

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**РОЗРОБКА ДВОХОСЬОВОГО ТРЕКЕРА
ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Драпалюк Д.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Драпалюку Денису Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка двохосового трекера для сонячної електростанції

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 25.12.2023

3. Вихідні дані до роботи Сонячні панелі повинні працювати впродовж року. Система автоматичної орієнтації повинна спрямовувати їх площину перпендикулярно до сонячного випромінювання.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Технології стеження. Ефективність стеження за сонцем

2. Сонячний трекер.

3. Механічна система. Двигун. Механічна передача

4. Електрична система. Давач положення сонця. Цифрова система керування

6. Імітаційне моделювання системи стеження за сонцем

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Кут падіння світла на сонячний елемент

2. Блок-схема сонячного трекера

3. Варіант прототипу сонячного трекера

4. Схема H-подібного мосту

5. Схема аналогового компаратора

6. Розташування елементів на друкованій платі

7. Результати імітаційного моделювання системи стеження за сонцем

6. Консультанти розділів роботи

[illegible]

7. Дата видачі завдання 10.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Драпалюк Д.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 79 сторінок, _ аркушів презентації, 32 ілюстрації, 4 таблиці та 13 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес стеження за положенням сонця сонячним трекером.

Предмет дослідження – автоматизована система стеження за сонцем та орієнтації сонячної панелі в його напрямку.

Метою кваліфікаційної роботи є: розробити конструкцію двовісного сонячного трекера та проаналізувати його роботу.

Спроектований азимутально-висотний двовісний сонячний трекер має явну перевагу над нерухомими і одновісними системами стеження. Створений трекер має максимальну кутову похибку щодо сонця $1,5^\circ$ в обох осях руху. Це значення забезпечує вигоду в генерації енергії в 49 % порівняно з нерухомою сонячною панеллю, якщо припустити, що сонячні панелі, встановлені на трекері та нерухомій системі, є ідентичними панелями потужністю 20 Вт. Тестування показало, що потужність, яку використовувала побудована система стеження, була набагато меншою, ніж потужність, отримана завдяки точному відстеженню сонця. Це означає, що якби система стеження заряджала власні батареї, вона була б повністю самодостатньою, за винятком технічного обслуговування.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ТРЕКЕР, СИСТЕМА СТЕЖЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	
1.1 Основи сонячної енергетики.....	8
1.2 Технології стеження.....	9
1.3 Ефективність стеження за сонцем.....	10
1.4 Пасивні системи стеження	12
1.5 Активні системи стеження	12
1.6 Висновки до розділу	14
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	16
2.1 Сонячний трекер	16
2.2 Механічна система	17
2.2.1 Двигун	17
2.2.2 Черв'ячна передача.....	23
2.3 Електрична система	23
2.3.1 Блок живлення та керування двигуном	23
2.3.2 Давач положення сонця.....	32
2.3.3 Схема аналогового компаратора	38
2.3.4 Цифрова система керування	43
2.4 Висновки до розділу	45
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	47
3.1 Імітаційне моделювання системи стеження за сонцем	47
3.2 Конструкція	52
3.3 Результати тестування функціональності	53
3.4 Енергоспоживання	55
3.5 Висновки до розділу	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	60

4.1 Інструктажі з охорони праці	60
4.2 Фізичні основи електробезпеки	62
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Не всі країни володіють усіма благами, доступними людству. Ці так звані малозабезпечені країни позбавлені таких благ, як достатня кількість їжі, чиста вода, медицина, багатство, освіта та здорове довкілля. Світовий банк та інші установи вважають, що відсутність доступу до чистих та ефективних енергетичних послуг є фактором, який заважає знедоленим країнам отримати більше ресурсів, пов'язаних з вищою якістю життя, таких як багатство. Існує кілька нових форм сучасної енергії, але електроенергія, як було доведено, є однією з найчистіших та найефективніших форм.

Одним з можливих рішень для ненадійних або неіснуючих центральних систем розподілу електроенергії є система розподіленої генерації (СРГ). Система розподіленої генерації характеризується тим, що електроенергія виробляється локально, а не ззовні. СРГ часто використовується в малозабезпечених країнах, але, як правило, у вигляді невеликих генераторів, які працюють на різних видах викопного палива. Використання відновлюваних видів РГ є кращим, оскільки вони забезпечують більш стійке і здорове навколишнє середовище. Найпоширеніші варіанти ДГ включають: сонячну, вітрову та теплову енергію.

При порівнянні різних форм відновлюваної РГ необхідно враховувати п'ять факторів: місце розташування, простоту встановлення, надійність, потужність та вартість. Теплова енергія залежить від місця розташування і має високу вартість, тоді як вітрова енергія має нижчу вартість, але є ненадійною через мінливі вітрові умови і потребує регулярного механічного обслуговування. Сонячна енергія має відносно нижчу вартість, її легко встановлювати та обслуговувати, а для малозабезпечених країн, розташованих поблизу екватора, вона є ідеальним варіантом.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: розробити конструкцію двовісного сонячного трекера та проаналізувати його роботу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз попередніх розробок у галузі методів стеження за положенням сонця.
2. Розробити та проаналізувати механічні та електричні варіанти сонячних трекерів та обрати ті, що будуть мати найбільш оптимальні характеристики.
3. Створити власну систему стеження, протестувати і порівняти її, щоб переконатися, що її характеристики відповідають завданню.

Об’єкт дослідження – процес стеження за положенням сонця сонячним трекером.

Предмет дослідження – автоматизована система стеження за сонцем та орієнтації сонячної панелі в його напрямку.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток підхід до визначення положення сонця на небосхилі для орієнтування сонячної панелі з метою досягнення найвищої енергоефективності перетворення променевої енергії на електроенергію.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано конструкцію сонячного трекера та проведено розрахунок основних елементів схеми керування виконавчим механізмом, який виконує позиціонування сонячної панелі з точністю до $1,5^\circ$.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 06-07 грудня 2023 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (13 найменувань) та додатків.

Загальний обсяг текстової частини – 79 сторінок, 4 таблиці, 32 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Основи сонячної енергетики

Розуміння принципу роботи фотоелектричної панелі, має дуже важливе значення для проектування енергофактивної сонячної системи [2]. Сонячні панелі будуються з сонячних елементів, які з'єднують послідовно та паралельно. При послідовному з'єднанні збільшується загальна напруга, при паралельному з'єднанні збільшується загальний струм. Сонячні елементи виготовляється з кристалічного кремнію та аморфного, тонкоплівкового кремнію.

Фотоелементи складаються з кремнію, який легується різними елементами для формування р-n переходу. Сторона р-типу буде містити додаткові отвори або додатні заряди. Сторона n-типу містить додаткові електрони або від'ємні заряди. Ця різниця зарядів утворює область, яка є зарядово нейтральною і діє як своєрідний бар'єр. Коли на р-n перехід потрапляє світло, фотони з відповідною частотою утворюють додаткову електронно-діркову пару. Однак, оскільки р-n перехід створює різницю потенціалів, електрони не можуть перейти на інший бік, тільки дірки. Таким чином, електрони повинні виходити через металевий з'єднувач і проходити через навантаження до з'єднувача з іншого боку переходу.

Оскільки фотоелементи генерують струм, їх можна моделювати як джерела постійного струму. Кількість струму, який виробляє фотоелектрична панель, має пряму кореляцію з інтенсивністю світла, яке вона поглинає. На рис. 1.1 наведено просте зображення принципу позиціонування сонячної панелі.

Нормаль до елемента перпендикулярна до відкритої поверхні елемента. Сонячне світло падає на панель під кутом. Кут сонячного світла до нормалі є кутом падіння (θ). Припускаючи, що сонячне світло має постійну інтенсивність (λ), можна розрахувати потужність сонячного світла, доступну сонячному елементу для генерації електроенергії (W):

$$W = A \cdot \lambda \cdot \cos \theta . \quad (1.1)$$

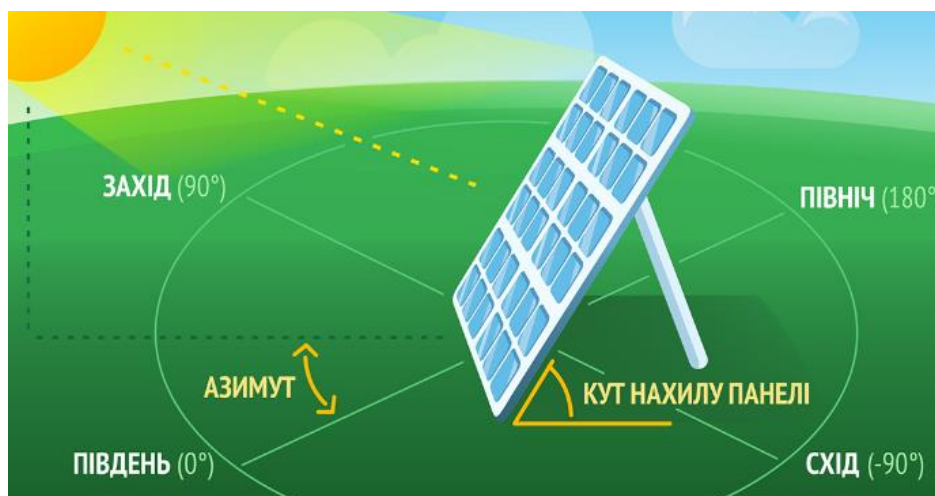


Рисунок 1.1 - Кут падіння світла на сонячний елемент

Тут A являє собою деякий граничний коефіцієнт перетворення в конструкції панелі, оскільки вони не можуть перетворити 100% поглиненого сонячного світла в електричну енергію. За цим розрахунком, максимальна потужність генерується, коли сонячне світло падає на фотоелемент вздовж нормалі, а коли сонячне світло падає перпендикулярно до нормалі, потужність не генерується. При фіксованій сонячній панелі значна частина енергії втрачається протягом дня, оскільки панель не тримається перпендикулярно сонячним променям. Система стеження може утримувати кут падіння променів в певних межах і зможе максимізувати вироблену енергію. Мусазаде та ін. підрахували, що кількість енергії, отриманої завдяки відстеженню, може наблизитися до ідеальної різниці в 57% [3].

1.2 Технології стеження

Як згадувалося в попередньому підрозділі, поглинання світла фотоелектричною панеллю залежить від її кутового положення по відношенню до сонця. Для максимального поглинання сонячного світла фотоелектрична

панель повинна бути перпендикулярна до сонця, що досягається за допомогою системи стеження. Існує безліч систем стеження, які відрізняються за надійністю, точністю, вартістю та іншими факторами [4,5]. Систему стеження слід обирати з розумом, щоб переконатися, що метод стеження збільшує отриману потужність, а не зменшує її.

1.3 Ефективність стеження за сонцем

Різні енергетичні програми вимагають різних систем стеження. Для деяких застосувань система стеження є занадто дорогою і зменшує максимальну потужність, яку можна отримати від сонячної панелі. Через те, що Земля обертається навколо своєї осі і рухається по орбіті навколо Сонця, якщо фотоелемент/панель нерухомий, ефективність поглинання буде значно меншою в певний час доби і року. Використання системи стеження для утримання фотоелемента/панелі перпендикулярно до сонця може збільшити зібрану енергію на 10 - 100% в залежності від обставин [3].

Якщо система стеження не використовується, сонячна панель все одно повинна бути зорієнтована в оптимальному положенні. Панель потрібно розмістити там, де на неї не падатиме тінь у будь-який час доби. Крім того, слід визначити найкращий кут нахилу, виходячи з географічного розташування панелі. Як загальне правило для північної півкулі, фотоелектричні панелі слід розміщувати під кутом нахилу, що дорівнює широті місця розташування, і дивитися на південь [6]. Однак для більш точного положення і кута нахилу створюється теоретична модель сонячного саява протягом року, а кут нахилу і положення підбираються відповідно до моделі.

Використання однієї осі стеження може забезпечити значний приріст потужності системи. Вікіпедія стверджує, що одноосьові треки поділяються на такі класифікації: горизонтальний одноосьовий трекер (HSAT), вертикальний одноосьовий трекер (VSAT), нахилений одноосьовий трекер (TSAT) та одноосьовий трекер з полярною орієнтацією (PASAT). Однак,

здається, ці терміни не використовуються в більшості статей, що обговорюють методи стеження. В одній статті згадується, що TSAT під кутом нахилу 5° збільшує річне випромінювання на 10% порівняно з HSAT, HSAT збільшує річне випромінювання на 15% порівняно з VSAT, і, нарешті, PASAT збільшує річне випромінювання на 10% порівняно з HSAT. Таким чином, для однієї осі конфігурація PASAT або TSAT збирає найбільше сонячного випромінювання. Деякі з цих типів трекерів показані на рис. 1.2.

