

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

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ»**

Виконав: студент 6-го курсу

групи Ен-62 із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

_____ Клуб Б. Р. _____

Керівник: _____ к.т.н., доцент Коробка С. В.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

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**

Клубу Богдану Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення рівня енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

керівник роботи: к.т.н., доцент Коробка С. В.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського національного університету природокористування №140 к-с від 28.02.2025 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 05.12.2025 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 енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

4.2. Розрахунок системи сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

4.3 Розробка системи енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

4.4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

4.5. Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

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

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	Городецький І. М. к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем</i>	28.02.2025 – 22.09.2025	
2	<i>Розрахунок системи сонячних панелей із застосуванням трекерних систем</i>	23.09.2025 – 29.09.2025	
3	<i>Розробка системи сонячних панелей із застосуванням трекерних систем</i>	03.10.2025 – 13.10.2025	
4	<i>Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях</i>	14.10.2025 – 24.10.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем</i>	27.10.2025 – 07.11.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	10.11.25 – 17.11.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	21.11.25 – 05.12.25	

Студент _____ Богдан КЛУБ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Сергій КОРОБКА
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 631.3.45.9

Клуб Б. Р. «Підвищення рівня енергоефективності функціонування сонячних панелей із застосуванням трекерних систем». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2026 р. 52 с. текстової частини, 15 таблиць, 16 рисунків, 25 джерел посилання.

Системи енергозабезпечення із застосуванням трекерних систем розглянуто питання підвищення енергоефективності сонячних панелей шляхом застосування трекерних систем. Проведено аналіз принципів роботи та класифікації трекерів, визначено їхній вплив на ефективність фотоелектричних установок. Виконано порівняння роботи сонячних панелей із фіксованим нахилом та з використанням трекерних систем, наведено розрахунки очікуваного приросту генерації електроенергії. Обґрунтовано доцільність впровадження трекерних систем для підвищення продуктивності сонячних електростанцій..

СОНЯЧНА ЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, СИСТЕМА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ОДНОВІСНІ, ДВОВІСНІ ТРЕКЕРНІ СИСТЕМИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ.....	9
1.1 Сучасний стан розвитку сонячної енергетики та використання трекерних систем.....	9
1.2 Принципи роботи та класифікація трекерів.....	9
1.3 Фактори, що впливають на енергоефективність сонячних панелей	10
1.4 Порівняльний аналіз ефективності роботи панелей із фіксованим нахилом та з трекерами.....	10
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ.....	12
2.1 Теорія світлового датчика та схема використаного сенсора.....	12
2.2 Теорія матеріали та методи розрахунок системи сонячних панелей із застосуванням трекерних систем.....	14
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ.....	23
3.1 Проєктування та виготовлення електромеханічної трекерної системи.....	23
3.2 Механічна конструкція електромеханічної трекерної системи.....	24
3.3 Проєктування та реалізація модуля керування електромеханічної трекерної системи.....	25
3.4 Результати дослідження експериментальної електромеханічної трекерної системи.....	30
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРА. ЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ.....	38
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	38
4.2 Протипожежна безпека і грозозахист.....	39
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ	

	ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ.....	40
5.1	Обґрунтування економічної ефективності використання сонячних панелей із застосуванням трекерних систем.....	40
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	43
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	45

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики значною мірою зумовлений потребою у зменшенні залежності від викопних палив, зниженні викидів парникових газів та підвищенні енергоефективності. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання відновлюваних джерел енергії, серед яких провідне місце займає сонячна енергетика. Фотоелектричні системи активно впроваджуються у промисловості та приватному секторі, забезпечуючи екологічно чисте електропостачання.

Проте ефективність роботи сонячних панелей значною мірою залежить від інтенсивності сонячного випромінювання та кута його падіння на поверхню фотомодулів. Використання фіксованих конструкцій обмежує можливості максимальної генерації електроенергії протягом доби та року. Для підвищення продуктивності систем у практиці застосовуються сонячні трекери – спеціальні механізми, що автоматично змінюють положення панелей відносно Сонця.

Завдяки використанню трекерних систем можливе підвищення виробітку електроенергії на 15–40% залежно від умов експлуатації та типу конструкції. Це дозволяє більш ефективно використовувати площу встановлення, зменшити термін окупності проекту та підвищити загальну економічну доцільність застосування сонячних електростанцій.

Актуальність теми полягає у необхідності пошуку технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності роботи фотоелектричних систем, оптимізацію їхньої конструкції та впровадження інноваційних технологій у сфері відновлюваної енергетики.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідити можливості підвищення рівня енергоефективності функціонування сонячних панелей шляхом застосування трекерних систем, проаналізувати їх вплив на виробіток електроенергії та обґрунтувати доцільність впровадження у сучасних фотоелектричних установках.

Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану використання сонячних фотоелектричних систем та трекерних технологій;
2. Дослідити принципи роботи сонячних трекерів та їх класифікацію (одновісні, двовісні);
3. Розрахувати очікуваний приріст генерації електроенергії при застосуванні трекера у вибраних умовах;
4. Здійснити огляд охорони праці та довкілля;
5. Обґрунтувати економічну доцільність використання трекерних систем у фотоелектричних установках.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є енергоефективності функціонування сонячних панелей шляхом застосування трекерних систем,

Предметом кваліфікаційної роботи є функціонування сонячних панелей шляхом застосування трекерних систем та їх вплив на виробіток електроенергії.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ

1.1. Сучасний стан розвитку сонячної енергетики та використання трекерних систем

Сонячна енергетика є однією з найперспективніших галузей відновлюваної енергетики, що забезпечує виробництво електроенергії з екологічно чистого джерела. У світі зростає кількість як великих сонячних електростанцій (СЕС), так і мікроустановок для приватних домогосподарств. В останні роки особливу увагу приділяють підвищенню ефективності фотоелектричних систем, серед яких застосування трекерних механізмів є одним із ключових напрямів.

Трекери дозволяють панелям слідувати за Сонцем упродовж доби, підтримуючи оптимальний кут падіння сонячних променів на поверхню модулів. Завдяки цьому підвищується добовий та річний обсяг виробленої електроенергії, що особливо актуально у регіонах із нерівномірним розподілом сонячного випромінювання протягом року.

1.2. Принципи роботи та класифікація трекерів

Трекери поділяють на одновісні та двовісні залежно від кількості осей обертання:

Одновісні трекери змінюють положення панелей за однією віссю (зазвичай схід-захід), що дозволяє збільшити виробіток електроенергії на 15–25% порівняно з фіксованою установкою.

Двовісні трекери регулюють кут панелей за двома осями (азимут та висота), що дає максимальну генерацію – до 35–40% більше, ніж у фіксованих системах.

Трекери можуть бути механічними (ручне або напівавтоматичне регулювання) та автоматичними (за допомогою датчиків освітленості та програмованих контролерів). Сучасні системи часто інтегруються із сонячними батареями, контролерами та інверторами для оптимізації виробітку електроенергії та захисту обладнання від перевантажень.

1.3. Фактори, що впливають на енергоефективність сонячних панелей

Енергоефективність фотоелектричних систем залежить від кількох основних факторів:

Кут нахилу та орієнтація панелей – оптимальне положення забезпечує максимальне поглинання сонячного випромінювання протягом року.

Інтенсивність сонячного випромінювання та кліматичні умови – хмарність, температура повітря, атмосферна прозорість та географічне розташування впливають на виробіток електроенергії.

Забруднення та пил на поверхні панелей – зменшують ефективність поглинання сонячної енергії.

Температурний режим панелей – підвищення температури знижує ККД фотоелектричних модулів, тому деякі системи використовують охолодження або вентиляцію.

1.4. Порівняльний аналіз ефективності роботи панелей із фіксованим нахилом та з трекерами

Дослідження показують, що застосування трекерних систем забезпечує значний приріст виробітку електроенергії:

Панелі з фіксованим нахилом за рік генерують енергії на 15–30% менше, ніж панелі з трекером, залежно від регіону та кліматичних умов.

Одновісні трекери підвищують добовий та річний обсяг електроенергії на 15 – 25%.

Двовісні трекери забезпечують максимальне використання сонячного потенціалу та можуть збільшити виробіток на 35 – 40% порівняно з фіксованими системами.

Для більш точної оцінки ефективності застосовують моделювання та експериментальні вимірювання, враховуючи зміну кута Сонця, тривалість дня та погодні умови.

Впровадження трекерів підвищує первісну вартість сонячної електростанції, але водночас скорочує термін окупності завдяки збільшенню генерації електроенергії.

Отже, впровадження трекерних систем є доцільним у регіонах із високою сонячною активністю та для великих сонячних електростанцій, де економічна вигода від підвищеного виробітку перевищує витрати на обладнання та обслуговування.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ

2.1. Теорія світлового датчика та схема використаного сенсора

Світлочутливі датчики, які можуть застосовуватися для побудови сонячного трекера, включають: фототранзистори, фотодіоди, LDR та лінійний світловий сенсор (LLS05). Найбільш підходящим, недорогим, простим у використанні та легким для підключення фотодатчиком є аналоговий LDR, який є найпоширенішим в електроніці. Зазвичай він має вигляд фоторезистора, виготовленого з сульфіду кадмію (CdS) або арсеніду галію (GaAs). Наступним за складністю є фотодіод, а після нього – фототранзистор.

Більшість комерційно доступних сонячних елементів мають ККД у межах 10–20 %, що свідчить про наявність значних можливостей для вдосконалення. У даній роботі розглянуто підхід до підвищення ефективності роботи сонячних панелей шляхом використання системи сонячного стеження (трекінгу). Механізм трекера орієнтує та переміщує сонячну батарею так, щоб вона займала положення з максимальним вихідним потоком потужності. Іншими напрямками підвищення ефективності є виявлення джерел втрат та їх мінімізація.

Енергетика є ключовим фактором розвитку будь-якої країни. Щодня у світі видобувається, транспортується, перетворюється та споживається величезна кількість енергії. Близько 85 % загального обсягу виробництва забезпечується за рахунок викопного палива, ресурси якого обмежені. Його використання супроводжується глобальним потеплінням через викиди парникових газів. Тому зростає потреба у відновлюваних джерелах енергії, таких як сонячна, вітрова, геотермальна та енергія морських припливів і хвиль.

