

- забезпечення підрозділів нормативно-правовими актами з охорони праці та актами з охорони праці, що діють в межах підприємства, посібниками, навчальними матеріалами з цих питань;

- роботи кабінету з охорони праці, підготовки інформаційних стендів, кутків з охорони праці тощо;

- нарад, семінарів, конкурсів тощо з питань охорони праці;

- пропаганди з питань охорони праці з використанням інформаційних засобів.

10. Участь у:

- розслідуванні нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві;
- складанні санітарно-гігієнічної характеристики умов праці працівників, які проходять обстеження щодо наявності професійних захворювань (отруєнь);
- проведенні внутрішнього аудиту охорони праці та атестації робочих місць за умовами праці;
- роботі комісій з приймання в експлуатацію закінчених будівництвом, реконструкцією або технічним переозброєнням об'єктів виробничого та соціально-культурного призначення, відремонтованого або модернізованого устаткування в частині дотримання вимог охорони (безпеки) праці;
- розробленні положень, інструкцій, розділу «Охорона праці» колективного договору, інших актів з охорони (безпеки) праці, що діють у межах підприємства;
- складанні переліків професій і посад, згідно з якими працівники повинні проходити обов'язкові попередні і періодичні медичні огляди;
- організації навчання з питань охорони праці; роботі комісії з перевірки знань з питань охорони праці.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

5.1 Обґрунтування економічної ефективності використання системи сліdkуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції

Обґрунтування економічної ефективності використання системи сліdkуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції полягає в визначенні вартості електроенергії, яку виробляє установка протягом кожного місяця впродовж року за зеленим тарифом. Для цього потрібно оцінити кількість електроенергії, що генерується за допомогою системи сліdkуючого електропривода та порівняти її з традиційними методами встановлення сонячних панелей (без трекерних систем або з фіксованим кутом). Після цього можна розрахувати доходи, отримані від продажу цієї електроенергії за зеленим тарифом і визначити, як система відстеження сонячного випромінювання впливає на загальну економічну ефективність проекту, включаючи скорочення терміну окупності інвестицій.

Розташування сонячних панелей із використанням трекерних систем із фіксованим кутом. Для досягнення максимальної генерації електроенергії найефективнішим рішенням є застосування фотомодулів, оснащених сліdkуючими (трекерними) системами (рис. 5.1). Такі системи збільшують оптичний потік, що надходить на поверхню сонячних панелей, що дозволяє максимально ефективно використовувати їх енергетичний потенціал. Аналіз експериментальних даних показав, що сліdkуючі системи генерують майже на 24% більше електроенергії порівняно зі стаціонарною установкою фотомодулів із фіксованим кутом. Це дозволяє максимально ефективно використовувати енергетичний потенціал сонячних панелей та водночас скорочує термін їх окупності з економічної точки зору.

Запропонована конструкція є недорогою, надійною та дозволяє за допомогою відповідного алгоритму точно орієнтувати панелі на сонце за двома осями – за кутом місця та азимутом.

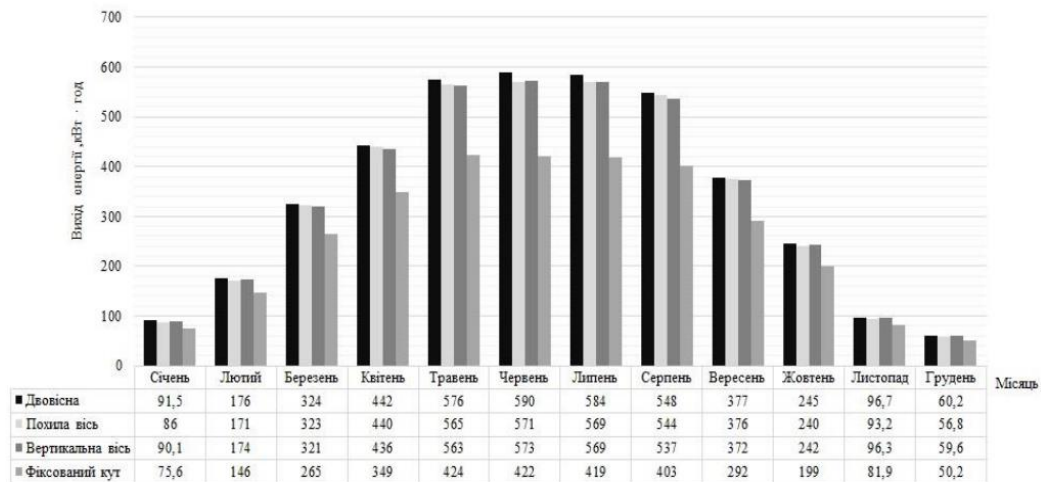


Рисунок 5.1 – Продуктивність сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