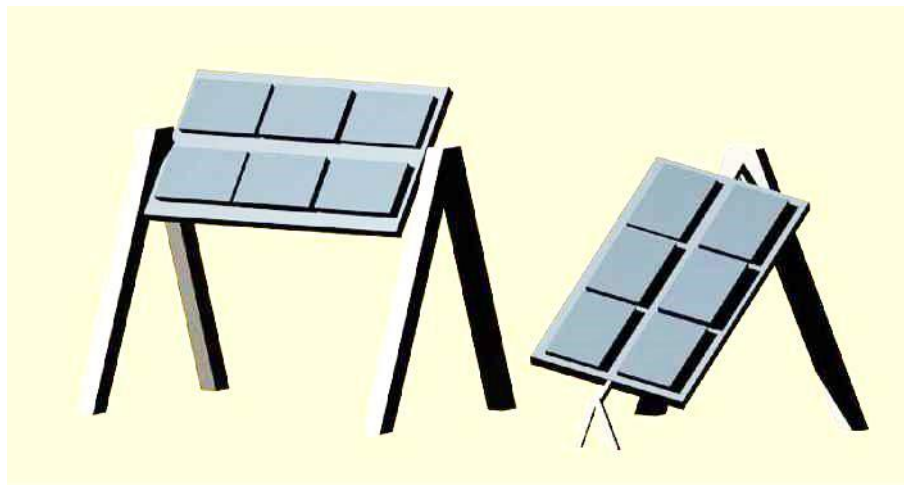


Рисунок 1.2 - Різні одноосьові трекери зліва направо: HSAT і PASAT

Для додаткового збільшення потужності можна використовувати двовісну систему стеження. Відсоток виграшу від переходу від PSAT до двовісної системи невеликий, але поки система не використовує більше енергії, ніж виграє, це все одно допомагає. Знову ж таки, Вікіпедія згадує дві класифікації двовісних трекерів: Tip-Tilt Dual Axis Tracker (TTDAT) і Azimuth–Altitude Dual Axis Tracker (AADAT). Різниця між цими двома типами полягає в орієнтації головної осі відносно землі. У TTDAT головна вісь розташована горизонтально до землі, а у AADAT - вертикально. Метод азимута/висоти, схоже, найчастіше використовується, виходячи з посилань на нього в численних наукових статтях з стеження [3]. У статті Сефа та ін. зазначено наступне: "Результати показали, що при стеженні з півночі на південь приріст електричної потужності склав 43,87% для двох осей, 37,53% для схід-захід, 34,43% для вертикалі і 15,69% для північ-південь, порівняно з

фіксованою поверхнею, нахиленою під кутом 32 на південь в Аммані" [7]. В рамках цієї кваліфікаційної роботи розглянуто та досліджено роботу системи AADAT.

1.4 Пасивні системи стеження

Одним з можливих варіантів стеження є хімічно/механічна система. Ця система використовує ідею теплового розширення матеріалів як метод стеження. Зазвичай з обох боків сонячної панелі розміщують хлорфторвуглець (ХФВ) або сплав з пам'яттю форми. Коли панель перпендикулярна до сонця, обидві сторони знаходяться в рівновазі. Як тільки сонце рухається, одна сторона нагрівається і змушує одну сторону розширюватися, а іншу - стискатися, змушуючи сонячну панель обертатися. Пасивна система може збільшити ефективність на 23%. Ці системи набагато дешевші, ніж активні, але не є комерційно популярними [3].

1.5 Активні системи стеження

Існує три основні типи активних систем стеження: допоміжна двостороння система сонячних батарей, електрооптична система та мікропроцесорна/комп'ютерна система.

Допоміжні двосторонні системи сонячних батарей є найпростішими з чотирьох активних систем. Двосторонній допоміжний сонячний елемент (сенсорний елемент) закріплений на поворотній осі трекера і розміщений перпендикулярно до основного масиву двосторонніх сонячних панелей. Сенсорний елемент з'єднаний безпосередньо з двигуном, як правило, з електродвигуном постійного струму. Коли сонце рухається, кут падіння світла на сенсорний елемент збільшується, що в кінцевому підсумку виробляє достатньо енергії для переміщення двигуна і масиву сонячних панелей. Цей приклад можна побачити на рис.1.3.

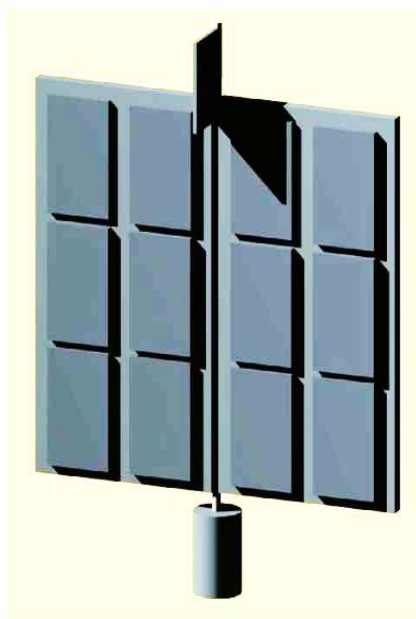


Рисунок 1.3 - Допоміжний двосторонній сонячний трекер

Електрооптична система також є ще однією відносно простою системою. Зазвичай два фоторезистори або фотоелементи використовуються як датчики для одновісних систем. Ці датчики розташовуються поруч один з одним і мають роздільний елемент, нахилене кріплення під розрахованим кутом або використовують коліматор для створення різниці струму та/або напруги між двома датчиками. Ці різні схеми показані на рис.1.4.

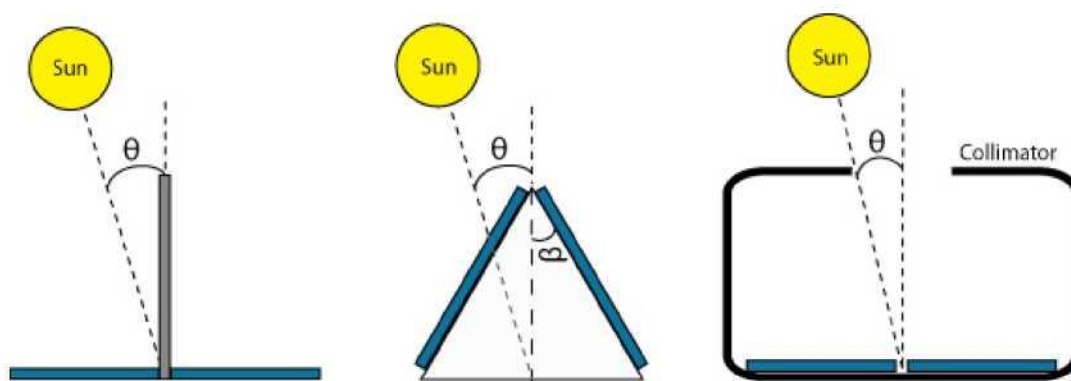


Рисунок 1.4 - Розташування датчиків трекера зліва направо: роздільний елемент, нахилене кріплення і коліматор

Комбінація резисторів, конденсаторів, підсилювачів, логічних ключів, діодів і транзисторів використовується для формування схеми порівняння і драйвера. Вихід схеми порівняння живить схему драйвера, яка, в свою чергу,

живить двигун і змінює напрямок відповідно до того, який датчик отримує більшу кількість світла. Це орієнтує сонячну панель перпендикулярно до сонця. [3]

Мікропроцесорні та комп'ютерні системи складають останній тип систем. Іноді їх класифікують на дві різні групи, але по суті вони досить схожі. Основна відмінність від перших двох згаданих систем полягає в тому, що мікропроцесорні/комп'ютерні системи використовують алгоритми для визначення положення сонця, а не датчики. Зазвичай мікропроцесорні/комп'ютерні системи використовують датчики лише для зменшення похибки або калібрування системи. Деякі мікропроцесорні/комп'ютерні системи навіть використовують процедуру максимізації струму для виправлення помилок. У багатьох системах дешевий мікропроцесор, такий як програмований інтерфейсний контролер (ПІК), має алгоритм стеження, а інформація подається на комп'ютер для аналізу. В роботі Рота та ін. мікроконтролер має два основних режими: режим годинника і режим сонця. У режимі годинника обчислюється положення сонця і вносяться будь-які зміни в алгоритм на основі даних датчиків сонячної похибки. У режимі сонця алгоритм активно позиціонує сонячні панелі. Якщо інтенсивність сонячного випромінювання падає нижче встановленого значення, активується режим годинника. Така різноманітність режимів сприяє кращому позиціонуванню і, відповідно, більшому коефіцієнту корисної дії. [8]

1.6 Висновки до розділу

1. Встановлено вплив положення сонячної панелі відносно сонця на її ефективність. При фіксованій сонячній панелі значна частина енергії втрачається протягом дня, оскільки панель не тримається перпендикулярно сонячним променям. Система стеження може утримувати кут падіння променів в певних межах і зможе максимізувати вироблену енергію.

2. Використання однієї осі стеження може забезпечити значний приріст потужності системи. Одноосьові трекери поділяються на такі класифікації: горизонтальний одноосьовий трекер (HSAT), вертикальний одноосьовий трекер (VSAT), нахилений одноосьовий трекер (TSAT) та одноосьовий трекер з полярною орієнтацією (PASAT). TSAT під кутом нахилу 5° збільшує річне випромінювання на 10% порівняно з HSAT, HSAT збільшує річне випромінювання на 15% порівняно з VSAT, і, нарешті, PASAT збільшує річне випромінювання на 10% порівняно з HSAT.

3. Існує дві класифікації двовісних трекерів: Tip-Tilt Dual Axis Tracker (TTDAT) і Azimuth–Altitude Dual Axis Tracker (AADAT). Різниця між цими двома типами полягає в орієнтації головної осі відносно землі. У TTDAT головна вісь розташована горизонтально до землі, а у AADAT – вертикально. Результати експериментів показали, що при стеженні з півночі на південь приріст електричної потужності склав 43,87% для двох осей, 37,53% для схід–захід, 34,43% для вертикалі і 15,69% для північ–південь, порівняно з фіксованою поверхнею.

4. Встановлено, що пасивна система стеження на основі хімічно/механічного механізму може збільшити ефективність на 23 %. Ці системи набагато дешевші, ніж активні, але не є комерційно популярними.

5. Встановлено, що існує три основні типи активних систем стеження: допоміжна двостороння система сонячних батарей, електрооптична система та мікропроцесорна/комп'ютерна система.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Сонячний трекер

Мета сонячного трекера - точно визначати положення сонця. Це дозволяє сонячним панелям, підключеним до трекера, отримувати максимальне сонячне випромінювання. У цьому конкретному сонячному трекері була створена замкнута система, що складається з електричної та механічної систем. Загальну блок-схему можна побачити на рис. 2.1.

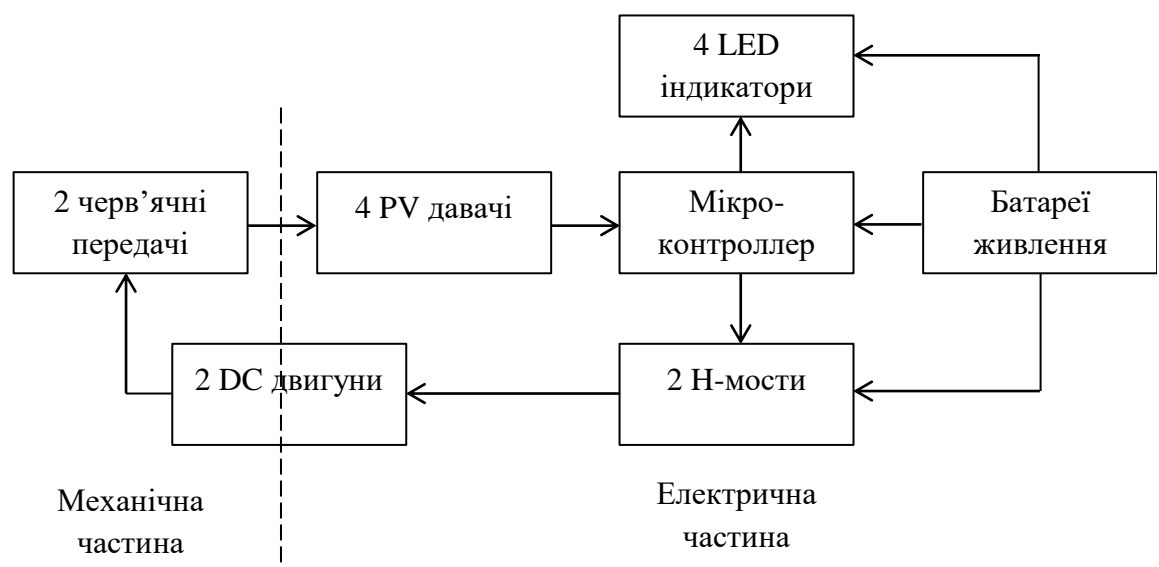


Рисунок 2.1- Блок-схема сонячного трекера

Електрична система складається з чотирьох фотоелектричних датчиків, які забезпечують зворотній зв'язок з мікроконтролером. Цей мікроконтролер обробляє вхідний сигнал датчика і забезпечує вихід на два H-моста і чотири світлодіодні індикатори. Вся електрична система живиться від джерела 12 В, яке складається з 8 батарейок типу АА. H-міст керує двома двигунами постійного струму, які також є частиною механічної системи. Механічна система також містить дві черв'ячні передачі, які регулюють фотоелектричні датчики.

Спочатку розглядалася аналогова система, в якій схема компаратора функціонувала як центральний процесор. Спочатку був побудований простий

дерев'яний прототип для тестування фотоелектричних датчиків і двигунів постійного струму. Ці тести були використані для формування загальної симуляції системи. В процесі тестування було визначено, що мікропроцесор буде використовуватися замість схеми компаратора, завдяки покращеній ефективності. На завершальному етапі запропоновано прототип, як показано на рис.2.3.