Сонячні панелі безпосередньо перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію. Основним матеріалом для їх виготовлення є напівпровідники, переважно кремній. Найвищий зафіксований ККД

комерційних зразків сягає 24,5 %. Існують три основні шляхи підвищення ефективності панелей: вдосконалення самих сонячних елементів, максимізація вихідної потужності та використання систем стеження.

Технологія відстеження точки максимальної потужності (MPPT) дозволяє підтримувати роботу панелі в області коліна на її вольт-амперній характеристиці, забезпечуючи максимальний відбір потужності у фіксованому положенні батареї. Проте вона не здатна компенсувати зниження генерації, коли Сонце не співпадає з орієнтацією панелі.

Сонячне стеження передбачає механізоване переміщення панелей за траєкторією руху Сонця, що дозволяє підвищити виробіток енергії на 30–60 % порівняно зі стаціонарними системами. Це економічно вигідніше, ніж збільшення кількості сонячних панелей. Існують різні типи трекерів. Найефективнішими є двоосьові системи, які відстежують Сонце у двох площинах, але вони складніші за конструкцією. Вони особливо доцільні в регіонах, де кут падіння сонячного світла істотно змінюється протягом року. Одноосьові трекери доцільніше застосовувати у зонах поблизу екватора, де сезонні зміни положення Сонця незначні.

Рівень підвищення ефективності залежить від точності роботи трекера та погодних умов. Найбільший ефект спостерігається за сонячної погоди, коли трекер може з високою точністю орієнтувати панелі. Численні дослідження, присвячені системам сонячного трекінгу, наведені у [1–6].

Мета цієї роботи полягає у забезпеченні падіння сонячних променів перпендикулярно до площини панелі для досягнення максимальної генерації. Найвищий рівень енергії спостерігається в період з 12:00 до 14:00, з піком близько полудня, коли Сонце перебуває у зеніті. У цей час також потрібні мінімальні переміщення панелі, що додатково підвищує ефективність.

У статті розглянуто реалізацію малопотужної, точної та економічної системи сонячного трекінгу на основі мікроконтролера, створеної в межах визначених часових та ресурсних обмежень. Система відстежує рух Сонця на небосхилі, а для економії енергії переходить у горизонтальне положення вночі.

Алгоритм керування електроприводом реалізований у вигляді програми мовою C в середовищі Arduino IDE.

2.2. Теорія матеріали та методи розрахунків системи сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

Методологія розробки системи сонячного трекера була структурована в кілька етапів, кожен з яких охоплював критично важливий аспект проєктування та реалізації системи. Етапи були такими:

Етап 1: Вивчення рівнянь визначення положення Сонця

На початковому етапі було проведено ґрунтовне дослідження рівнянь сонячного позиціонування, які є основою для розрахунку положення Сонця залежно від дати, часу та географічного розташування. Цей крок особливо важливий у тропічному кліматі, де кут падіння сонячних променів може істотно змінюватися протягом дня та в різні пори року. Розуміння цих рівнянь дає змогу оптимізувати роботу системи відстеження, забезпечуючи оптимальну орієнтацію фотоелектричної панелі для захоплення максимально можливої кількості сонячної радіації.

Етап 2: Проєктування та виготовлення механічної частини сонячного трекера

На другому етапі проєктування та виготовлення сонячного трекера було ретельно підібрано виконавчі механізми та системи передавання руху, щоб забезпечити ефективну та точну роботу системи. Виконавчі механізми відіграють ключову роль у переміщенні фотоелектричної панелі, дозволяючи їй орієнтуватися у двох ступенях свободи: за азимутом (горизонтальна орієнтація) та за висотою Сонця (нахил). Зокрема, були обрані сервоприводи DFS10G-05 (Tuff Automation, Grand Rapids, MI, USA) завдяки їхній низькій вартості, енергоефективності та наявності енкодерів, що необхідні для точного вимірювання положення панелі під час руху [19].

Енкодери, встановлені у цих приводах, забезпечують точну інформацію про кутове положення панелі в режимі реального часу. Вони є критично важливими для підтримки панелі в напрямку Сонця протягом дня. Обертові енкодери, що застосовуються в моторах, дозволяють точно зчитувати положення панелі, забезпечуючи необхідні корекції як у русі за азимутом, так і за висотою.

Для передавання руху було використано черв'ячні редуктори, обрані за їх здатність «блокувати» переміщення, коли кут зачеплення вінця і гвинта наближається до 90° . Ця особливість важлива для фіксації сонячної панелі у заданому положенні без необхідності постійного живлення приводів. Передатне число обраних редукторів забезпечує низькі вихідні швидкості – приблизно 0,05 об/хв для руху за азимутом і 0,2 об/хв для нахилу, що є оптимальним для ефективного відстеження без надмірного енергоспоживання.

Для передачі руху на базову вісь опори фотоелектричної панелі було застосовано ланцюгово-зубчастий механізм із передатним відношенням 1:1, що відзначається довговічністю та низькою вартістю. У поєднанні з обраними приводами цей механізм забезпечує точний і надійний контроль руху сонячної панелі, максимізуючи захоплення енергії за різних погодних умов.

Етап 3: Реалізація системи керування

Після завершення механічної частини було розроблено та впроваджено систему керування. Цей етап включає програмування мікропроцесора (наприклад, Intel Edison), який виконує алгоритм керування на основі рівнянь сонячного позиціонування. Впровадження ефективної системи керування є критично важливим для точного регулювання нахилу та орієнтації панелі, реагуючи на зміни положення Сонця протягом дня. Правильний вибір системи керування гарантує ефективну роботу сонячного трекера та максимізацію захоплення енергії.

Етап 4: Інтеграція та випробування системи

Останній етап включав інтеграцію всіх компонентів та проведення випробувань у реальних умовах. На цьому етапі відстежувалась робота

системи, вимірювалася миттєва потужність, що генерується фотоелектричною панеллю у різний час доби. Результати роботи активного трекера порівнювали зі статичною панеллю для оцінки ефективності системи. Випробування були необхідними для валідації проєкту та внесення змін для підвищення продуктивності й надійності.

Розрахунок положення Сонця здійснюється відносно наземної позиції за допомогою астрономічних рівнянь сонячного позиціонування. Необхідні дані для цих обчислень – це дата, час, часовий пояс та географічні координати (широта й довгота) спостерігача. Сонячні трекери використовують сенсори для визначення положення, у якому захоплюється найбільша кількість сонячної радіації. Для цього застосовують фотоелементи чи фотодетектори у матричному розташуванні, що визначають різницю в інтенсивності отриманої радіації, або промислові сенсори, які вимірюють кут падіння сонячних променів і передають цифровий сигнал про положення Сонця.

Деякі трекери використовують методи цифрової обробки зображень для позиціонування панелі перпендикулярно до сонячних променів. На відміну від таких систем, астрономічні методи (сонячні карти, рівняння позиціонування) обчислюють кутове положення Сонця (азимут і висоту) на основі широти, довготи, дати, часу й часового поясу, які можуть задаватися вручну або визначатися за допомогою GPS.

Щодо апаратного забезпечення, то для керування виконавчими механізмами часто застосовуються мікроконтролери, ПЛК (програмовані логічні контролери) та FPGA. Вони можуть працювати з релейним ON/OFF-керуванням, цифровими PID-регуляторами, а також з використанням методів оптимізації, нейронних мереж або вбудованих систем.

Експериментальний зразок був розроблений у кілька етапів. На першому етапі виготовили механічну частину та опори для фотоелектричної панелі, передбачили захисний бокс для електронних схем і обрали мотор-редуктори DFS10G-05. Установка була спроектована для підтримки й переміщення фотоелектричної панелі UPSOLAR потужністю 250 Вт і масою 18,5 кг у двох

ступенях свободи: за висотою Сонця (нахил) з робочим діапазоном 40° – 120° та за азимутом (орієнтація) з діапазоном 360° .

На другому етапі провели дослідження найбільш доцільного підходу для тропічного клімату, де було обрано режим роботи у відкритому контурі через кліматичні умови міста Букараманга. Запропонований підхід використовує алгоритм відстеження чи керування для азимутального положення, а кут підйому Сонця визначається алгоритмами сонячного руху відповідно до дати, часу та географічних координат.

На третьому етапі для керування й програмування азимутального та висотного положення було обрано мікропроцесор Intel Edison. Алгоритм керування виконувався під операційною системою Linux Yocto з увімкненим WiFi-протоколом для навчальної підтримки.

На четвертому етапі було обрано два лінійні резистори (по одному для кожного руху) для визначення реального положення трекера відносно висоти й азимуту. Випробування проводилися з 9:00 до 16:00, під час яких кожні 30 хв вимірювали миттєву потужність, що генерується сонячним трекером і статичною панеллю, розташованою приблизно на 7° у напрямку екватора. Результати порівняння показали, що активний трекер забезпечує вищу ефективність, ніж статична панель.

3. Етап 1: Розрахунок положення Сонця

На цьому етапі основна увага приділялася визначенню положення Сонця з використанням відповідних рівнянь. Два ключові параметри для сонячного трекера – це положення за висотою та за азимутом [20–22].

Розрахунок положення Сонця

Відносне положення Сонця щодо спостерігача на Землі може бути визначене за допомогою рівнянь сонячного позиціонування. Ці обчислення залежать від таких параметрів, як дата, час, часовий пояс, широта та довгота спостерігача. Етапи та рівняння, необхідні для цього процесу, наведені нижче.

Частка року, що минула

Першим кроком є розрахунок частки року, що вже минула, яка позначається кутом γ (у радіанах). Це обчислюється за допомогою наступного рівняння:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left(day - 1 + \frac{hour - 12}{24} \right) \quad (2.1)$$

де day – день року (від 1 до 365); $hour$ – місцевий час у годинах.

Параметр γ має ключове значення для подальших розрахунків, оскільки він відображає положення Землі на орбіті навколо Сонця у визначену дату й час.