На основі зібраних даних можна визначити термін окупності інвестицій шляхом оптимізації виробництва електроенергії за допомогою системи слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції на основі зеленого тарифу:

$$T_{ок} = \frac{C_{ел}}{E_{ел}} = \frac{5,77}{590} = 0,0098 \text{ р.} \quad (5.1)$$

де $E_{ел}$ – кількість електроенергії, що виробляє сонячна панель впродовж року, кВт·год.; $C_{ел}$ – ціна 1 кВт·год. електроенергії за зеленим тарифом, грн.

Згідно із зеленим тарифом, що становить 5,77 грн/кВт·год на 2025 р., виробники електричної енергії, що використовують сонячні панелі, можуть продавати надлишки електричної енергії в мережу за підвищеними ставками. Це сприяє економічним вигодам для інвесторів, стимулюючи розширення використання відновлювальних джерел енергії. Тариф може змінюватися в залежності від типу джерела енергії, потужності установки, а також року введення в експлуатацію. Отже, термін окупності буде рівний 0,0098 року.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Було проведено дослідження ефективності одноосьового трекінгу та стаціонарних сонячних панелей, з якого можна зробити кілька важливих висновків:

1. Одноосьовий трекер виявляється ефективнішим за стаціонарні панелі лише до та після полудня.
2. В обідній час обидві панелі демонструють схожі рівні виробленої електричної енергії.
3. Протягом дня одноосьовий трекер генерує більше енергії, ніж стаціонарна панель, що вказує на більш ефективне використання доступного сонячного випромінювання та зменшення терміну окупності початкових інвестицій.

В наступному дослідженні пропонується порівняти ефективність системи подвійного осьового трекінгу з одноосьовим трекінгом. В рамках цього дослідження було успішно застосовано систему подвійного осьового трекера з сенсором LDR, який контролюється Arduino Mega 2560 і двома серводвигунами на осях X та Y для сонячної панелі потужністю 20 Вт. Використання подвійних осьових трекерів в PLTS (системах сонячної енергії з фіксованими панелями) має потенціал значно збільшити вироблену потужність у порівнянні з традиційними статичними панелями. Оптимізація струму, напруги та потужності, а також досягнення максимальної потужності швидше дозволяє підвищити ефективність і продуктивність сонячної енергії. За результатами експериментів з подвійним осьовим трекером різниця в енергії досягала 83% протягом 8 годин тестування, що свідчить про більшу ефективність такого трекера в порівнянні з статичними панелями.

Використання сонячних трекерів дозволяє максимально збільшити кількість зібраної енергії, забезпечуючи правильне вирівнювання панелей по нормалі до сонячного випромінювання. У цьому контексті було проаналізовано різні методи відстеження Сонця. Зокрема, відкриті трекери є простішими, дешевшими у обслуговуванні та надійнішими, хоча їх ефективність може бути

нижчою через відсутність зворотного зв'язку. Закриті трекери, в свою чергу, забезпечують вищу ефективність за рахунок наявності механізму зворотного зв'язку, але є дорожчими і складнішими в управлінні.

Для систем із концентрованими сонячними панелями та сонячними вежами потрібна висока точність, в той час як для плоских панелей достатньо точності в межах 10 градусів, що дозволяє забезпечити 98% ефективності. Система одноосьового трекера є оптимальним варіантом для плоских сонячних панелей, тоді як для концентрованих систем подвійний осьовий трекер забезпечує значно більшу кількість виробленої енергії.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
5. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
6. Маляренко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
7. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
8. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
9. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>
10. https://cooperhunter-aircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKGa0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqmlEALw_wcB
11. R. K. Sarojini, K. Palanisamy and E. De Tuglie, "A fuzzy logic- based emulated inertia control to a supercapacitor system to improve inertia in a low inertia grid with renewables," *En- ergies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.

12. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, "Ultimate trans- formerless boost DC-DC converter for renewable energy applications," *SVU-International Journal of Engineering Sci-ences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
13. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhles, "A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation," *Energies*, Vol. 13, №. 3, P. 755, 2020.
14. V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, and O. Savenko, "Bidirectional single stage isolated DC-AC converter," in *Proceedings of the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, PP. 343–346, IEEE, Kharkiv,Ukraine, 2020, October.
15. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, "Modelling and analysis of PV standalone system with energy manage- ment scheme," in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.