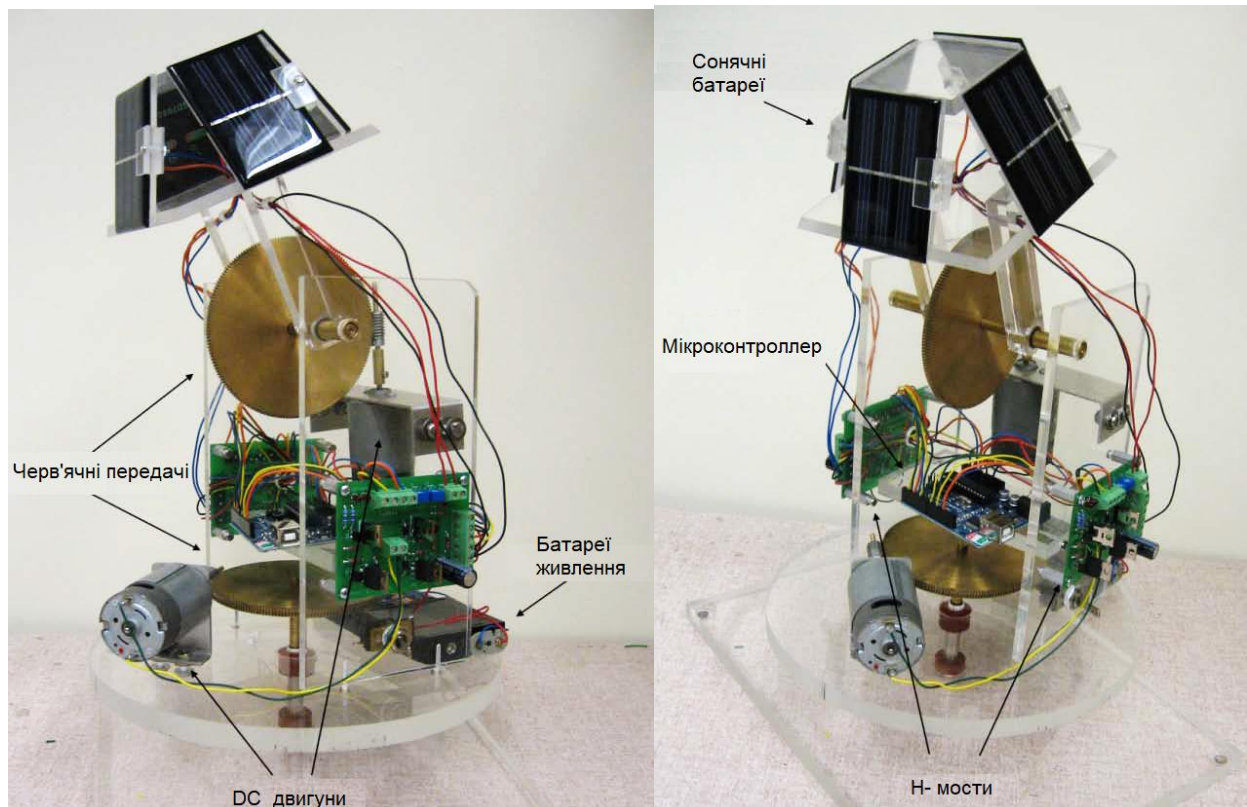


Рисунок 2.2 - Варіант прототипу сонячного трекера

2.2 Механічна система

2.2.1 Двигун

Для того, щоб отримати точні дані для налаштування симуляцію роботи двигунів потрібно провести тестування, щоб визначити опір (R), індуктивність (L) та константу зворотного електромагнітного поля (ЕМП) k двигуна.. Рівняння для напруги на двигуні має вигляд:

$$V = Ri + \frac{di}{dt}L + k\omega \quad (2.1)$$

Механічне рівняння для крутного моменту, що створюється двигуном, складається з констант інерції J , коефіцієнта демпфування D і протилежного крутного моменту T_0 :

$$T = ki = D\omega + \frac{d\omega}{dt}J + T_0 \quad (2.2)$$

Вимірювання цих величин дозволить провести точне моделювання двигуна для розрахунку його споживаної потужності.

Щоб отримати значення опору двигуна, напруга і струм вимірювалися, коли двигун не обертався, а положення валу змінювалося. Опір можна розрахувати за допомогою закону Ома, $V = IR$. Схема, що використовувалася, складалася з двох мультиметрів, один як амперметр і один як вольтметр, а двигун був підключений через амперметр безпосередньо до регульованого по напрузі джерела живлення постійного струму (рис. 2.3):

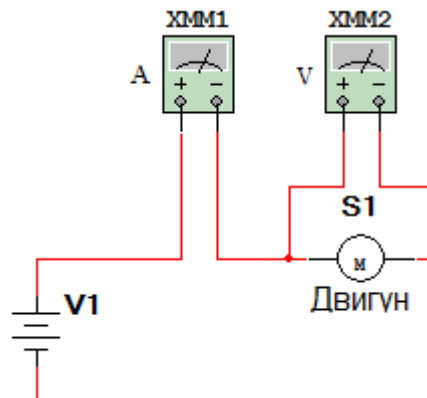


Рисунок 2.3 - Схема визначення опору двигуна постійного струму

Оскільки двигун мав кілька полюсів, до яких намагався пристати вал, вал злегка переміщували під час кожного вимірювання, щоб знайти середнє значення. У таблиці 2.1 наведено результати цих вимірювань. З таблиці 2.1 видно, що середній струм і напруга становили 101,3 мА і 0,216 В відповідно, а

середній опір - 2,189 Ом. Це значення було округлено до 2,19 Ом для всіх подальших розрахунків.

Таблиця 2.1 - Характеристики двигуна для знаходження опору

Номер експерименту	Напруга, В	Струм, мА	Опір, Ом
1	0,25	78,3	3,1928
2	0,193	117,2	1,6468
3	0,207	107,2	1,9310
4	0,222	97,4	2,2793
5	0,216	100,5	2,1493
6	0,204	108,7	1,8767
7	0,200	113,1	1,7683
8	0,235	88,2	2,6644
Середнє значення	0,216	101,325	2,189

Далі було знайдено індуктивність двигуна. Найбільш точним способом визначення індуктивності є побудова LC-контурі та знаходження резонансної частоти. Для цього генератор синусоїди був підключений послідовно з амперметром, двигуном, конденсатором і резистором. Амперметр вимірював струм, використовуючи функцію вимірювання середньоквадратичного значення, а додатковий резистор мав забезпечити велике навантаження на генератор (рис. 2.4):

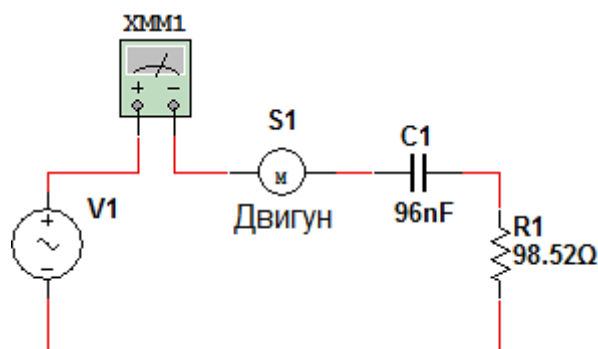


Рисунок 2.4 - Випробувальна схема індуктивності двигуна

Виміряні значення резистора і конденсатора становили 98,52 Ω і 96 нФ відповідно. Резонансна частота контуру визначилася як частота, на якій контур споживає найбільший струм. Змінюючи частоту генератора, встановлено резонансну частоту 15,8 кГц. Виходячи з рівняння для резонансної частоти (2.3).

$$\omega_R = \frac{1}{L \cdot C^{1/2}} \quad (2.3)$$

В результаті розрахунків встановлено, що індуктивність двигуна становить 1,057 мГн.

Після цього розрахунку необхідно знайти константу зворотної ЕРС, k , двигуна. Постійна зворотної ЕРС має лінійну залежність від швидкості обертання (ω) двигуна. Рівняння для стаціонарного режиму має вигляд (2.4).

$$V = Ri + k\omega \quad (2.4)$$

де V - повна напруга на двигуні;

i - струм через двигун;

R - опір двигуна.

Щоб знайти константу k , напруга і струм двигуна були виміряні на різних швидкостях з використанням тієї ж схеми, що і на рис. 2.4. Швидкість обертання двигуна обчислювали, прикріпивши невеликий диск до валу двигуна і поставивши на ньому одну позначку. За допомогою стробоскопа, світлодіода, що живиться прямокутною хвилею від генератора функцій, точна швидкість обертання розраховувалася на основі частоти стробоскопа, тоді мітка, здається, не рухається. Звідси значення k можна було знайти для кожної швидкості та усереднити. У таблиці 2.2 наведено результати цих вимірювань, і знайдено середнє значення константи $k = 0,0212$ в/рад.

Останнім виміром двигуна було механічне демпфування, притаманне ненавантаженому двигуну. При постійній швидкості демпфування майже точно дорівнює крутному моменту, що генерується двигуном. Крутний момент

дорівнює зворотній ЕРС, помноженій на струм, що проходить через двигун (2.5).

$$ki = D\omega \quad (2.5)$$

де D - коефіцієнт демпфування.

На основі вимірювань, наведених у таблиці 2.2, було також розраховано коефіцієнт демпфування D і виявлено, що він змінюється залежно від швидкості.

Таблиця 2.2 – Вимірювання характеристик ненавантаженого двигуна для знаходження зворотної ЕРС та інерції

Частота, Гц	Напруга, В	Струм, А	k, ν /рад	$D, (\omega)$	ω , рад/с
1,230E+01	1,980	0,179	2,069E-02	4,791E-05	7,728E+01
1,770E+01	2,750	0,182	2,124E-02	3,476E-05	1,112E+02
1,926E+01	2,930	0,184	2,097E-02	3,189E-05	1,210E+02
2,126E+01	3,220	0,185	2,116E-02	2,930E-05	1,336E+02
2,478E+01	3,690	0,184	2,118E-02	2,503E-05	1,557E+02
2,702E+01	4,010	0,183	2,132E-02	2,299E-05	1,698E+02
3,042E+01	4,510	0,185	2,153E-02	2,084E-05	1,911E+02
3,295E+01	4,880	0,189	2,163E-02	1,974E-05	2,070E+02
4,324E+01	6,280	0,193	2,160E-02	1,535E-05	2,717E+02

Результати для $D(\omega)$ були нанесені на графік кутової швидкості на рис.2.5. Це дало можливість побачити їх взаємозв'язок. Лінія найкращої відповідності була рівнянням $D(\omega) = 0,0025 \omega^{-0,912}$, що показує майже лінійну залежність між виміряними швидкостями.

Отже, з рівняння для $D(\omega)$, рівняння для $D(\omega) \cdot \omega$ можна представити як (2.6):

$$D \omega \cdot \omega = 0.0025 \cdot \omega^{0.088} \quad (2.6)$$

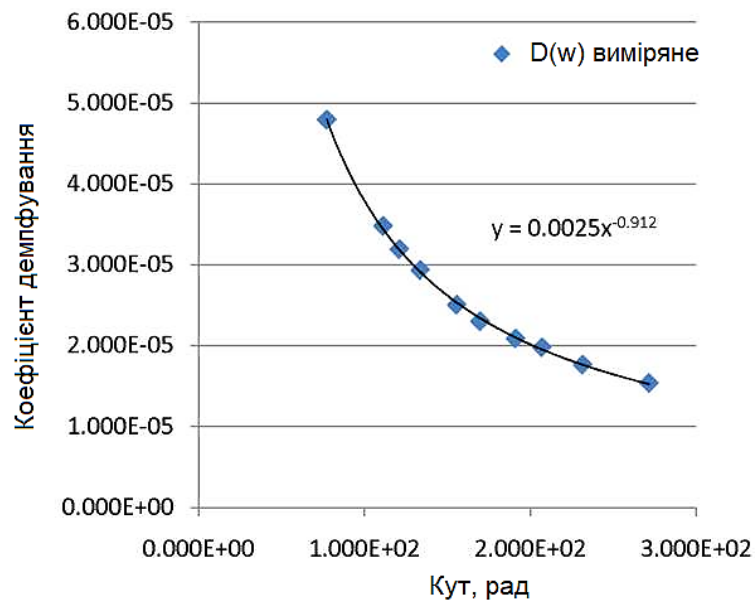


Рисунок 2.5 - Залежність інерції від кутової швидкості (ненавантажений двигун)

На основі цих вимірювань можна створити симуляцію двигуна. Модель складається з двох контурів, один з яких представляє електричну систему, а інший - механічну. Опір та індуктивність двигуна були послідовно з'єднані з джерелом напруги та залежним від струму джерелом напруги, яке представляє зворотну ЕРС. Механічне коло складається з іншого джерела напруги, залежного від струму, для представлення крутного моменту, що генерується k_i , котушки індуктивності для представлення дуже малої інерції обертання, яку має двигун, і кінцевого джерела напруги, залежного від струму, для представлення $D(\omega) \cdot \omega$. Для того, щоб графіки збігалися, до схеми було додано один невеликий резистор номіналом 1 мкОм. Ці дві схеми було введено в PSPICE і проведено аналіз перехідних процесів. Код для моделювання в PSPICE можна знайти в Додатку А.