Рівняння часу

Різниця між середнім сонячним часом (MST) та істинним сонячним часом (AST) описується рівнянням часу. Ця невідповідність виникає через еліптичну форму орбіти Землі та нахил її осі. Рівняння часу визначається наступною залежністю:

$$EQ \text{ time} = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \gamma - 0.032077 \sin \gamma - 0.014615 \cos(2\gamma) - 0.040849 \sin(2\gamma)) \quad (2.2)$$

Одновісний полярно-поворотний пристрій забезпечує режим синхронного стеження за Сонце обертанням приймача з кутовою швидкістю $\omega=15$ град/год навколо нахиленої осі, паралельній земній (полярній). Причому площина стеження може бути як суміщеною з віссю обертання, так і відхиленою від неї на довільний кут $\Delta\phi$.

Наведена на рис. 2.1 схема відповідає конструктивному варіанту суміщення осі обертання з площиною стеження, а умови її освітлення – рівноденню, коли $\delta=0$ і траєкторія Сонця збігається з небесним екватором.

Нормаль поверхні стеження n перетинає небесну сферу синхронно з Сонцем за такою ж траєкторією. Поворот поверхні стеження на схемі відповідає довільному моменту часу між сходом Сонця і полуднем, коли її нижня кромка перетинає площину горизонту вздовж пунктирної лінії. Натомість у полудень, нахилена поверхня перетинає горизонтальну площину вздовж напрямку «схід-захід», а у моменти сходу і заходу Сонця – «північ-південь». Нормаль поверхні

стеження на момент сходу Сонця позначено як n_E , у полудень як $n(0)$, а у проміжку між ними – залежною від часу величиною $n(\tau)$. У полудень умови її оптимального освітлення аналогічні для нахиленої поверхні південної орієнтації.

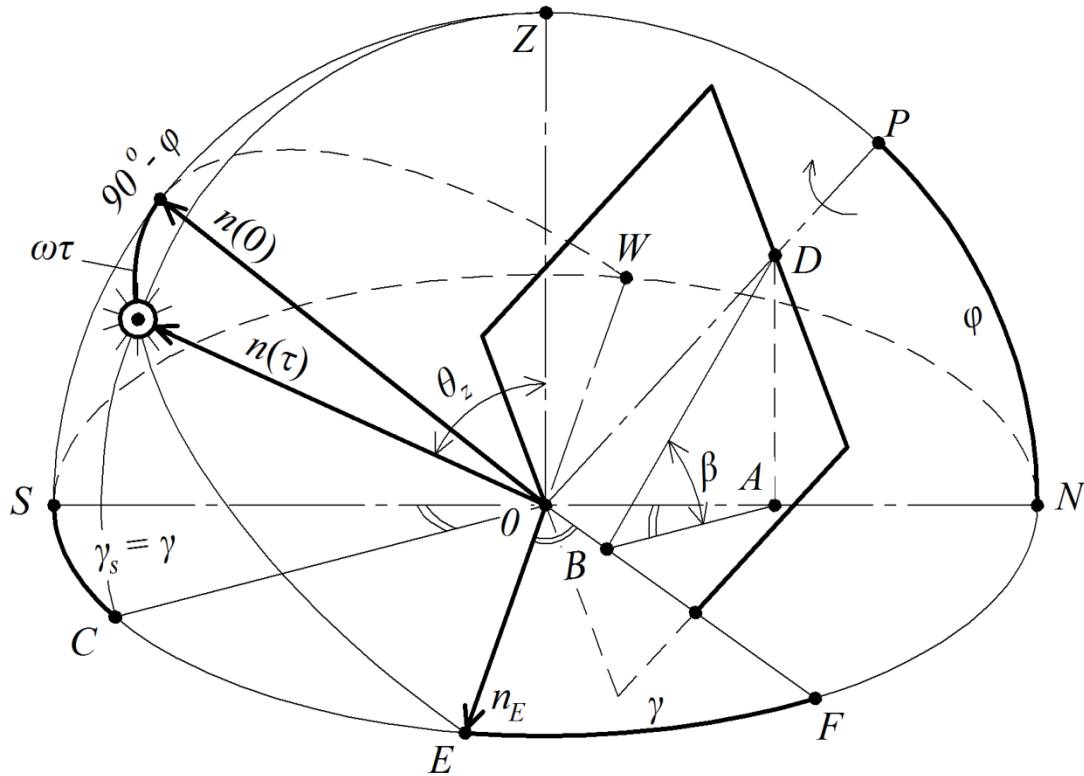


Рисунок 2.1 – Схема освітлення поверхні стеження полярно-поворотного пристрою, суміщеної з віссю обертання під час рівнодення

$$\gamma(\tau=0) = \gamma_s(\tau=0) = 0; \theta(\tau=0) = 0; \beta(\tau=0) = \varphi; \quad (2.3)$$

Режим синхронного стеження за Сонцем з рівним нулю значенням кута освітлення $\theta(\tau) = 0$ виконується за таких додаткових умов:

$$\gamma(\tau) = \gamma_s(\tau); \beta(\tau) = \theta_z(\tau) \quad (2.4)$$

Поточні значення цих кутових величин розраховують за формулами (2.4), які під час рівнодення зводяться до такого виду:

$$\cos \gamma_s(\tau) = \frac{\cos \theta_z(\tau) \sin \varphi}{\sin \theta_z(\tau) \cos \varphi} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \theta_z(\tau)} \quad (2.6)$$

$$\cos \beta(\tau) = \cos \theta_z(\tau) = \cos \varphi \cdot \cos \omega t \quad (2.7)$$

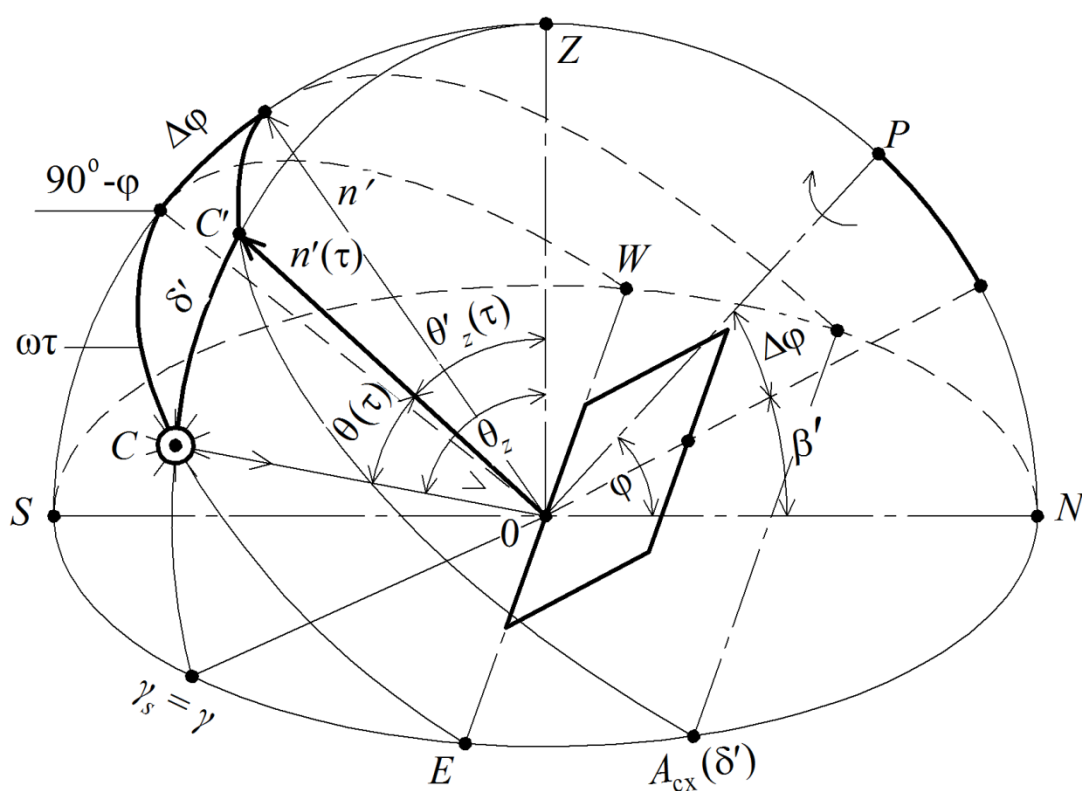
$$\operatorname{tg} \beta(\tau) = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \gamma(\tau)}. \quad (2.8)$$


Рисунок 2.2 – Схема освітлення поверхні стеження, відхиленої від осі
обертання полярно-поворотного пристрою під час рівнодення

20

момент сонячного полудня, коли новий кут її нахилу $\beta' = \varphi - \Delta\varphi$, нормаль якої n' перебуває у площині OZS місцевого меридіану з кутовим зміщенням на такий же кут $\delta' = \Delta\varphi$. Денна траєкторія цієї нормалі небосхилом аналогічна фіктивній траєкторії Сонця на станом на поточний день року з порядковим номером n' і відповідним йому значеннями схилення $\delta'(n')$ при яких кут поточний кут освітлення зміщеної поверхні стеження $\theta'(\tau)$ задовольняє умові

$$\beta'(\tau) = \theta'_z(\tau) \quad (2.9)$$

Завдяки наведеним вище співвідношенням, розрахунок $\beta'(\tau)$ найпростіше виконати за формулою (2.9), з заміною сонячного схилення на кут відхилення

$$\delta'(n') = \Delta\varphi:$$

$$\cos \beta'(\tau) = \cos \theta'_z(\tau) = \sin \varphi \cdot \sin \Delta\varphi + \cos \varphi \cdot \cos \Delta\varphi \cdot \cos \omega\tau = a + b \cos \omega\tau, \quad (2.10)$$

Таким чином, з врахуванням умови (2.10), поточний кут освітлення рівний

$$\theta(\tau) = |\beta(\tau) - \beta'(\tau)| \quad (2.11)$$

За умови щоденного коригування кута відхилення $\Delta\varphi$, одновісний полярно поворотний пристрій забезпечує найпростіший для реалізації синхронний режим стеження за Сонцем протягом усього року. Пристрій з таким алгоритм стеження менш енергозатратний порівняно з двовісним поворотним механізмом, оснащеним фотоелектричною системою неперервного наведення на Сонце.