При зміні напруги на двигуні від 0 В до 12 В в момент часу 0 с, струм і швидкість, яка представлена як струм, зображені на графіку протягом 0,3 с. Після цієї точки обидві величини досягають постійних значень. На рис.2.6 струм показано зверху, а швидкість - знизу

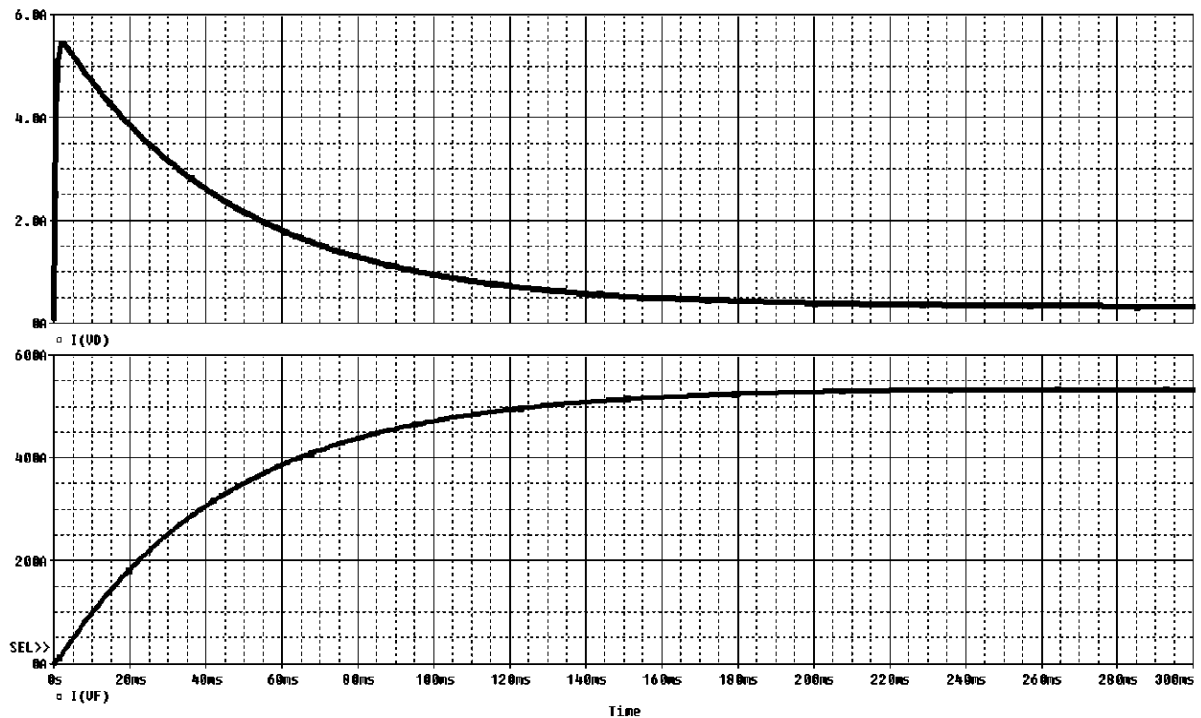


Рисунок 2.6 - Пусковий струм і швидкість при імітації двигуна постійного струму

2.2.2 Черв'ячна передача

Черв'ячні передачі здатні забезпечити високі коефіцієнти зменшення швидкості, а також відсутність інерційного люфту по відношенню до рушійного джерела. Це ідеальний варіант для системи стеження за сонячною енергією, оскільки трекер повинен рухатися повільно і з мінімальним впливом інерції. Для того, щоб ще зменшити швидкість, на обох осях були встановлені латунні черв'ячні редуктори з передавальним числом 180:1. Недоліком використання більших шестерень було значне збільшення вартості. У майбутніх розробках використання різних двигунів і методів приводу дозволить знизити вартість матеріалів.

2.3 Електрична система

Щоб створити корисний сонячний трекер, електрична система повинна давати точні сигнали керування механічній системі, бути надійною і мати

низьке енергоспоживання. Оскільки аналогові системи мають справу з постійною напругою, це здавалося ідеальним варіантом для забезпечення плавного і точного керування механічною системою. Таким чином, початкова електрична система складалася з сонячних датчиків, схеми компаратора та Н-моста. Для покращення роботи цієї системи було впроваджено деякі модифікації: різні сонячні датчики, різне розташування сонячних датчиків, гістерезис компаратора та широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) для більш точного керування двигуном.

2.3.1 Блок живлення та керування двигуном

Початковий дизайн трекера передбачав використання акумуляторної батареї для живлення системи стеження. Батарея буде заряджатися від сонячної панелі, встановленої на трекері, таким чином, система буде самодостатньою. Для вибору акумулятора необхідно було підібрати напругу живлення, яка б дозволила трекеру працювати в повному обсязі. На етапі тестування цього проекту було довільно обрано 5 В як відправну точку, щоб допомогти спроектувати схему. У процесі роботи над проектом було досліджено батареї для системи стеження, і виявилось, що саме 5В батареї важко знайти в комплекті для перезарядки.

Беручи до уваги, що трекер працюватиме у віддалених куточках світу і батарею з часом доведеться замінити, джерело живлення було замінено на доступну 12-вольтову батарею. Однак, зважаючи на часові та бюджетні обмеження, система зарядки акумулятора не була включена в остаточний прототип трекера. Напруга живлення залишилася 12 В, тому в майбутньому в систему стеження може бути інтегрована акумуляторна батарея.

Як зазначалося раніше, був обраний двигун постійного струму. Цей двигун може обертатися в обох напрямках за рахунок зміни напрямку струму, що подається. Оскільки блок живлення системи стеження має лише один полюс, потрібна була схема для перемикання напрямку струму, що подається

на двигун. Найбільш енергоефективним способом досягнення цього є схема, відома як Н-міст, спрощена схема якого показана на рис. 2.7.

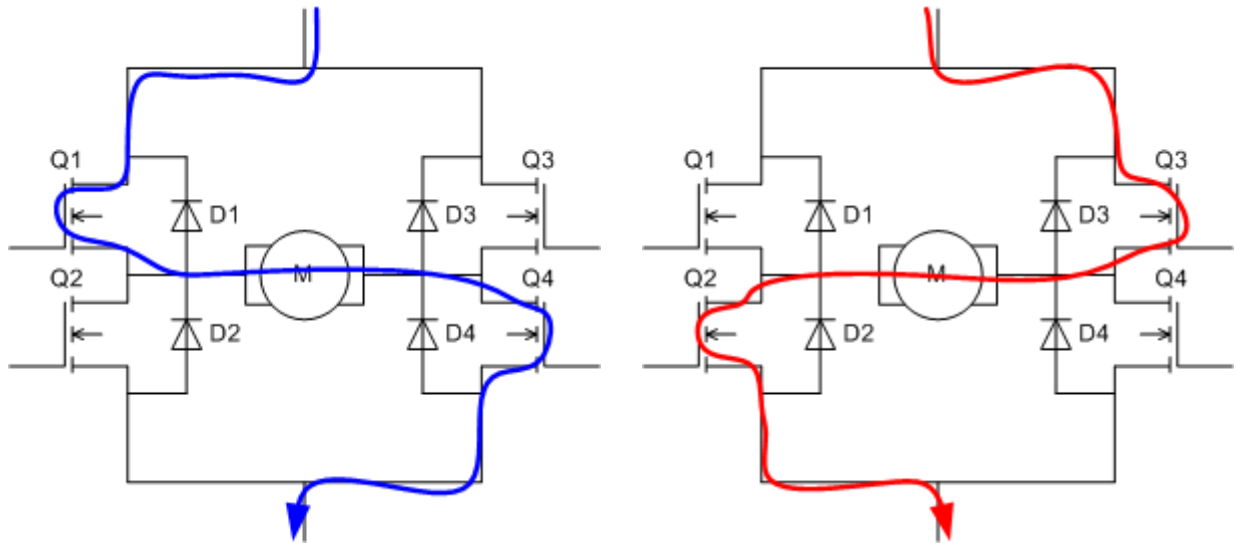


Рисунок 2.7 - Базова схема Н-моста

Тут дві пари MOSFET працюють спільно один з одним, щоб забезпечити струм через двигун у певному напрямку. Верхні MOSFET є Р-канальними пристроями, а нижні - N-канальними. Використання Р-канальних приладів виключає необхідність використання подвоювача напруги для підвищення напруги на затворі до рівня, достатнього для увімкнення приладу. Коли один Р-канальний MOSFET пропускає струм, а N-канальний MOSFET, розташований по діагоналі навпроти нього, також пропускає струм, двигун обертається в одному напрямку. Якщо вони обидва вимкнені, а два інших MOSFET увімкнені, двигун обертається в протилежному напрямку (рис.2.7).

Для Н-моста були обрані транзистори, які мали бути одночасно і енергоефективними і недорогими та широко доступними з виробничих міркувань.

MOSFET були обрані через їх високу енергоефективність у порівнянні з іншими транзисторними технологіями, такими як біполярний транзистор (BJT), який активно споживає струм на додаток до струму, що протікає через пристрій. В асортименті MOSFET є також силові MOSFET з іншою внутрішньою конструкцією, яка дає їм можливість працювати з високим струмом і/або високою напругою. Ці силові MOSFET, як правило, мають

набагато менший опір увімкнення, ніж стандартні MOSFET, а отже, меншу розсіювану потужність і вищий ККД. Для подальшого підвищення енергоефективності було обрано комплементарну пару. Комплементарні пари транзисторів - це два пристрої, в даному випадку один N-канальний і один P-канальний MOSFET, які зроблені таким чином, що вони працюють як майже ідентичні протилежності один одному. У цьому проекті, де MOSFET працюють як перемикачі, пара перемикається з однаковою швидкістю. Виходячи з попереднього досвіду, ця якість особливо важлива для запобігання короткому замиканню Н-моста. Якщо P- і N-канальні MOSFET з одного боку моста перемикаються з різною швидкістю, один MOSFET може залишатися увімкненим занадто довго, і коли вмикається інший MOSFET, Н-міст може закоротити і вигоріти один з транзисторів. Комплементарна пара запобігає цьому, гарантуючи, що між двома шинами живлення завжди є певний опір під час перемикавання.

Іншим важливим фактором при виборі MOSFET є потужність. Внутрішній опір увімкнення MOSFET визначає, яка частина потужності розсіюється у вигляді тепла, коли через пристрій протікає струм. Для максимальної енергоефективності кількість розсіюваної потужності повинна бути мінімальною, а отже, опір повинен бути мінімальним. Крім того, ця розсіювана потужність може пошкодити MOSFET, якщо пристрій не охолоджується належним чином. З міркувань економії було відмовлено від радіаторів та активних систем охолодження, а MOSFET були обрані з достатньо низьким розсіюванням потужності, щоб не потребувати додаткових заходів з охолодження. Для цього необхідно враховувати тепловий опір пристроїв.

Тепловий опір - це міра того, на скільки градусів підвищиться температура пристрою по відношенню до температури навколишнього середовища при розсіюванні певної потужності, що вимірюється у Ватах. Оскільки на Н-подібному мості не буде радіаторів, загальний тепловий опір буде від місця з'єднання пристрою до повітря. Цей показник часто вказується в специфікаціях пристроїв як $R_{\theta_{max}}$, чим він нижчий, тим більша потужність може

розсіюватися без додаткового охолодження. Для розрахунку максимально допустимого теплового опору використовується рівняння (2.7).

$$\frac{\Delta T}{P} = R_{\theta \max}, \quad (2.7)$$

де P - потужність, що розсіюється пристроєм,

ΔT - різниця між температурою навколишнього середовища і максимальною робочою температурою пристрою.

Вважаючи, що трекер може працювати поблизу екватора, де зафіксовані рекордно високі температури, температура навколишнього середовища в найгіршому випадку може приймати значення 50°C . Також припускаючи, що MOSFET має нетипово низьку максимальну робочу температуру 125°C , тоді ΔT за найгірших умов становитиме 75°C . Потужність, що розсіюється пристроєм, можна розрахувати як добуток внутрішнього опору на струм у квадраті (2.8).

$$P = I^2 R. \quad (2.8)$$

Знаючи, що максимальний струм, який споживав двигун під час тестування, становив ~ 400 мА, рівняння для розрахунку максимального теплового опору виглядає наступним чином (2.9).

$$R_{\theta \max} = 25^{\circ}\text{C} / 0.160 \cdot R_{ON}. \quad (2.9)$$

Силові MOSFET зазвичай поставляються в неізолюваному корпусі TO-220, який має типовий тепловий опір переходу "повітря-перехід" $\sim 65^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Тому $R_{\theta \max} > 65^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Підставивши цю нерівність у наведене вище рівняння і вирішивши для R_{ON} , мінімальний опір увімкнення можна розрахувати як:

$$R_{ON} < 2,404 \text{ Ом}$$

Це значення опору є максимальним значенням, яке можуть мати силові MOSFET, що використовуються в Н-мості, за умови, що їхня максимальна

робоча температура становить 125°C , а тепловий опір переходу "повітря-перехід" $65^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Беручи до уваги ці технічні характеристики і пам'ятаючи про те, що будь-які обрані компоненти повинні бути доступні в усьому світі, щоб зменшити витрати на ремонт, було обрано силові MOSFET, які доповнюють пару N-канальних MOSFET IRF530 і P-канальних MOSFET IRF9530. Ця пара значно перевищує необхідні технічні характеристики з максимальним номінальним струмом 12A, максимальною робочою температурою 175°C і тепловим опором переходу "повітря-перехід" $62,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Найважливіше те, що це широко використовувана пара силових MOSFET, тому вони доступні в більшості країн світу і мають дуже низьку вартість. Крім того, технічні характеристики MOSFET дозволяють використовувати двигуни більшої потужності в масштабованих системах стеження без значних електричних змін в електричній системі. Двигуни потужністю $\sim 2\text{A}$ не потребують додаткового охолодження Н-містка навіть при температурі навколишнього середовища 50°C .