Сонячний азимут β – це кут, виміряний за годинниковою стрілкою від істинної півночі до проєкції Сонця на горизонтальну площину. Він визначається за формулою:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\sin(\text{latitude}) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\delta)}{\cos(\text{latitude}) \cdot \sin(\alpha)} \right) + 180, \omega \geq 0 \quad (2.12)$$

$$\beta = -\cos^{-1} \left(\frac{\sin(\text{latitude}) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\delta)}{\cos(\text{latitude}) \cdot \sin(\alpha)} \right) + 540, \omega \geq 0 \quad (2.13)$$

де δ – сонячна деклінація; φ – географічна широта спостерігача; ω – годинний кут; h – висота Сонця над горизонтом.

Корекція азимута залежить від положення Сонця відносно полудня:

для $\omega > 0$ (Сонце на заході): $\beta = 360^\circ - \beta$,

для $\omega < 0$ (Сонце на сході): β використовується без змін.

Якщо бажаєш, я можу зробити короткий висновок по всьому розділу про розрахунок положення Сонця, як ми робили раніше.

Отже, було детально розглянуто методику визначення просторового положення Сонця відносно спостерігача на Землі. Розраховано ключові параметри, що мають вирішальне значення для роботи системи двовісного сонячного трекера, а саме: рівняння часу, сонячна деклінація, відносна відстань Земля–Сонце, істинний сонячний час, годинний кут, висота та азимут Сонця. Отримані залежності дозволяють точно визначати положення Сонця у будь-який момент часу з урахуванням географічних координат і календарної дати. Це створює необхідну основу для подальшого формування алгоритмів управління трекерною системою та забезпечення максимальної ефективності роботи фотоелектричних панелей.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ

3.1 Проєктування та виготовлення електромеханічної трекерної системи

Другий етап був зосереджений на проєктуванні та виготовленні електромеханічної системи для пристрою сонячного трекінгу, що базується на характеристиках фотомодулів *Upsolar UP-M250P*, які складаються з 60 полікристалічних кремнієвих елементів. Система спроектована таким чином, щоб забезпечувати два ступені свободи – азимут і висоту Сонця – для максимального збору падаючого сонячного випромінювання [23].

Попередній ескіз механічної трансмісійної системи було створено в програмному середовищі *SolidWorks* (рис. 3.1), де відображено ключові компоненти, що беруть участь у русі фотомодуля. Ця конструкція включає інтеграцію приводів, шестерень і конструктивних елементів, необхідних для досягнення потрібних ступенів свободи – азимуту та висоти Сонця. Модель у *SolidWorks* дає чітке уявлення про функціонування трансмісійної системи для забезпечення точного відстеження сонячного випромінювання.

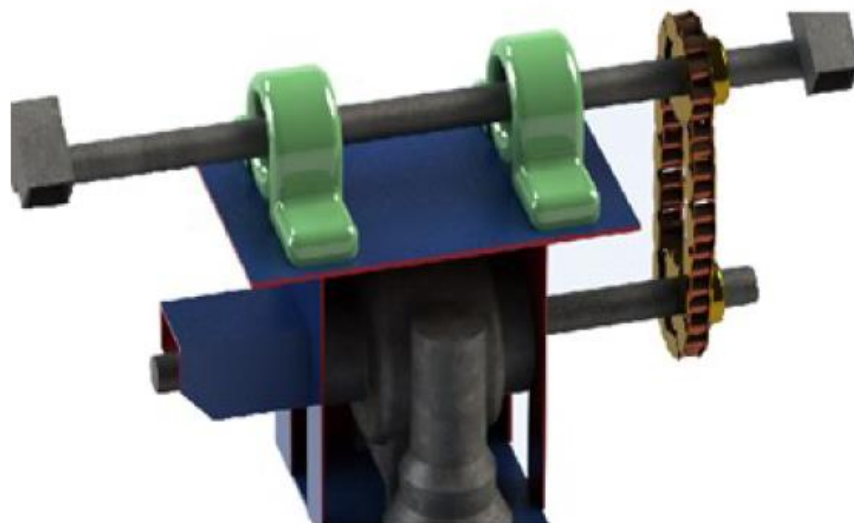


Рисунок 3.1 – Ескіз механічної трансмісійної системи, створений у *SolidWorks*

3.2 Механічна конструкція електромеханічної трекерної системи

Сонячна панель була закріплена на Н-подібній опорі, виготовленій з металевих кутиків перерізом 1 дюйм, що забезпечує необхідну стійкість під час руху (Рис. 3.2). Для захисту контрольної схеми та приводів була виготовлена захисна основа зі сталі, яка являє собою кубічну конструкцію з 4-мм сталевих листів. Ця основа також забезпечує рух в азимутальній площині, оскільки вміщує необхідні механічні компоненти, одночасно дозволяючи проходження повітря завдяки вирізам у конструкції.

Система приводу. Для керування рухом панелі за азимутом і висотою Сонця були обрані редукторні двигуни *DFS10G-05* завдяки їх низькому енергоспоживанню та вбудованим енкодерам. Ці приводи забезпечують рух панелі, дозволяючи точно контролювати обидва ступені свободи без надмірних витрат енергії, що є критично важливим для ефективності системи [19].

Поворотні вузли та трансмісійна система. З огляду на високу номінальну швидкість приводів, було застосовано редуктори для зниження робочої швидкості до оптимальних рівнів для системи сонячного трекінгу. Ці редуктори забезпечують плавні й повільні рухи, які узгоджують положення панелі із сонцем протягом дня. Для передавання руху до опори сонячної висоти було реалізовано механізм із використанням зубчастих шківів та ланцюгово-зірочкової системи. Така передача забезпечує стабільний і надійний рух під час нахилу панелі впродовж дня.



Рисунок 3.2 – Механічний вузол зібраний та встановлений

3.3 Проєктування та реалізація модуля керування електромеханічної трекерної системи

Вибір апаратної платформи. Для проєктування та реалізації модуля керування було обрано платформу розробки *Intel Edison*. Вона містить 22-нм SoC *Intel Atom*, що включає двоядерний процесор *Intel* із тактовою частотою 500 МГц та 32-бітний мікроконтролер *Intel Quark* із тактовою частотою 100 МГц. Платформа підтримує 40 GPIO-ліній і оснащена 1 ГБ пам'яті LPDDR3, 4 ГБ вбудованого сховища eMMC, двохдіапазонним Wi-Fi (2,45 і 5 ГГц) та Bluetooth 4.0 [2].

Офіційною операційною системою (ОС) є *Yocto*, що базується на *GNU/Linux*, яка дозволяє виконувати алгоритми, написані мовами високого рівня, такими як *Python* та *C/C++* (*Yocto Project*, версія 2016 року).

Крім того, компанія *Intel* надає інструменти підтримки, зокрема *Eclipse* та *Intel XDK*, що дозволяють використовувати *Node.js* і *HTML5* для розробки вебзастосунків із *Python* [25].

Система керування. З огляду на те, що відносний рух Сонця відносно Землі є передбачуваним, була реалізована система керування з відкритим контуром, заснована на рівняннях сонячного позиціонування. Вхідними змінними для цих рівнянь є дата, час, часовий пояс, широта та довгота місця встановлення. На основі цих даних оцінюється видиме положення Сонця в термінах азимута та сонячної висоти.

Через кожен часовий інтервал Δt виконується коригування положення за потреби, і переміщення не обмежується діапазоном руху для кожного ступеня свободи. Схема керування представлена з використанням *Intel Edison* та електронної системи (див. рис. 3.3).

Проєктування модуля живлення. Проєктування модуля живлення потребувало системи, здатної забезпечувати електроживлення та контролювати напрямок обертання приводів. Вона повинна витримувати пікові струми до 1,7

А для задоволення потреб приводів під час запуску, після чого необхідний постійний струм у діапазоні 350–500 мА.

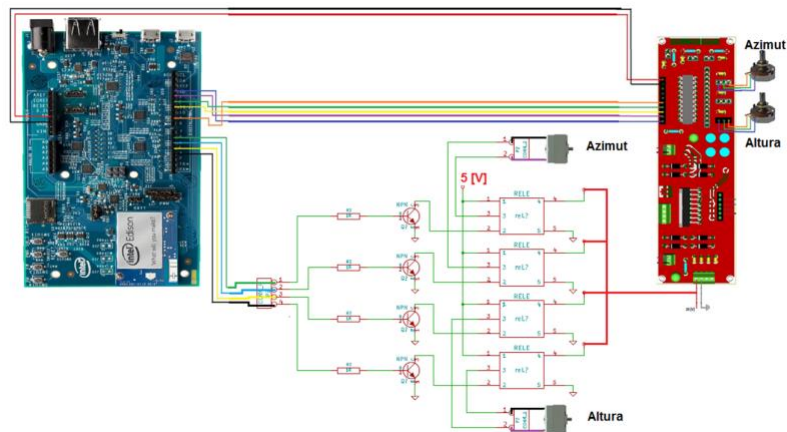


Рисунок 3.3 – Система керування сонячним трекером з відкритим контуром.

Для реалізації цього завдання була обрана інтегральна схема *L298N* [26]. Вона має два канали, підтримує безперервну роботу з навантаженням до 2 А на канал і може витримувати нерепетитивні пікові струми до 3 А при напрузі живлення до 50 В. Схема модуля живлення наведена на рис. 3.4.

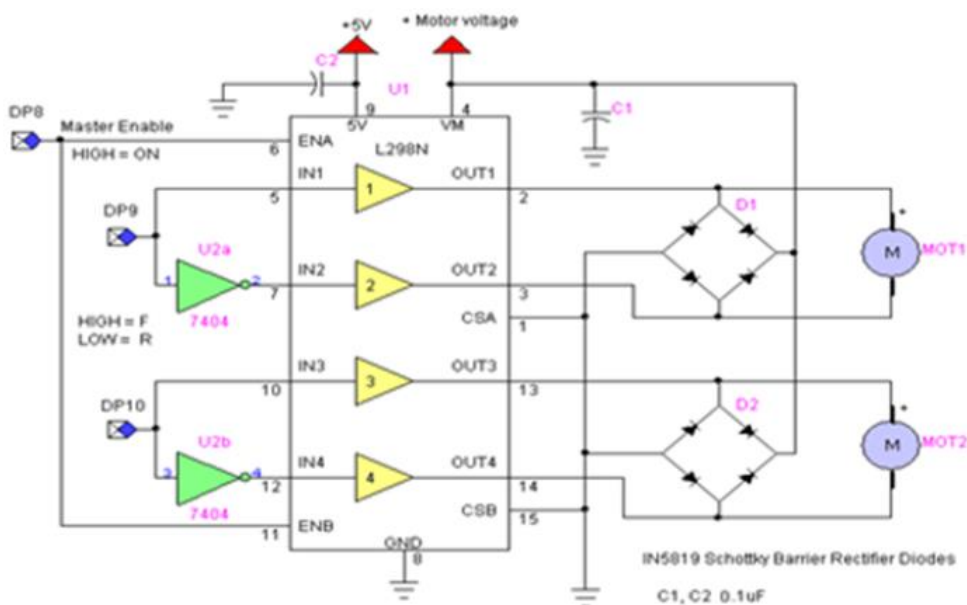


Рисунок 3.4 – Схема модуля живлення.

Перетворення аналогових сигналів. Для перетворення аналогових сигналів від потенціометрів та подання цих даних у цифровому вигляді до обчислювального модуля була обрана інтегральна схема *TLC2543* [27]. Ця

інтегральна схема є аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з 11 каналами та роздільною здатністю 12 біт (див. рис. 3.5).

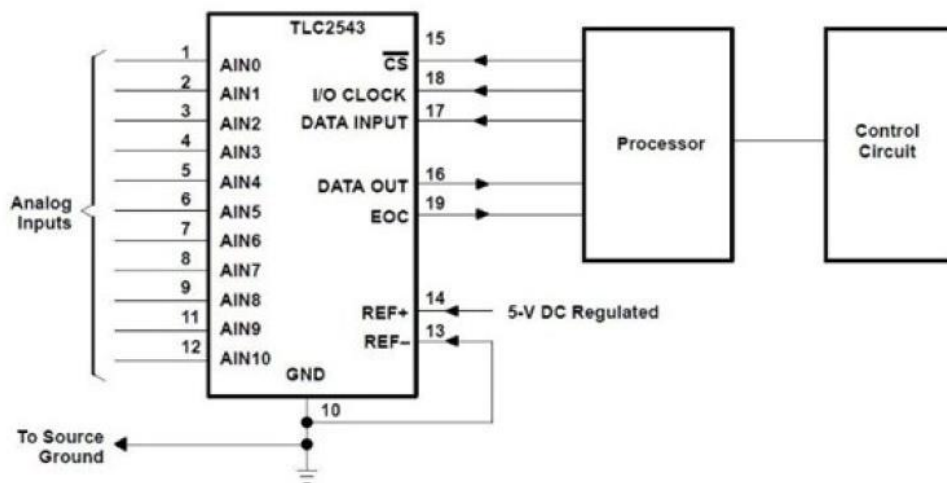


Рисунок 3.5 – Схема збору даних

Інтегральна схема *TLC2543* (АЦП) забезпечує значну перевагу для цього застосування завдяки своїй 12-бітній роздільній здатності, що дозволяє отримати високоточне цифрове відображення аналогових напруг від потенціометрів. Така висока роздільна здатність є критично важливою, оскільки вона дає змогу фіксувати незначні зміни у значеннях потенціометрів, які відповідають точним коригуванням положення сонячного трекера.

АЦП працює за методом послідовного наближення (SAR), що забезпечує швидкий і точний процес перетворення. Цей метод добре підходить для систем, які вимагають одночасно швидкодії та високої точності у режимі реального часу. 12-бітна роздільна здатність означає, що діапазон напруги можна розділити на 4096 дискретних рівнів, що робить можливим виявлення навіть незначних змін у показниках потенціометрів, які відображають кутове положення сонячного трекера.

Дані, зібрані з АЦП, передаються до мікроконтролера в цифровому форматі, що забезпечує ефективну обробку та керування системою сонячного трекінгу. У майбутніх ітераціях проекту можна використати додаткові канали АЦП для інтеграції більшої кількості датчиків, що дозволить системі відстежувати інші параметри довкілля, такі як температура чи інтенсивність освітлення, підвищуючи загальну ефективність роботи трекера.

Схема, наведена на рисунку 5, ілюструє підключення потенціометрів до АЦП і плати розробки, наочно відображаючи апаратне забезпечення, використане в процесі збору даних.

Характеризація рухів. Після з'єднання кожного лінійного потенціометра з вихідним валом редукторного двигуна їх було підключено до стабілізованої напруги 5 В, і було зібрано дані для встановлення лінійної залежності між вимірюваною напругою на кожному потенціометрі та кутовим положенням у відповідному ступені свободи.

Висота Сонця (нахил). Характеризація висоти Сонця здійснювалася за допомогою АЦП і плати розробки, встановлюючи залежність між напругою потенціометра та сонячною висотою, вимірюваною у градусах (див. рис. 3.6).

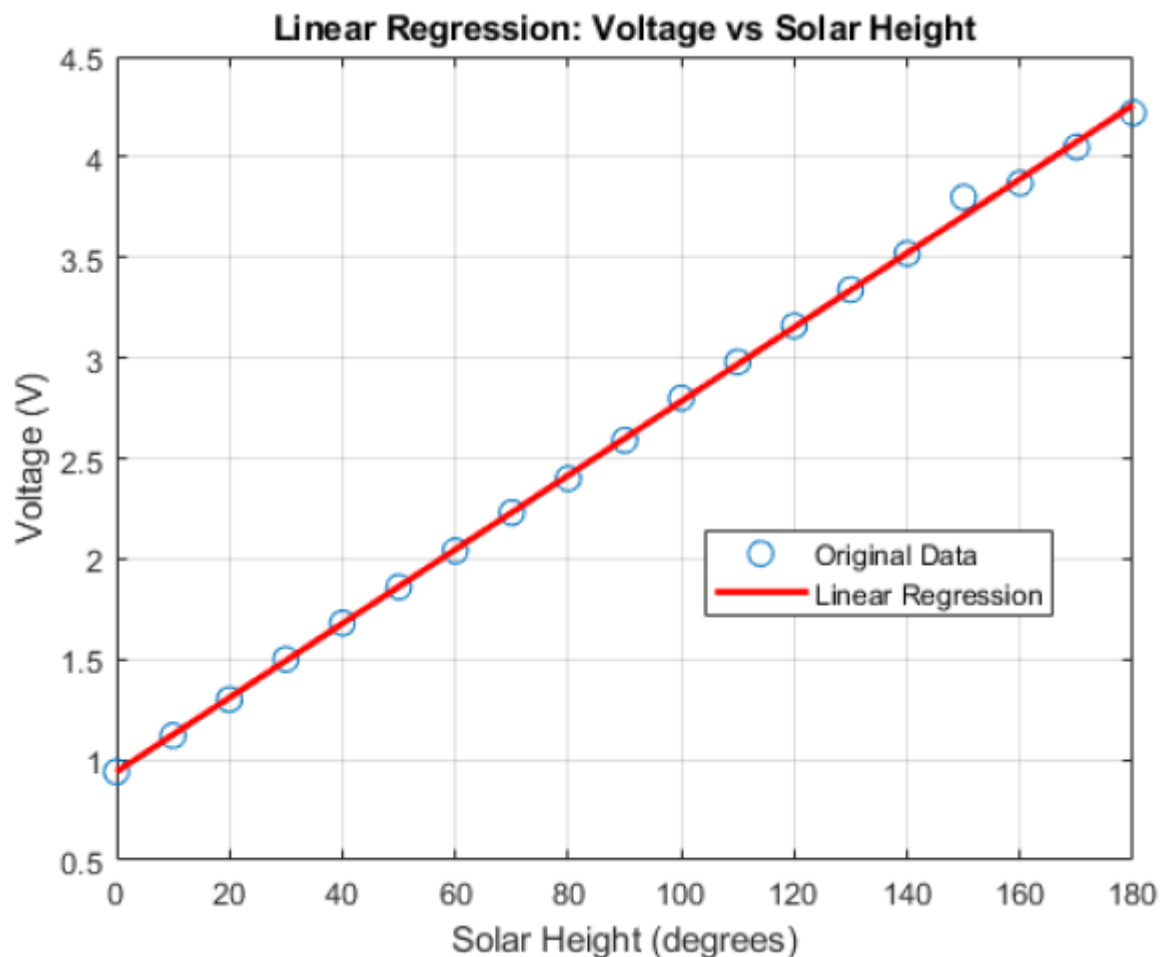


Рисунок 3.6 – Лінеаризація результатів роботи лінійного потенціометра для визначення висоти Сонця.

Виконавши лінійну регресію для визначення рівняння, що описує поведінку потенціометра, було отримано залежність напруги від кута в градусах (рівняння 3.1):

$$V=0,0184\alpha+0,9401, R^2=0,9994 \quad (3.1)$$

де V – виміряна напруга, α – висота Сонця у градусах, а R^2 відповідає коефіцієнту лінійності.

Азимут (орієнтація). Аналогічно до потенціометра, що використовувався для визначення висоти Сонця, його характеристика була виконана за допомогою АЦП плати розробки, порівнюючи виміряну напругу з азимутом Сонця у градусах (див. рис. 3.7).