Однак виникла проблема подачі вхідної напруги на землю на P-канальні MOSFET для досягнення найнижчого опору увімкнення, що забезпечує найкращу енергоефективність. Однак для більшості протестованих систем керування, описаних нижче, вони не змогли заземлити міст. З цієї причини на затворі P-канальних МОП-транзисторів використовувався NPN-транзистор BJT, щоб забезпечити проходження сигналу до заземлення. У тому ж сенсі, N-канальний MOSFET повинен досягати напруги живлення, щоб мати найнижчий опір увімкнення. Для багатьох систем керування, зокрема, мікроконтролерів, вони не могли надсилати сигнал на всю шину живлення [9,10]. З цієї причини до затворів N-канальних MOSFET також був доданий NPN BJT. Це також означало, що входи на Н-міст були інвертовані: високий сигнал вмикав P-канальні MOSFET, а низький - N-канальні MOSFET. Відповідно до ідеї використання широкодоступних компонентів, в Н-мості було застосовано звичайний NPN-транзистор 2N3904 BJT.

Нижче на рис. 2.8 показано схему кінцевого блоку Н-моста. Діоди, підключені через вивідні та входні клеми MOSFET, призначені для індуктивного зворотного зв'язку з двигуном. Цей зворотний зв'язок є високовольтним стрибком напруги, який може легко пошкодити MOSFET. Діоди сконструйовані таким чином, що якщо напруга перевищує певне значення, вони ефективно замикають двигун і стрибок напруги усувається. Випрямляючий діод 1N4004 ідеально підходить для цієї схеми завдяки своїй високій здатності витримувати імпульсний струм і широкій доступності.

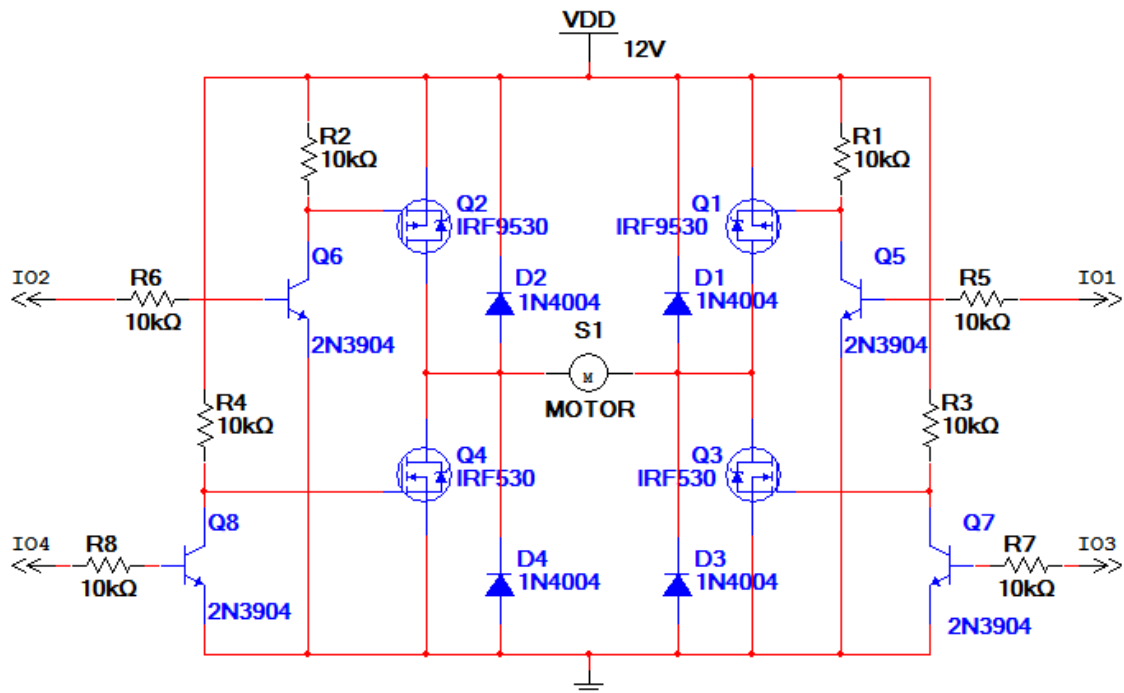


Рисунок 2.8 - Оновлена схема Н-подібного мосту

Оскільки двигун буде рухатися дуже малий відсоток часу протягом дня, потужність, що використовується, коли Н-міст "вимкнений" або не подає живлення на двигун, повинна бути мінімальною. Резистори в схемі були підібрані таким чином, що коли Н-міст вимкнений, струм споживання становить <5 мА для забезпечення ефективності. Тестування схеми з параметрами двигуна в Multisim показує, що загальне споживання струму при "вимкненому" Н-мості становить 4,65 мА, що дорівнює 55,8 мВт. Більш високе

значення резисторів зменшило б споживаний струм, але збільшило б час перемикання всіх MOSFET, що збільшило б перехідний струм.

Під час тестування багато механічних систем рухалися недостатньо повільно, оскільки на Н-міст, а отже, і на двигун, подавалася повна напруга шини живлення. Щоб вирішити цю проблему, можна було б зменшити швидкість двигуна, не вносячи серйозних механічних змін у систему. Однак найпростіший спосіб знизити швидкість двигуна, додавши резистор послідовно з двигуном, знижує крутний момент двигуна і зменшує його здатність ефективно обертати систему. Використання ШІМ-сигналу, однак, може знизити швидкість двигуна без значного впливу на крутний момент.

При використанні аналогової схеми компаратора, описаної нижче, ШІМ-сигнал повинен був надходити від зовнішнього джерела, оскільки компаратор не міг згенерувати цей сигнал. Для цього було використано таймер 555 для створення ШІМ-сигналу, який потім було підключено до колекторів Q7 і Q8 через відповідні резистори R3 і R4, схему Н-моста, описану вище. Ця система виявилася ефективним способом значно зменшити швидкість двигуна, що дозволило трекеру рухатися більш точно.

Пізніше цей ШІМ-генератор було видалено, оскільки мікроконтролер, який використовувався як основний блок управління, як описано нижче в 3.2.4, міг виводити ШІМ-сигнал, який генерувався і контролювався внутрішньо. Це дозволило заощадити енергію, яка використовувалася для таймера 555, і зменшити складність схеми.

Використання ШІМ для керування двигуном вимагає наявності силового конденсатора, щоб впоратися з імпульсними струмами двигуна. Коли двигун вмикається і вимикається, а також реагує на зміни механічного навантаження, споживаний струм може швидко змінюватися, що призведе до падіння напруги, яку може видати джерело живлення. Зміна напруги може бути зменшена за допомогою конденсатора для імпульсних струмів. Щоб розрахувати ідеальне значення для конденсатора, рівняння для пульсації напруги в джерелі живлення має вигляд:

$$V_{PP} = I_L / (f \cdot C) \quad V_{pp} = I_L / f \cdot C, \quad (2.10)$$

де V_{PP} - це пікова напруга пульсацій;

I_L - піковий струм споживання;

f - частота коливань, в даному випадку частота ШІМ;

C - ємність конденсатора.

Частота ШІМ, що використовується в кінцевій схемі, яка живиться від мікроконтролера, становить 500 Гц відповідно до специфікації. Максимальний струм навантаження становить 400 мА від максимального вимірюного струму, що надходить до двигуна під час тестування. Для бажаної величини пульсацій в 0,5 В менше 5% відхилення від напруги живлення 12 В, можна розрахувати оптимальне значення конденсатора:

$$C = 1600 \text{ мкФ}$$

Цей конденсатор був підключений між шиною живлення 12 В і заземленням для обох використаних Н-подібних мостів, як показано на рис.2.9.

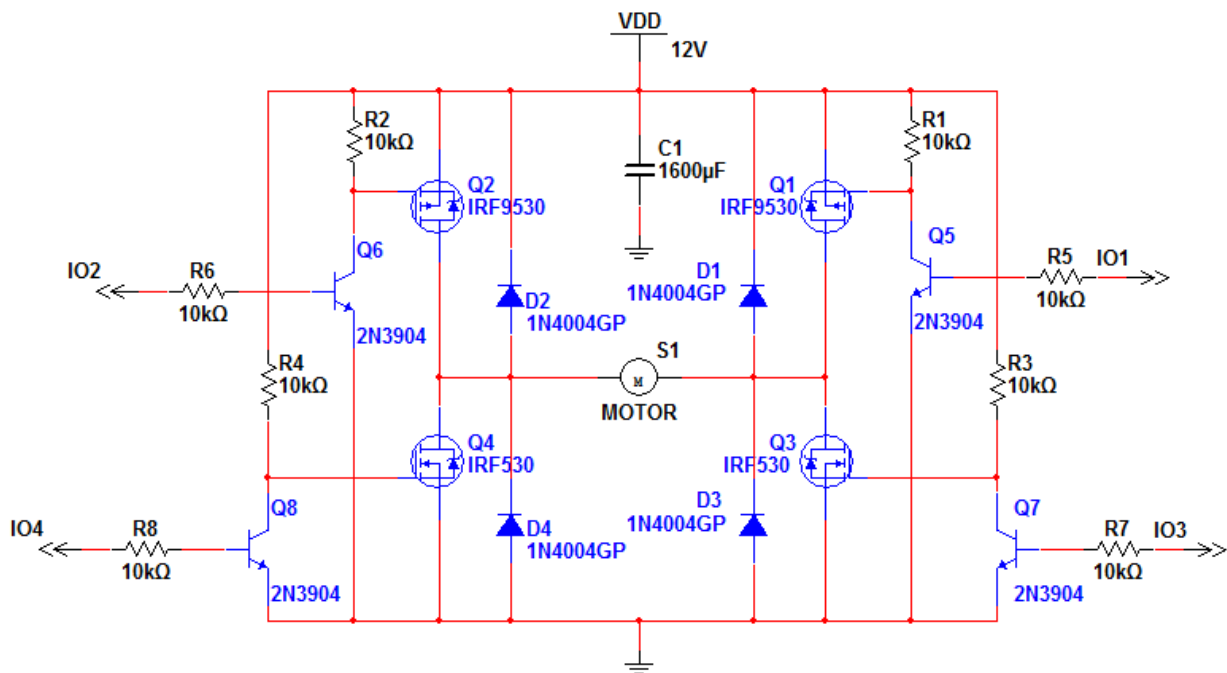
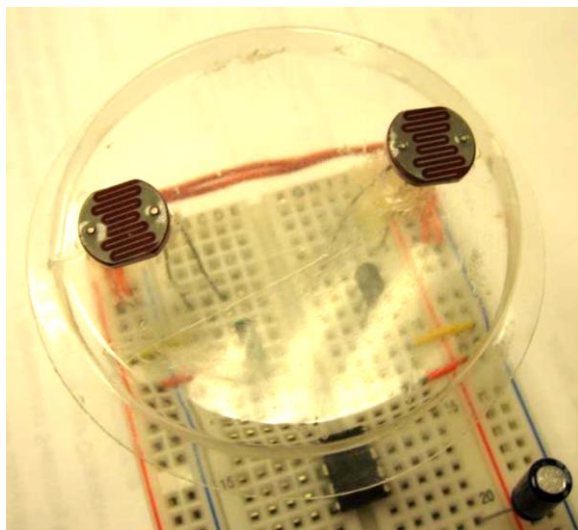


Рисунок 2.9 - Остаточна схема Н-мосту

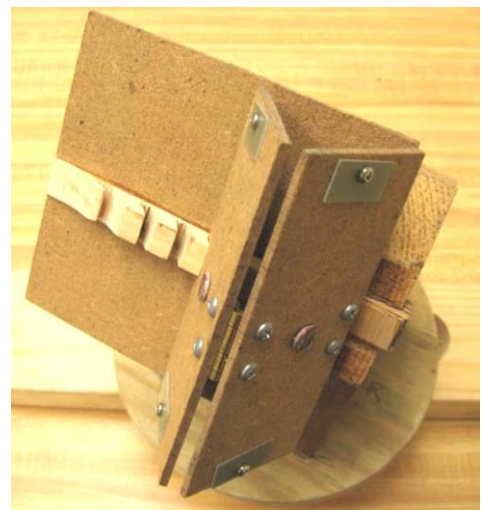
2.3.2 Давач положення сонця

Для забезпечення точного та надійного стеження сонця було розроблено давач сонця. На основі проведеного аналізу існуючих проектів, фоторезистори та фотоелектричні елементи розглядалися як можливі датчики. Сонячні датчики були обрані, в першу чергу, через лінійність вихідного сигналу при зміні кута падіння. Кут нахилу датчика був обраний таким чином, щоб отримати найбільшу кутову характеристику.

Для початкової конструкції було використано два фоторезистори, кожен з яких мав вимірний темновий опір 1,36 МОм. Ці датчики були встановлені перпендикулярно до джерела світла, як показано на рис. 2.10 (ліворуч). Така установка забезпечувала низьку точність, тому було використано кріплення, яке дозволяло регулювати кут нахилу, як показано на рис.2.10 (праворуч).