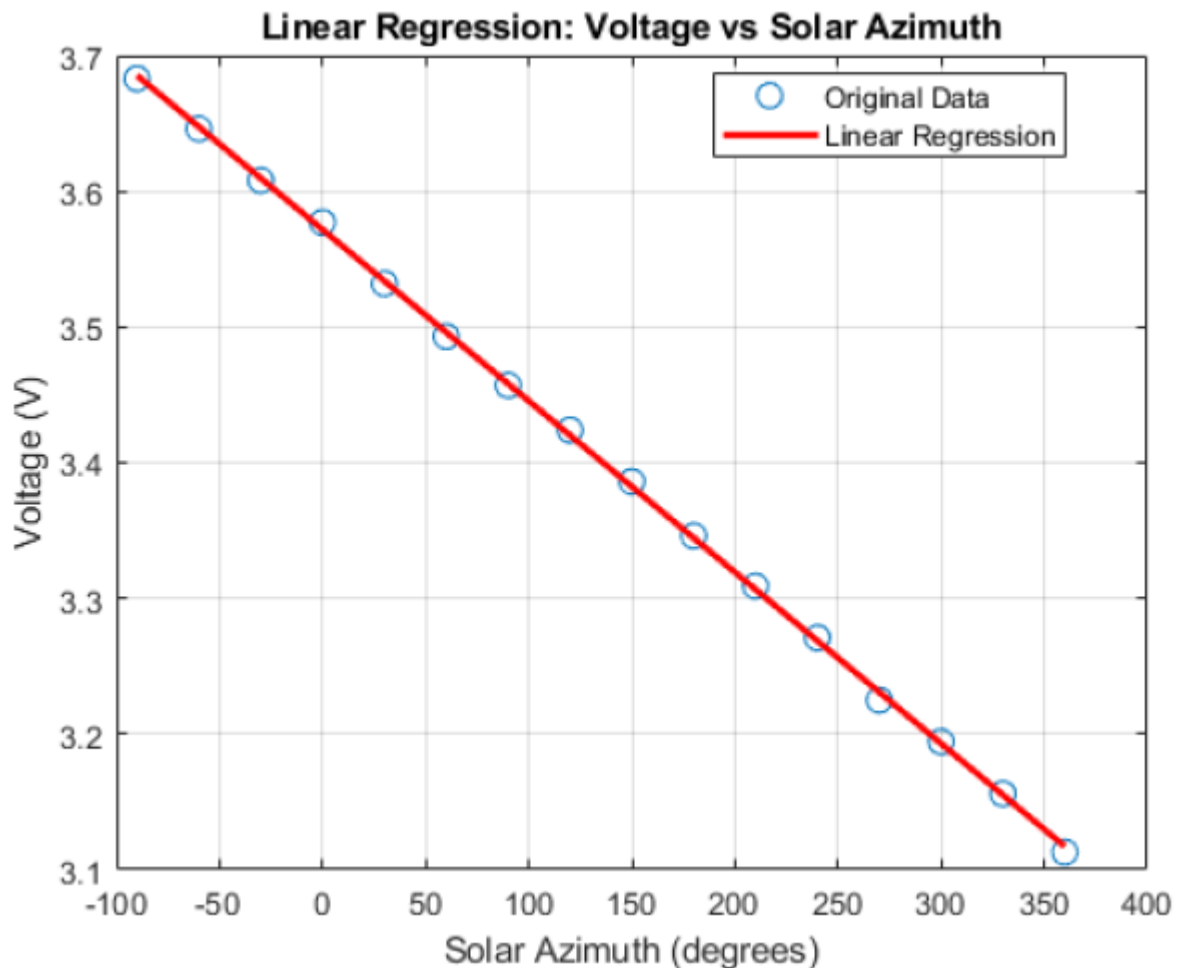


Рисунок 3.7 – Лінеаризація результатів роботи лінійного потенціометра для визначення сонячного азимута.

Після реєстрації цих даних було визначено рівняння, яке описує поведінку цього механізму (рівняння (3.2)):

$$V = -0,0012\beta + 3. \quad R_2 = 0.9981 \quad (3.2)$$

де V – виміряна напруга, β – сонячний азимут у градусах, R^2 – коефіцієнт лінійності.

3.4 Результати дослідження експериментальної електромеханічної трекерної системи

Для експериментальних випробувань система сонячного трекінгу була обладнана фотомодулем *Upsolar UP-M250P*. Цей модуль було обрано завдяки його надійним експлуатаційним характеристикам; він складається з 60 фотоелементів, виготовлених із полікристалічного кремнію [2, 8]. Конфігурація системи передбачала роботу з двома ступенями свободи з метою оптимізації захоплення падаючого сонячного випромінювання.

Основні технічні характеристики модуля наведені в таблиці 1.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики модуля Upsolar UP-M250P

Характеристика	Опис
Максимальна потужність [Втр]	250
Напруга при максимальній потужності [В]	30,9
Струм при максимальній потужності [А]	8,10
Напруга холостого ходу [В]	38,2
Струм короткого замикання [А]	8,45
ККД	15,4%
Температурний діапазон [°C]	-40...90
Розміри [дюйм/мм]	64,57 x 39,06 x 1,38 / 1640 x 992 x 35
Вага [фунт/кг]	40,8 / 18,5

Збір даних із сонячного трекера здійснювався з інтервалом у 30 хвилин. Для вимірювань використовувалися два шкалери, розташовані стратегічно на кожному обертовому вузлі системи. Ці шкалери дозволяли відображати положення азимуту та висоти Сонця в градусах.

Для оцінки ефективності сонячного трекера було проведено порівняльний тест між статичною конструкцією та системою сонячного стеження. Тест проводився з 7 по 11 листопада щодня з 9:00 до 16:00. Потужність, що

генерувалася, записувалася з інтервалом у 30 хвилин і усереднювалася за п'ять днів для отримання більш точних результатів за прямого сонячного випромінювання. Результати для статичної панелі представлені на рисунку 8.

Статична панель зафіксувала середню енергетичну віддачу 177,62 кВт·год протягом 7 годин роботи, з піковими значеннями ефективності в години полудня. Натомість нижчий рівень ефективності спостерігався вранці та ввечері, ймовірно через неоптимальні кути падіння сонячних променів та часткове затінення. Результати для сонячного трекера наведені на рис. 3.9.

Система сонячного стеження продемонструвала середню енергетичну віддачу 232,38 кВт·год протягом того ж періоду. Це збільшення генерації енергії пояснюється здатністю трекера підтримувати оптимальне положення відносно Сонця, що дозволяє поглинати більше сонячної радіації під час руху Сонця по небу.

Розрахунки миттєвої потужності та їх порівняння зі статичною панеллю наведені на рис. 3.10.

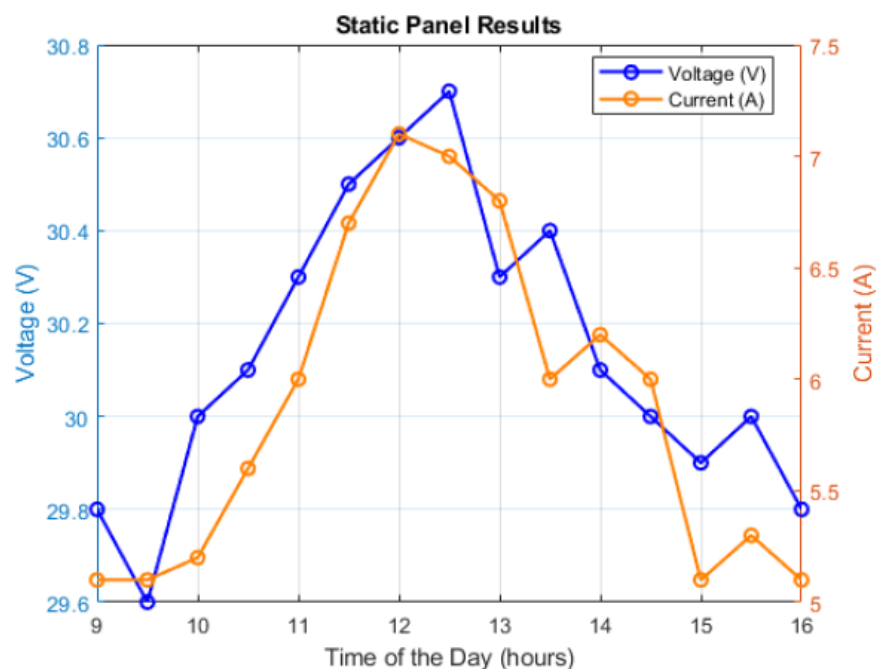


Рисунок 3.8 – Часові функції вихідного струму та напруги, виміряні для статичної фотоелектричної системи.

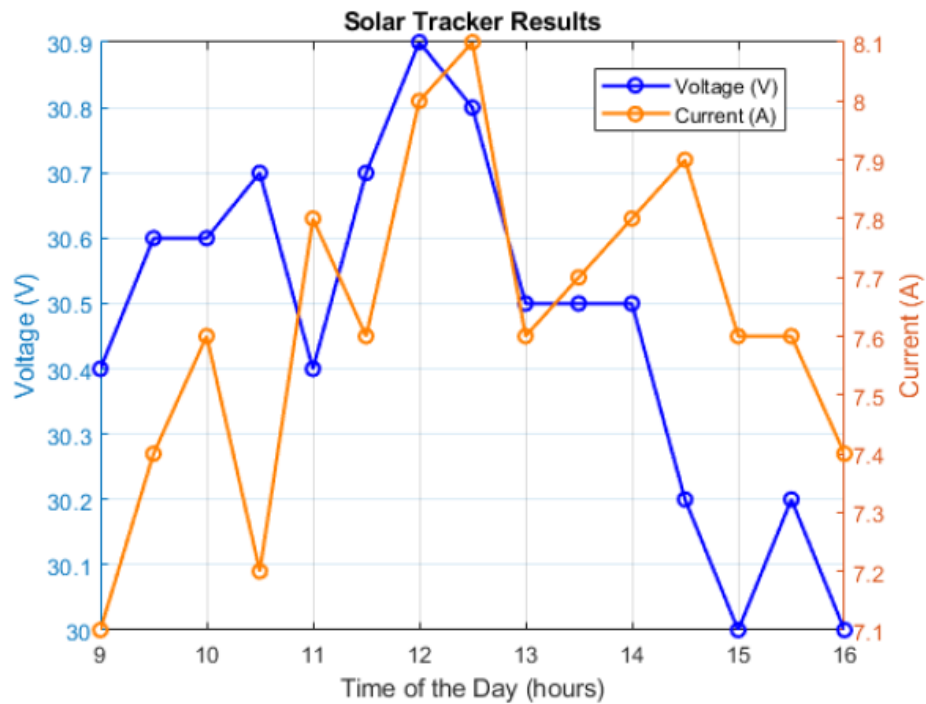


Рисунок 3.9 – Часові функції вихідного струму та напруги, виміряні для системи сонячного стеження.

Аналіз результатів показав, що сонячний трекер забезпечив середнє підвищення енерговіддачі приблизно на 30,83% порівняно зі статичною панеллю. Це обчислення базувалося на даних, зібраних протягом усього тижня, що забезпечує надійне відображення ефективності системи за різних умов сонячного випромінювання та погодних факторів.

Варто зазначити, що цей відсоток ще не враховує енергоспоживання двигунів та плати управління сонячного трекера, яке є відносно низьким. Після відрахування цього споживання очікується, що чисте покращення залишиться значним, що підкреслює доцільність використання системи. Цей аналіз показує, що навіть з урахуванням власного енергоспоживання трекера його ефективна конструкція дозволяє помітно оптимізувати виробництво енергії.

Зокрема, недорога конструкція та низьке енергоспоживання компонентів системи роблять її практичним та масштабованим рішенням, особливо в тропічних регіонах з високим сонячним випромінюванням. Дослідження підкреслює, як математичне моделювання, стратегії управління та оптимізація можуть максимізувати поглинання сонячної енергії без необхідності значних капіталовкладень.

Ці дані свідчать, що системи сонячного стеження, навіть з урахуванням їх власного енергоспоживання, забезпечують значне підвищення енергетичної віддачі. Це підкреслює важливість адаптивних сонячних технологій як ключового інструменту для максимізації ефективності фотоелектричних установок за різних кліматичних умов.

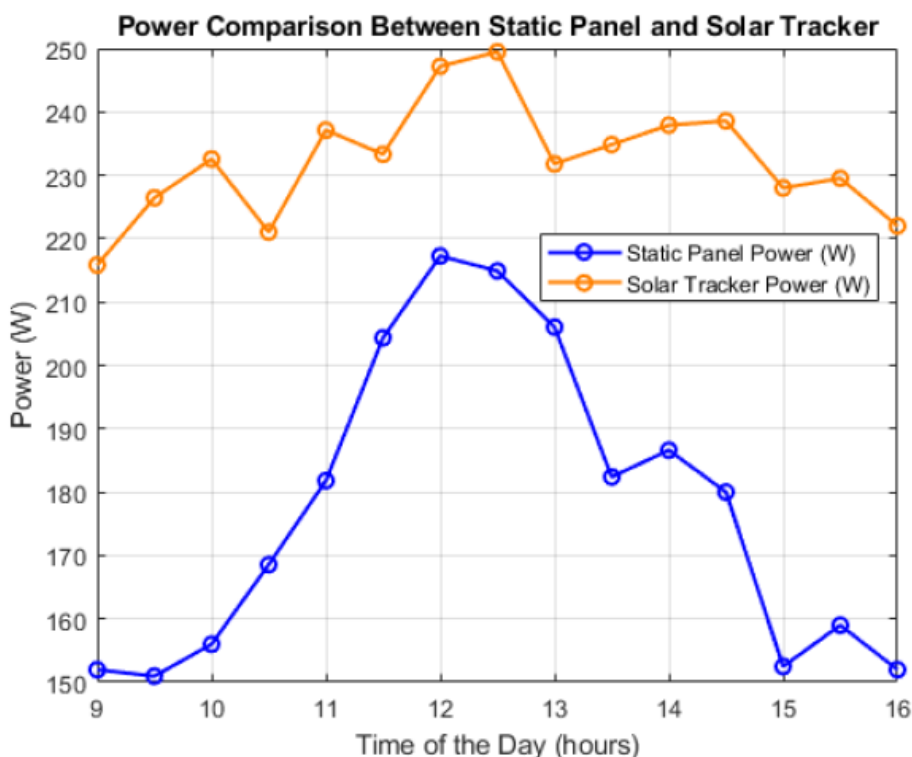


Рисунок 3.10 – Порівняння потужностей генерації для контрольної та стаціонарної систем.

Аналіз енергоспоживання та чистої вигоди. Після аналізу результатів та визначення, що сонячний трекер забезпечив покращення генерації енергії на 30,83% порівняно зі статичною панеллю, важливо було врахувати енергоспоживання самої системи стеження, щоб розрахувати чисте покращення. Енергоспоживання різних компонентів сонячного трекера, включаючи плату управління, двигуни та виконавчі механізми, відіграє ключову роль у оцінці загальної вигоди від системи.

Енергоспоживання модуля управління. Контрольний модуль Intel Edison є серцем системи стеження, відповідаючи за керування алгоритмом стеження, управління двигунами та взаємодію з іншими компонентами

системи. Енергоспоживання модуля управління було виміряно у двох режимах: з увімкненим Wi-Fi та без нього, як показано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Енергоспоживання модуля управління

Режим роботи	Напруга (В)	Струм (мА)	Потужність (мВт)
Без Wi-Fi	5,08	110	558,8
З Wi-Fi	5,02	185	928,7

Середнє добове енергоспоживання модуля управління, за умови безперервної роботи системи протягом 24 годин, становило 44 Вт·год/добу.

Енергоспоживання потенціометрів. Потенціометри, які використовуються для вимірювання висоти та азимуту Сонця, також споживають енергію, хоча їхнє споживання є відносно низьким, як показано в таблиці 3.

Таблиця 3.3 – Енергоспоживання потенціометрів

Потенціометр	Напруга (В)	Струм (мА)	Потужність (мВт)
Висота Сонця (1 кОм)	4,96	4,7	23,3
Азимут (10 кОм)	5,01	0,48	2,4

Загальне енергоспоживання потенціометрів було дуже низьким і становило приблизно 0,0257 Вт·год/добу.

Енергоспоживання реле та ADC-кола. Реле та ADC-коло споживали 160 мА при напрузі 5,1 В, що відповідало потужності 816 мВт.

Енергоспоживання виконавчих механізмів. Виконавчі механізми, що контролюють рух сонячного трекера (азимут та висота Сонця), є компонентами, які найбільше впливають на енергоспоживання. Необхідна для руху енергія змінюється залежно від умов роботи двигунів, як показано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Енергоспоживання виконавчих механізмів

Рух	Напруга (В)	Струм (мА)	Потужність (мВт)
Азимут	20,2	350	7070
Висота Сонця	20,2	380	7676

Оскільки сонячний трекер працює в автоматичному режимі, виконавчі механізми переміщують панель на певну відстань щодня, як показано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Час роботи на один рух

Рух	Швидкість (°/с)	Відстань (°)	Час (с)
Азимут	0,2826	360	1274
Висота Сонця	1	120	120

Добове енергоспоживання кожного виконавчого механізму становило:

- Азимут: 2,5 Вт·год/добу
- Висота Сонця: 0,26 Вт·год/добу.

Енергоспоживання під час запусків двигунів. Окрім безперервної роботи, двигуни зазнають запусків, які споживають більшу кількість енергії у певні моменти. Під час кожного запуску двигуни досягали пікового струму 2,5 А при напрузі 20,2 В протягом приблизно 0,2 с. Загальне енергоспоживання під час одного запуску становило близько 50,5 Вт протягом 11,2 с, що дорівнює 0,16 Вт·год/добу.

Загальне енергоспоживання системи стеження. Склавши споживання всіх компонентів, загальне добове енергоспоживання системи стеження наведене в табл. 3.6 та 3.7.

Чиста енергетична вигода

Нарешті, щоб розрахувати чисту енергетичну вигоду від системи стеження, ми відняли енергоспоживання системи від енергії, згенерованої трекером:

Енергія, згенерована сонячним трекером: 1626,66 Вт·год/добу

- Енергія, згенерована статичною панеллю: 1243,34 Вт·год/добу
- Валове покращення: $1626,66 - 1243,34 = 383,32$ Вт·год/добу

Тепер віднімаємо енергоспоживання системи:

- Чиста енергетична вигода: $383,32 - 46,92 = 336,40$ Вт·год/добу

Отже, відсоток чистого покращення становив:

$$\frac{336,40 \text{ Вт} / \text{добу}}{123,34 \text{ Вт} / \text{добу}} \cdot 100 = 27\%$$

Таблиця 3.6 – Загальне енергоспоживання системи

Компонент	Споживання (Вт·год/добу)
Модуль управління	44
Потенціометри	0,0257
Реле та ADC-коло	0,816
Виконавчі механізми (азимут + висота Сонця)	2,76
Запуски двигунів	0,16
Загальне споживання	46,92

Таблиця 3.7 – 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						

Впровадження рівнянь позиціювання Сонця у конструкцію експериментального сонячного трекера з двома ступенями свободи виявилось ефективною стратегією для максимізації поглинання сонячної енергії. Ця система, розроблена для мобілізації фотоелектричної панелі Upsolar 250, не лише оптимізує орієнтацію панелі, забезпечуючи її перпендикулярність до сонячних променів протягом дня, але й встановлює практичний та ефективний підхід для підвищення енергоефективності у реальних умовах.

Отримані результати показали значне підвищення енергоефективності на 27% порівняно зі статичними системами. Це є наочним доказом переваг

автоматизованого сонячного стеження, особливо в регіонах з високим рівнем сонячного випромінювання.

Крім того, система демонструє економічно ефективне та практичне рішення для максимального використання сонячних ресурсів у фотоелектричних установках малих і середніх масштабів. Поза безпосереднім технічним ефектом, розробка цього сонячного трекера має важливі наслідки для наукових досліджень і розвитку у сфері відновлюваної енергетики. Проєкт не лише сприяє підвищенню ефективності фотоелектричних систем, але й прокладає шлях для майбутніх досліджень, які можуть вивчати інтеграцію передових технологій, таких як використання штучного інтелекту для оптимізації руху трекера в реальному часі або розробку легших та більш довговічних матеріалів для його конструкції.

Крім того, результати цієї роботи підкреслюють необхідність враховувати адаптивність систем стеження до різних кліматичних та географічних умов. Наприклад, майбутні проєкти можуть досліджувати, як впровадження систем стеження можна адаптувати до зон з екстремальними погодними умовами, вираженими сезонами або більш змінними рівнями сонячного випромінювання.