а)



б)

Рисунок 2.10 – Розташування фото резисторів у датчику:

а) перпендикулярні фоторезистори;

б) кріплення фоторезисторів з регульованим кутом нахилу

Для того, щоб визначити кут нахилу, який забезпечить найкращу точність і найкращу реакцію на зміну кута падіння, було побудовано тестову установку з лампочкою потужністю 100 Вт. Регульоване кріплення дозволяло встановлювати кути нахилу 25°, 35°, 45°, 55° і 65°. Роздільник, закріплений на

кріпленні, дозволяв обертати лампочку навколо кріплення, зберігаючи при цьому велику відстань до основи. Таку установку показано на рис.2.11. На рисунку кут падіння позначено як θ , а кут нахилу - як β .

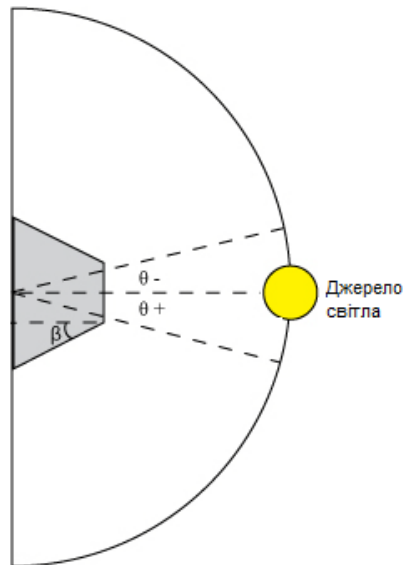


Рисунок 2.11 - Установка для тестування ідеального кута нахилу

Для тестування фоторезистори були встановлені в подільник напруги з джерелом 1 В і резистором 5 кОм, як показано на рис. 2.12.

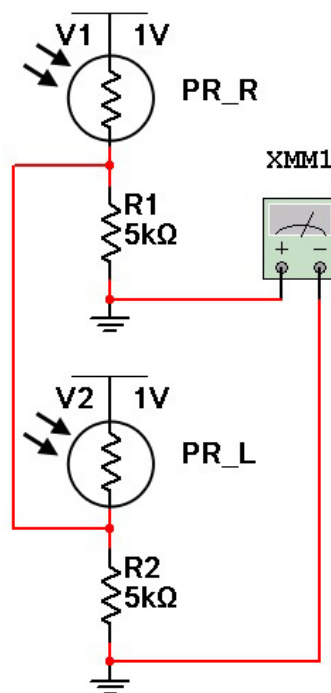


Рисунок 2.12 - Схема подільника напруги з фоторезистором

Кут падіння світла від лампи змінювався на 5° від -90° до 90° , а різниця напруги між двома фоторезисторними подільниками напруги вимірювалася і записувалася. Це було зроблено для всіх п'яти кутів нахилу. Ці результати можна переглянути на результуючому графіку для додатних кутів падіння показано на рис. 2.13. З графіка видно, що більші кути нахилу не є бажаними, оскільки при менших кутах падіння спостерігається лише незначна різниця напруги.

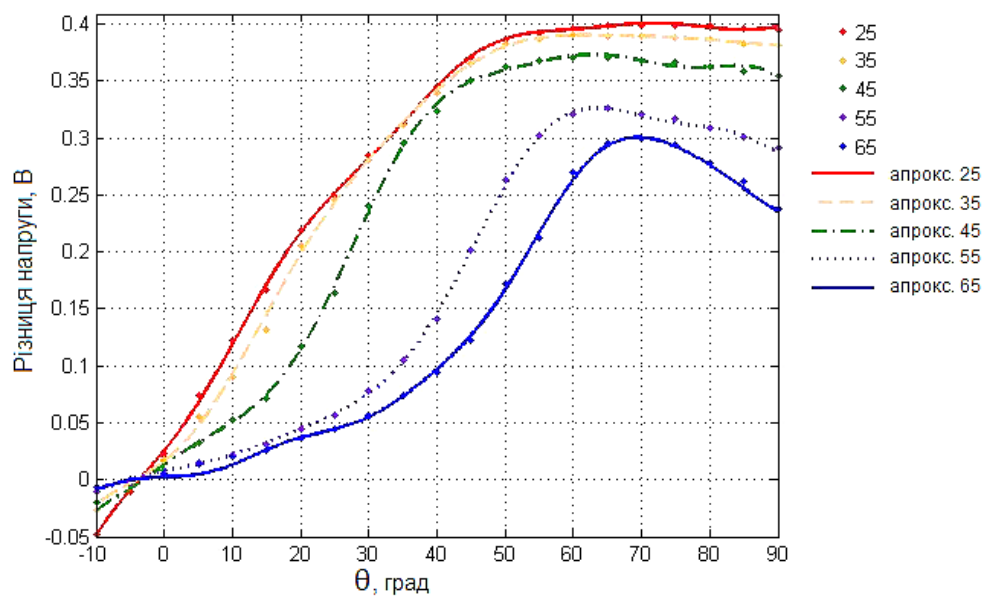


Рисунок 2.13 - Різниця напруги в залежності від θ (фоторезистори)

Поряд з фоторезисторами було протестовано два інших типи датчиків. Окремо тестувалися два тонкоплівкові фотоелементи та два полікристалічні фотоелементи. Фотоелементи були з'єднані послідовно з підключеними позитивними клемми, як показано на рис.2.14.

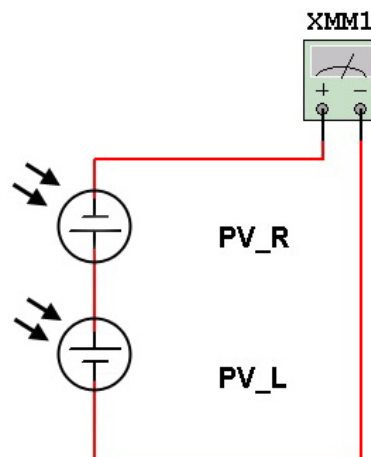
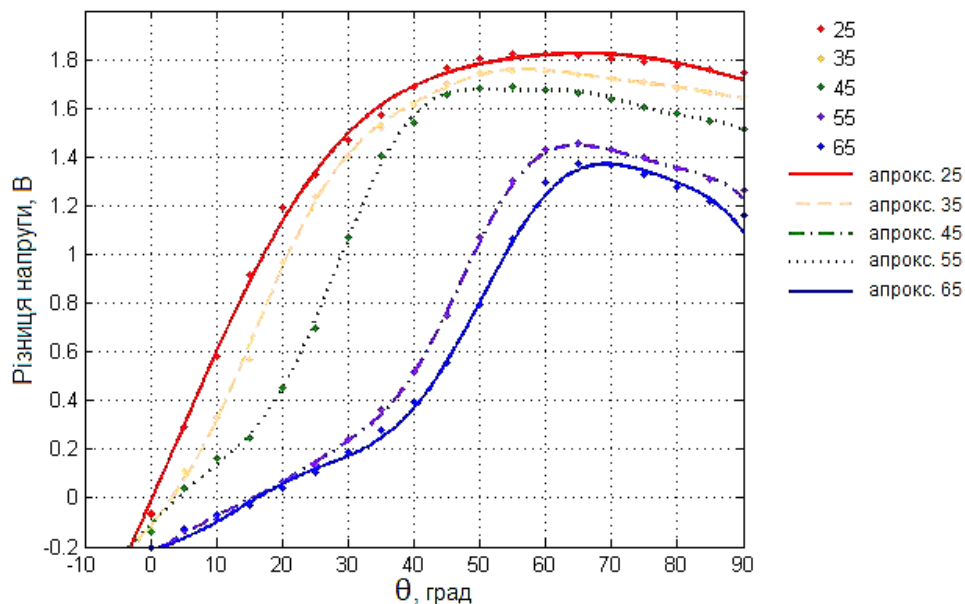
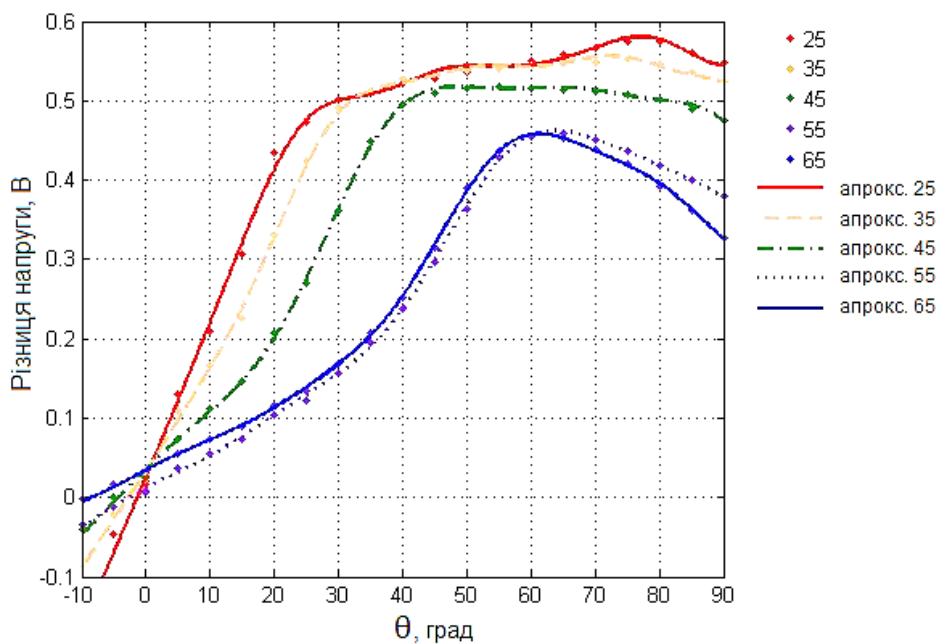


Рисунок 2.14 - Схема вимірювання різниці потенціалів

Крім того, використовувалася та ж установка, що і для фоторезисторів, і тестувалися ті ж самі кути. Зібрані дані можна побачити на графіках зображених на рис. 2.15 і 2.16.

Рисунок 2.15 - Різниця напруги в залежності від θ (тонкоплівкові фотоелектричні елементи)Рисунок 2.16 - Різниця напруги в залежності від θ (полікристалічні фотоелектричні елементи)

Лінійна частина цих графіків є найбільш сприятливою, оскільки саме на цій ділянці датчики є надійними і точними. Нахил лінійних ділянок визначає, наскільки чутливі датчики до зміни кута падіння світла. Для всіх трьох датчиків кут нахилу 25° забезпечує найбільшу лінійність і найкрутіший нахил. Обидва типи фотоелектричних елементів забезпечують більш лінійний відгук, ніж фоторезистори. Для точного визначення найкращого кандидата на роль датчика були взяті похідні наведених вище графіків на лінійній ділянці від -10° до 20° . Ці графіки можна побачити на рис. 2.17, 2.18 і 2.19.

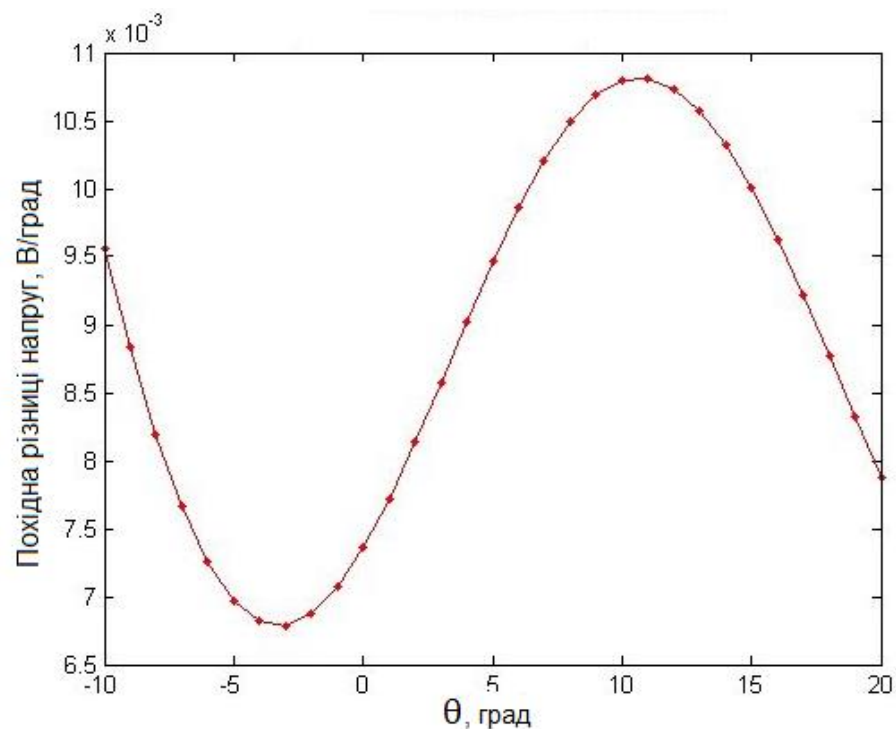


Рисунок 2.17 - Похідна різниці напруг (фоторезистори)

Очевидно, що фотодавачі не мають хороших лінійних відгуків. Однак полікристалічні фотоелектричні елементи, здається, мають найбільш плоску характеристику з майже постійним перерізом. Важливо відзначити, що тонкоплівкові фотоелектричні елементи мають найвищу кутову характеристику при максимальному значенні близько $0,0625$ В/Градус. Це пов'язано з тим, що вони мають вищу напругу холостого ходу, ніж інші два датчики.

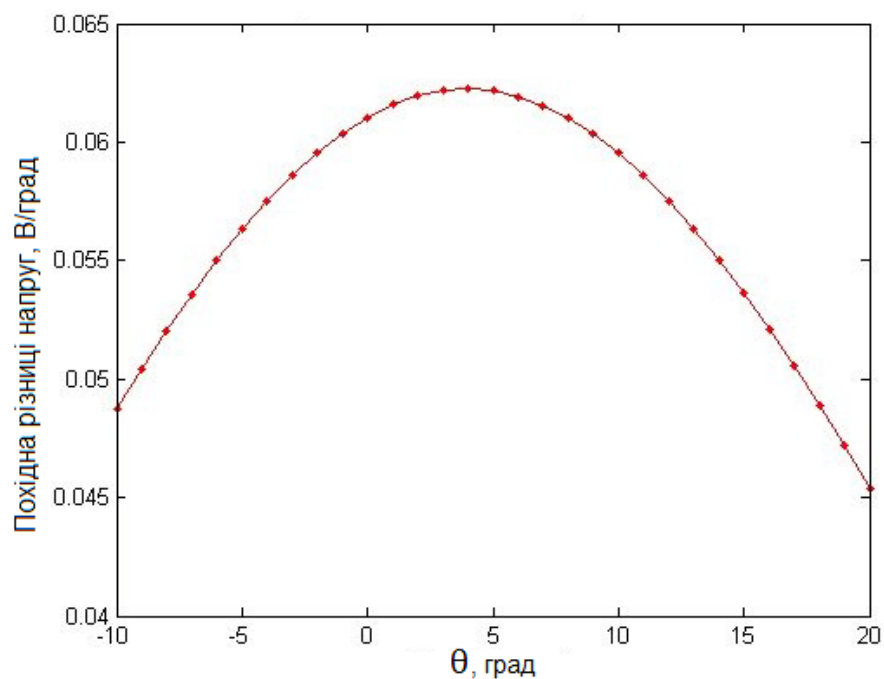


Рисунок 2.18 - Похідна різниці напруг (тонкоплівкові фотоелектричні елементи)

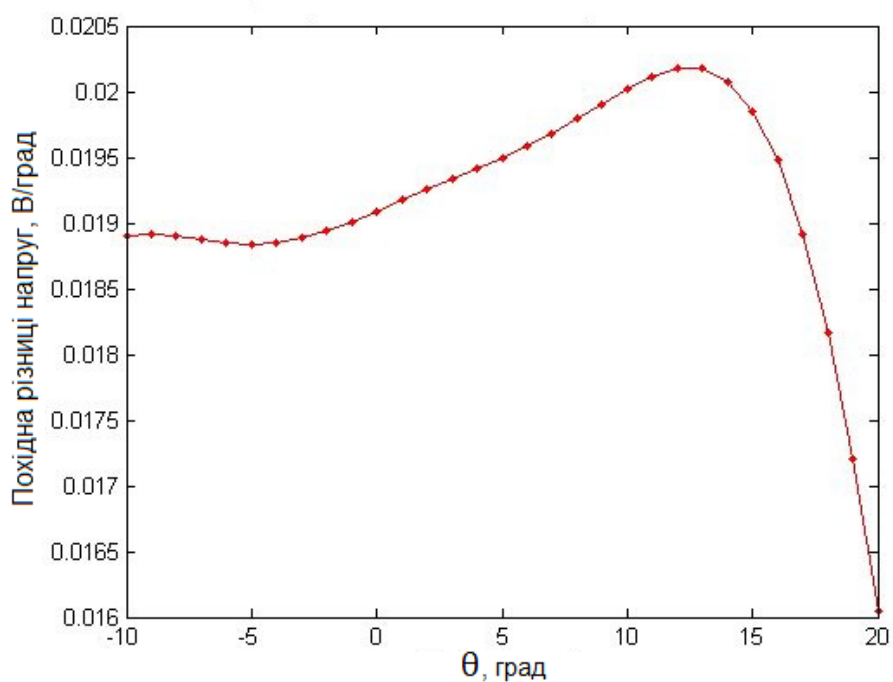


Рисунок 2.19 - Похідна різниці напруг (полікристалічні фотоелектричні елементи)

На основі цього тестування було визначено, що для отримання найбільш точного і надійного масиву датчиків слід використовувати два полікристалічні фотоелектричні датчики, нахилені під кутом 25° для використання як по осі

азимута, так і по осі висоти. Остаточний масив датчиків був сформований у вигляді акрилової чотиригранної піраміди, як показано на рис.2.20.

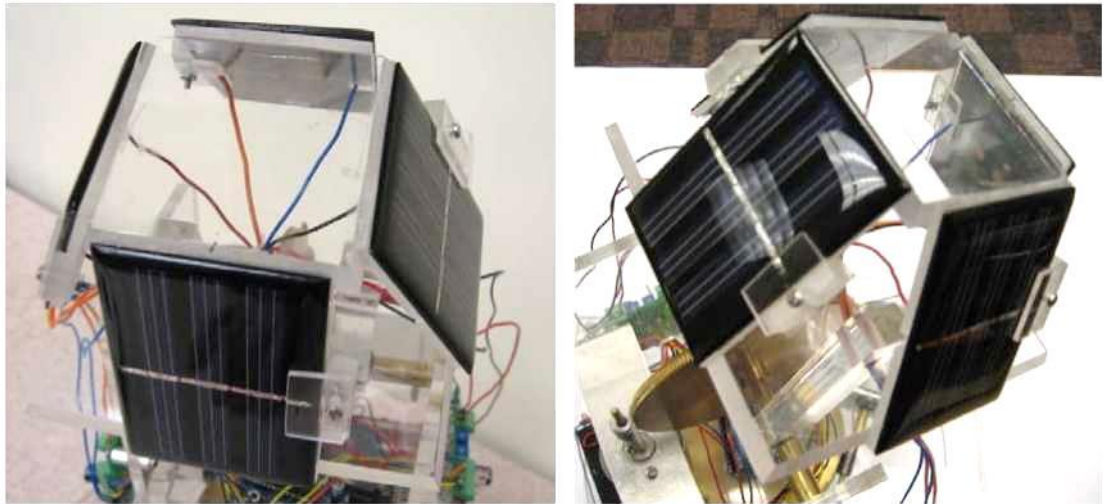


Рисунок 2.20 - Пірамідальний масив датчиків

Цілком можливо, що інші типи фотосенсорів можуть забезпечити більш бажані результати. Існують також інші методи отримання результатів диференціальної освітленості від сонячних датчиків. Ці методи розглядалися, але ніколи не були повністю протестовані. Установка і датчики, використані в цьому проекті, можливо, не дають найкращих результатів, але вони забезпечують бажані результати для цілей цього проекту.

2.3.3 Схема аналогового компаратора

Для забезпечення обробки даних від сонячних датчиків та передачі сигналу керування до Н-моста необхідно було розробити схему, яка порівнює напругу двох фотодатчиків і виводить керуючий сигнал на кожен з чотирьох MOSFET-входів Н-моста. Ця схема повинна точно вимірювати різницю напруг між фотодатчиками і забезпечувати надійні сигнали керування для Н-моста. Перша частина цієї схеми, яка визначає різницю напруг, складається з

аналогового компаратора. Друга секція, яка забезпечує керуючі входи для Н-моста, складається з логічних ключів.

Відповідно до попередньо проведених експериментів (попередній підрозділ), спочатку в якості фотодатчиків використовувалися два фоторезистори. Для отримання напруги, яка б залежала від зміни опору фоторезистора, був розроблений подільник напруги. Цей подільник напруги живився напругою 5 В, зважаючи на зручність. Для побудови подільника напруги був використаний потенціометр 100 кОм. Цей потенціометр використовується для калібрування, оскільки фоторезистори не були точно підібрані і значення було підібрано для зменшення струму через схему. На виході використано резистор 51 кОм як струмовий захист.

Два LM741 підключені до двох ділянок напруги датчика і сконфігуровані в режимі компаратора без зворотного зв'язку (рис. 2.21). LM741 - це звичайний операційний підсилювач з розсіюваною потужністю 500 мВт. Ця схема компаратора має загальну потужність розсіювання 1 Вт.

Оскільки Сонце обертається зі швидкістю 2π радіан / 24 години або $7,272 \times 10^{-5}$ рад/с, що відповідає частоті близько $1,16 \times 10^{-5}$ Гц, схема компаратора не повинна працювати з високою швидкістю перемикавання. Оскільки логічні ключі не можуть обробляти високочастотні вхідні сигнали, був розроблений фільтр нижніх частот, який пропускає приблизно 10 Гц або нижче. Дозвіл системі рухатися на більш високих частотах призводив до марної трати енергії і спричиняв ривки при відстеженні. У фільтрі використано конденсатор ємністю 1 мкФ, а для розрахунку резистора було використано наступну формулу (2.11)

$$R = 1/(2\pi \cdot 10 \text{ Гц} \cdot 1 \text{ мкФ}) = 15,9 \text{ кОм} \quad (2.11)$$

Таким чином, у фільтрі низьких частот використано резистор 15 кОм.

Вихід зі схеми компаратора не обов'язково має бути дискретним, тому для забезпечення цього було використано N-канальний MOSFET. Було обрано N-канальний MOSFET ZNN2110A, оскільки він є легкодоступним і має

розсіювану потужність 700 мВт. Оскільки для кожного компаратора було використано по два, загальна потужність розсіювання становить 1,4 Вт. Для індикації фотодавача з найвищою інтенсивністю світла були використані два червоні світлодіоди. Коли інтенсивність світла на одному фоторезисторі була більшою, відповідний світлодіод вмикався, а інший світлодіод вимикався. Коли світлове випромінювання було однаковим на обох фоторезисторах, вмикалися обидва світлодіоди. Було використано червоний світлодіод, оскільки він потребує приблизно 1,6 В, що є найнижчою необхідною напругою порівняно з іншими кольоровими світлодіодами. Червоний світлодіод потребує близько 20 мА струму, тому було обрано найближчий до нього резистор 200 Ом відповідно до наступних розрахунків.

$$R = (5 \text{ В} - 1,6 \text{ В}) / 20 \text{ мА} = 170 \text{ Ом}$$

Схему цієї комбінованої схеми показано на рис.2.21.

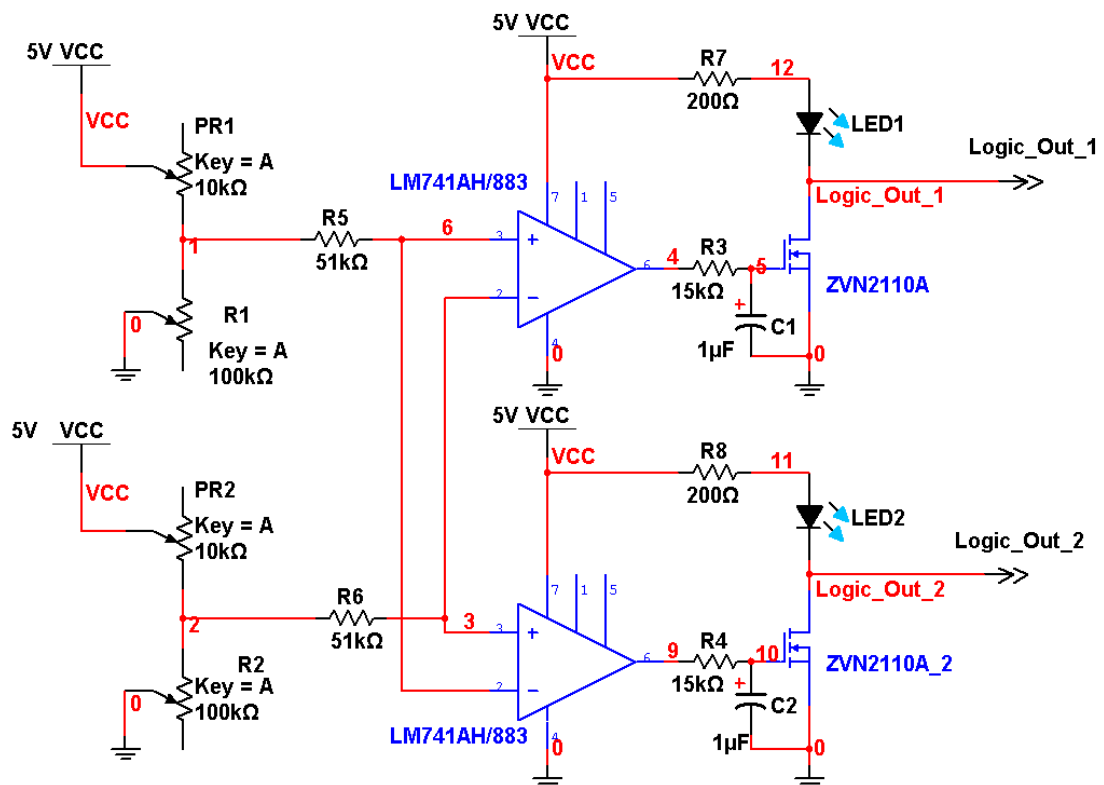


Рисунок 2.21 - Схема спроектованого аналогового компаратора

До цієї схеми компаратора було внесено кілька змін. Два операційні підсилювачі LM741 було замінено на один здвоєний операційний підсилювач

LM358. Це було зроблено для зменшення використовуваного простору і LM348 має меншу розсіювану потужність 830 мВт. Інша зміна полягала в тому, що інвертуючі входи були налаштовані на регульоване джерело напруги. Причиною цього було те, що для переведення системи в стан спокою напруга на обох фоторезисторах повинна бути абсолютно ідентичною. Без простору для утримання системи в стані спокою компаратор ніколи не досягав стаціонарного стану під час тестування зі стаціонарним джерелом світла. Третьою зміною було використання фотоелектричних елементів замість фоторезисторного дільника напруги. Джерело живлення було замінено на джерело 12 В, як описано в попередньому розділі. Цю модифіковану схему можна побачити на рис.2.22.