З екологічної точки зору, здобуті в цьому дослідженні знання є важливими для просування сталого використання відновлюваної енергії. Підвищення ефективності фотоелектричних систем безпосередньо сприяє зменшенню вуглецевого сліду, пов'язаного з виробництвом електроенергії, та зміцнює економічну доцільність сонячної енергії у сільських та міських громадах.

Цей проєкт не лише підтвердив ефективність систем сонячного стеження як інструменту для максимізації ефективності фотоелектричних панелей, але й створив міцну основу для майбутніх досліджень. Впровадження технологічних інновацій, оцінка нових матеріалів та адаптація цих систем до різних середовищ дозволять продовжити прогрес у напрямку більш сталого та ефективного енергетичного майбутнього.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. За дану частину виробництва відповідає інженер з охорони праці. Головне завдання спеціаліста – створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Для забезпечення створення СУОП щорічно розробляються та затверджуються на підприємстві положення про організацію управління охорони праці; щорічно оформляються накази про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці на дільницях, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів, що працюють під тиском, газових та кисневих балонів, пестицидів); оформляються наказ про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізацій, керівників дільниць та інших службових осіб; щорічно проводиться паспортизація умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць; складаються плани роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування; організовуються заходи матеріального і морального стимулювання щодо охорони праці; проводяться розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробляються заходи щодо їх застосування;

Об'єктом управління є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

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 сталюю 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):

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

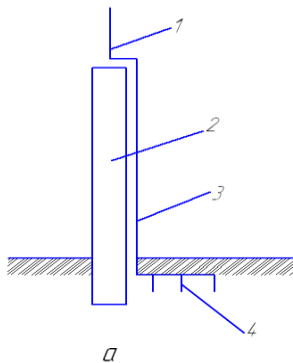


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,
2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

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.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРЕКЕРНИХ СИСТЕМ

5.1 Обґрунтування економічної ефективності використання сонячних панелей із застосуванням трекерних систем

Продуктивність фотоелектричного модуля стандартного розміру, номінальна потужність якого визначається при освітленості 1000 Вт/м^2 , можна оцінити за допомогою сумарної сонячної енергії на горизонтальній поверхні протягом дня, використовуючи відповідну формулу для середньоденного виробництва електроенергії

$$W_{cd} = \eta \cdot H_{\beta} \cdot S, \quad (5.1)$$

де η – ККД (коефіцієнт корисної дії) фотоелектричної панелі; H_{β} – інтенсивність надходження сонячної енергії, $\text{кВт} \cdot \text{год/м}^2$; S – площа приймаючої поверхні панелі, м^2 .

Формула дозволяє обчислити середньомісячний обсяг виробленої електроенергії

$$W_{cm} = W_{cd} \cdot n_{md}, \quad (5.2)$$

де n_{md} – кількість днів у місяці, днів.

Загальний обсяг електроенергії, виробленої сонячною фотоелектричною панеллю за рік, визначається за наступним способом.

$$W_p = \sum_{i=1}^{12} W_{cmi}. \quad (5.3)$$

Отже, на основі проведених розрахунків можна оцінити річний обсяг електроенергії, що виробляється однією фотоелектричною панеллю, а для визначення необхідної кількості панелей для живлення системи освітлення об'єкта використовується відповідна формула:

$$N_{fn} = \frac{E_{ocp}}{W_p} \quad (5.4)$$

Щоб оцінити щомісячну частку покриття енергетичних потреб системи вуличного освітлення за рахунок фотоелектричних панелей, слід розрахувати помісячне виробництво електроенергії встановленою сонячною установкою за відповідною формулою

$$W_{\Sigma cm} = W_{cm} \cdot N_{fn} \cdot \quad (5.5)$$

Виходячи з цього, річний обсяг електроенергії, виробленої фотоелектричною установкою, становитиме

$$W_{\Sigma cp} = \sum_{i=1}^{12} W_{\Sigma cm i} \cdot \quad (5.6)$$

Щомісячне порівняння енергетичних потреб системи з виробництвом електроенергії сонячною установкою може слугувати ефективним інструментом для оцінки поточного стану енергозабезпечення, зокрема

$$\Delta W_m = E_{осм} - W_{\Sigma cm} \cdot \quad (5.7)$$

Найбільш наочним способом є відображення витрат на експлуатацію трекерної системи сонячної електростанції у вигляді графіка (див. рис. 5.1).

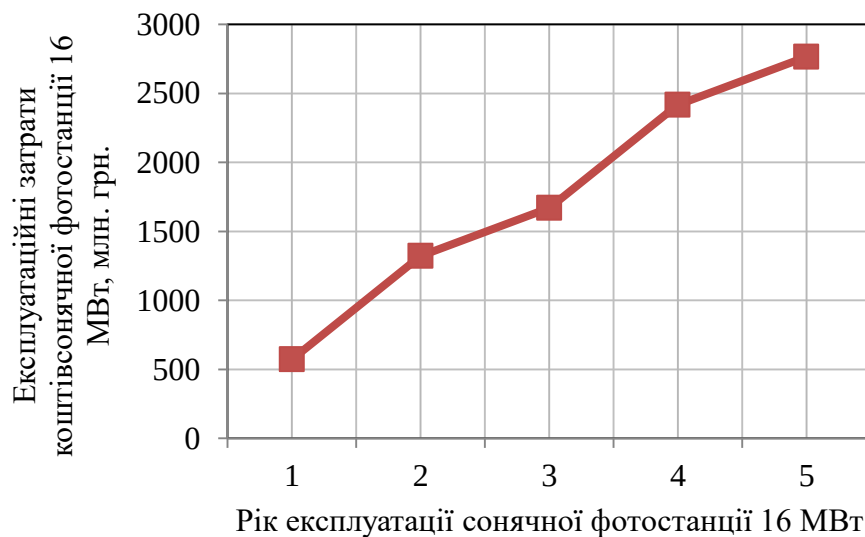


Рисунок 5.1 – Графічна залежність затрат коштів на експлуатацію на експлуатацію трекерної системи сонячної електростанції

Суму втрат електроенергії при експлуатації трекерної системи сонячної електростанції можна розрахувати за наступною формулою

$$B_{me} = W_{\Sigma cp} \cdot C_{me} \quad (5.8)$$

$$B_{me} = 643 \cdot 2,68 = 1723,24 \text{ грн.}$$

де C_{me} – ціна відпуску електроенергії споживачам, грн./кВт·год.

Тривалість окупності впровадження трекерної системи в сонячній електростанції для фотоелектричних установок обчислюється за відповідною формулою.

$$T_{ок} = \frac{\sum_i B_{me}}{\sum_{n=12} W_{cm}}. \quad (5.9)$$

$$T_{ок} = \frac{1723,24}{11221,53} = 0,15 \text{ або } 1,5 \text{ роки}$$

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У ході виконання роботи проведено енергетичний аналіз функціонування фотоелектричної установки, розміщеної на двовісній системі слідкування за Сонцем, із різною роздільною здатністю кроку трекара. Дослідження показали, що застосування трекерних систем дозволяє значно підвищити енергоефективність сонячних панелей у порівнянні з традиційними стаціонарними установками. Загальна вироблена енергія установки становила 589,5 кВт·год та 579,85 кВт·год для кроку трекара 20 та 120 хвилин відповідно, а різниця між місяцями не перевищувала 1,7%. Аналіз сонячних безхмарних днів показав, що фотомодулі з більшою роздільною здатністю кроку виробляли на 19% більше енергії, ніж з меншою, що свідчить про ефективність високочастотного слідкування за Сонцем у періоди максимальної інсоляції.

У дні з низькою інсоляцією, наприклад в осінньо-зимові місяці, ефективність різних рішень була порівнянною, що вказує на доцільність індивідуального підбору частоти зміни положення панелей залежно від умов освітленості протягом року. Збільшення частоти руху фотомодулів спричиняє зростання споживання енергії двигунами трекара з 2,48 кВт·год до 3,75 кВт·год, що складає 13,2% від отриманого прибутку від виробленої енергії за весь період випробувань. При цьому у дні з найбільшим виробництвом енергії збільшення споживання електроенергії двигунами було менше 1%, що підтверджує доцільність використання трекерних систем для підвищення ефективності.

Розроблена модель двовісної системи слідкування за Сонцем дозволяє здійснювати комунікацію через електромережу з іншими пристроями розумної мережі, такими як накопичувачі енергії та споживчі прилади, забезпечуючи оптимальне зберігання та розподіл згенерованої електроенергії. Впровадження системи слідкування за Сонцем дозволяє підвищити виробництво електроенергії більш ніж на 30%, особливо в літньо-весняний період, та збільшити відсоток використання сонячного світла протягом дня. Одновісна

вертикальна система VSAT виявилася оптимальним рішенням завдяки простоті обслуговування, надійності та тривалому терміну служби, а двовісні системи забезпечують максимальне виробництво електроенергії, хоча потребують більш складного обслуговування та витрат.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує доцільність застосування трекерних систем для підвищення енергоефективності фотоелектричних установок, а також визначає принципи оптимального підбору роздільної здатності кроку трекера і частоти зміни положення фотомодулів залежно від інсоляційних умов, що дозволяє досягти максимального енергетичного ефекту та раціонального використання ресурсів.

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. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
10. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
11. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>

12. https://cooperhunteraircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKGa0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqmlEALw_wcB
13. 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,” *Energies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.
14. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, “Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications,” *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
15. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation,” *Energies*, Vol. 13, No. 3, P. 755, 2020.
16. 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.
17. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, “Modelling and analysis of PV standalone system with energy management scheme,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.
18. K. Amer, M. Fakher, S. Ahmad, M. Irhouma, S. Altafbao and E. Salem, “Performance of domestic solar heating system with thermal storage using phase change materials,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 16, no. 9, PP. 01–11, 2020.
19. E. S. Harsha, R. K. Nema, S. Nema, and R. D. Kulkarni, “Design & Simulation of high gain ratio Bidirectional converter for energy storage applications,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, pp. 1–6, IEEE, Keonjhar, India, 2020, July.

20. Y. Nassar, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, “Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector,” *Solar Energy Research Update*, Vol. 6, PP. 43–50, 2019.