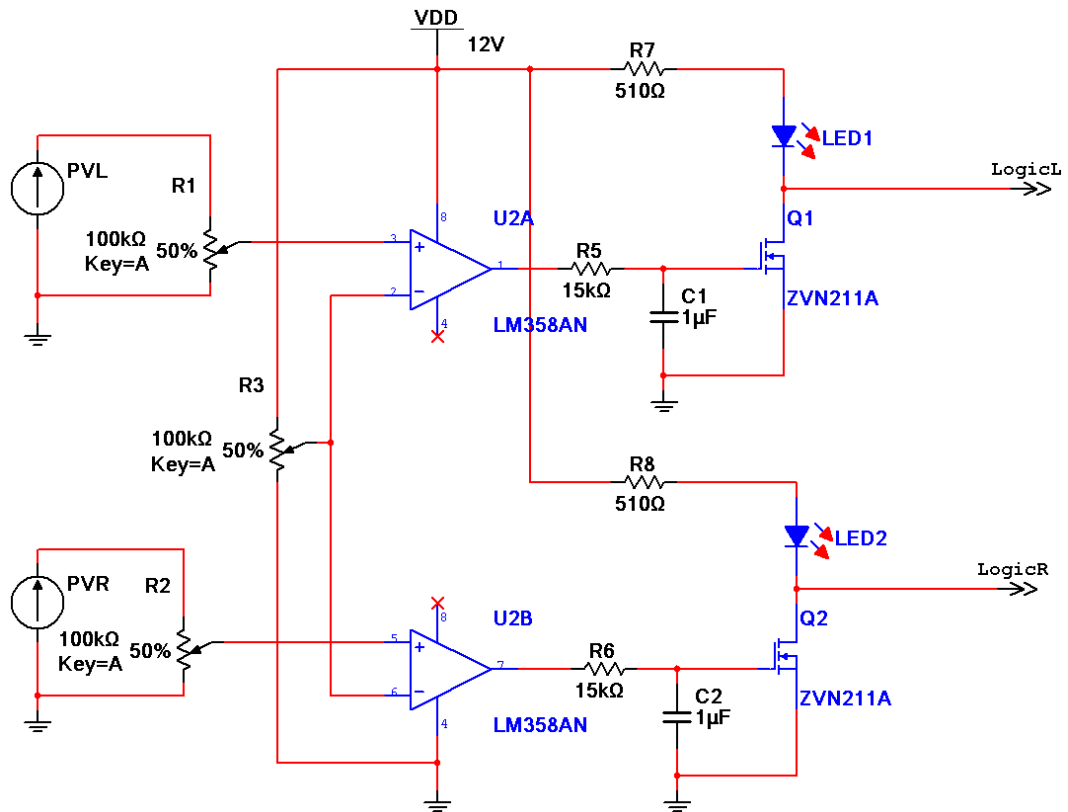


Рисунок 2.22 - Удосконалена модифікована схема аналогового компаратора

Як згадувалося раніше, Н-міст вимагає точних керуючих сигналів для кожного з чотирьох MOSFET. Однак, сконструйований вище компаратор має лише два входи, тому для отримання чотирьох входів було використано набір

логічних ключів. Коли компаратор видає два високих сигнали, що відповідає наведенню трекера на джерело світла, на виходах Р-канальних MOSFET моста повинен бути низький рівень, а на виходах N-канальних MOSFET - високий. Якщо один з датчиків показує вищу інтенсивність світла, відповідний вихід стає високим. Логічна схема повинна послати сигнал на Н-міст, щоб увімкнути Р- і N-канальні MOSFET, які відповідають повороту системи в напрямку світла. Зворотний процес відбувається для протилежного датчика. Нарешті, коли обидва датчики видають низьке значення, що неможливо, але все одно потрібно було передбачити, Н-міст потрібно було вимкнути так само, як і тоді, коли на виході обох датчиків високі значення. Таблиця істинності для необхідної логіки наведена в таблиці 2.3. Виходи 1 і 2 відповідають входам Р-каналу, а виходи 3 і 4 - входам N-каналу. Виходи 1 і 3 підключаються до одного боку Н-моста, а виходи 2 і 4 - до іншого.

Таблиця 2.3 - Логічна таблиця компаратора

Давач L	Давач R	Вихід 1	Вихід 2	Вихід 3	Вихід 4
0	0	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	1

Працюючи у зворотному напрямку від таблиці істинності, було створено схему, показану на рис.2.23. У ній використано комбінацію інверторів, вентилів АБО та І. Спочатку для цієї схеми були використані широко доступні мікросхеми ТТЛ-логіки серії 7400. Однак вони обмежували живлення до 5 В, що було неприйнятно для живлення двигуна. Ці вентиля були замінені на логічні вентиля серії 4000, які можуть працювати при напрузі живлення до 15 В, що перевищує напругу живлення 12 В. Використовувані логічні вентиля серії 4000 мають типову розсіювану потужність 700 мВт.

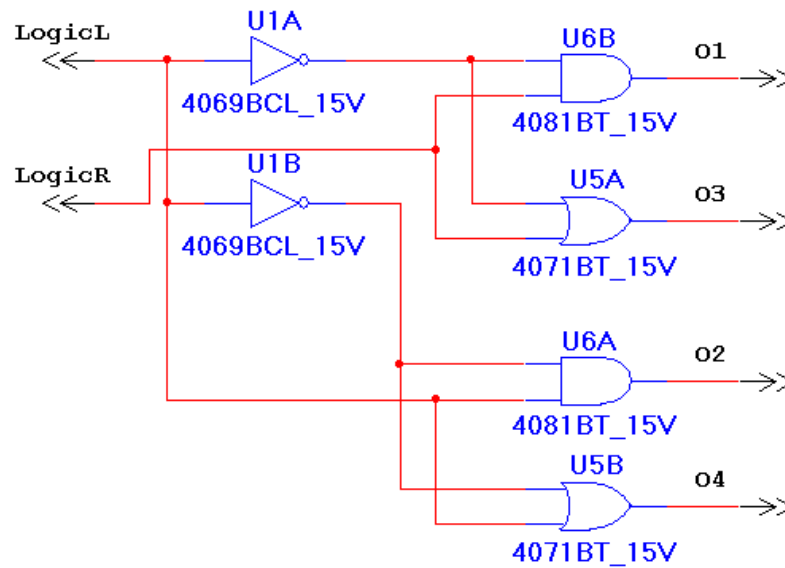


Рисунок 2.23 - Логічна схема

2.3.4 Цифрова система керування

Через недоліки, притаманні аналоговій системі керування, було також протестовано цифрову систему керування на основі мікроконтролера. Мікроконтролер дозволив мінімізувати складність схеми керування, зменшити енергоспоживання і дозволив ввести додаткові функції в трекер.

Обраний мікроконтролер повинен був мати щонайменше чотири входи аналого-цифрового перетворювача (АЦП), щоб приймати чотири сигнали від чотирьох датчиків. Він також повинен був мати щонайменше вісім цифрових виходів, по чотири для обох Н-подібних мостів двигуна. Також, використовуваний мікроконтролер повинен був мати дуже низьке енергоспоживання в активному стані, щоб підтримувати ефективність на максимально високому рівні. Найбільш доступними мікроконтролерами, які задовольняють цим вимогам, були мікроконтролери AVR або PIC.

Для нашого прототипу було обрано плату для розробки мікроконтролера AVR під назвою Arduino Duemilanove. Використовувана версія має мікроконтролер ATmega 328P, який має шість входів АЦП і 14 цифрових вихідних виводів, шість з яких можуть підтримувати ШІМ-вихід. Плата також

має вбудований регулятор живлення, який може приймати 12В живлення безпосередньо для подачі 5В, необхідних мікроконтролеру. АЦП має 10 біт і працює в діапазоні 5 В з роздільною здатністю $V_{Res} \sim 4,88$ мВ [11,12]. Це означає, що між датчиками може бути максимум половина цього значення, або 2,44 мВ, перш ніж мікроконтролер зможе виявити зміну. Знаючи, що використані сонячні модулі мають максимальну напругу в розімкнутому стані 1,44 В і припускаючи лінійну залежність між інтенсивністю світла і виробленою напругою, роздільна здатність за кутом, яку може забезпечити мікроконтролер, становить

$$\theta_{Res} = \cos^{-1} 1.44 - 0.5V_{Res} / 1.44 = 3.336^{\circ} \quad (2.12)$$

Враховуючи максимальну похибку 180° , це дає системі похибку 1,853%.

ШІМ-виходи мікроконтролера, зокрема, дозволили відмовитися від зовнішнього ШІМ-генератора, який використовувався в аналоговій системі, для більш енергоефективного та централізованого контролера. Іншою важливою причиною вибору саме цієї плати був вбудований програматор, який дозволив швидко створювати прототипи під час тестування різних функцій системи. У майбутньому цю плату можна буде замінити на мікроконтролер з аналогічними входами і виходами, але з меншим енергоспоживанням і без зайвих схем, що містяться на платі.

Функція мікроконтролера полягає в тому, щоб порівнювати рівні напруги двох датчиків для однієї осі обертання і надсилати відповідний сигнал на Н-міст для переміщення двигуна в певному напрямку. Щоб зменшити джиттер системи, мікроконтролер бере два значення напруги датчиків і знаходить різницю між ними. Різниця порівнюється з деяким еталонним значенням. Якщо вона більша за додатне еталонне значення, мікроконтролер надсилає сигнал на Н-міст, щоб перемістити трекер в одному напрямку. Якщо різниця менша за від'ємне опорне значення, мікроконтролер надсилає сигнал на переміщення трекера в протилежному напрямку. Встановлення опорного значення на нуль зменшить похибку до мінімуму, але це також призведе до значного джиттера, коли тінь проходить над датчиками. Встановлення опорного значення,

більшого за нуль, дозволяє врахувати деякий гістерезис у трекері, але також збільшує похибку. Наприклад, встановлення опорного значення 5 означає, що максимально допустима різниця між двома датчиками становить $5 \times 4,88 \text{ мВ} = 24,4 \text{ мВ}$. Якщо врахувати різницю кутів між трекером і сонцем, то ця різниця напруги відповідає кутовій різниці $0,9945^\circ$, що становить $0,553\%$ допустимої похибки.

Крім того, мікроконтролер перевіряє напругу на виході датчиків щодо нічних умов. Якщо значення відповідають нічним, трекер вимикає все, крім мікроконтролера, щоб зменшити енергоспоживання. Це також дозволяє уникнути проблеми фокусування трекера на найближчому нічному джерелі світла, такому як вуличний ліхтар або будівля.

Код, який використовується для програмування мікроконтролера, наведено в Додатку В

2.4 Висновки до розділу

1. Сформовано блок-схему двохосного сонячного трекера.
2. Обрано двигуни для приведення в рух механізму трекера. Проведено дослідження характеристик обраного двигуна.
3. Спроектовано та розраховано номінали основних елементів блоку живлення та блоку керування двигуном.
4. Для забезпечення точного та надійного стеження сонця розроблено давач сонця. Проведено тестування роботи давача положення сонця на основі фото резисторів. Поряд з фоторезисторами було протестовано два інших типи датчиків. Окремо тестувалися два тонкоплівкові фотоелементи та два полікристалічні фотоелементи.
5. Для забезпечення обробки даних від сонячних датчиків та передачі сигналу керування до Н-моста розроблено схему, яка порівнює напругу двох фотодатчиків і виводить керуючий сигнал на кожен з чотирьох MOSFET-входів Н-моста.

6. Через недоліки, притаманні аналоговій системі керування, було також протестовано цифрову систему керування на основі мікроконтролера. Мікроконтролер дозволив мінімізувати складність схеми керування, зменшити енергоспоживання і дозволив ввести додаткові функції в трекер.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційне моделювання системи стеження за сонцем

Після того, коли було вирішено як реалізувати кожен з основних компонентів трекера, виконано загальну симуляцію системи та запропоновано остаточний прототип трекера. Механічні компоненти склалися з двигунів постійного струму, черв'ячних редукторів та масиву датчиків сонячних елементів, кожен з яких описаний вище. Електрично трекер використовує мікроконтролер Arduino, схему Н-моста та акумуляторні батареї для живлення.

Щоб зрозуміти, як працюватиме система стеження, перш ніж вона буде побудована, було створено ідеальну симуляцію для однієї осі обертання. Була змодельована лише одна вісь, оскільки в ідеальних умовах обидві осі працювали б однаково. Середовищем для моделювання обрано MATLAB, оскільки він може більш точно імітувати процеси мікроконтролера, ніж PSPICE або Multisim.

Першою частиною моделювання був збір специфікацій системи. Основна частина симуляції буде базуватися на точному представленні того, як датчики працюють протягом дня. Остаточно використані панелі мали приблизну максимальну напругу холостого ходу 1,44 В, що було підтверджено під час тестування. Кут між тильними сторонами модулів становить 25° , що означає, що кут між нормальними до граней модулів, позначений як гамма (γ), дорівнює 155° . Якщо кут нахилу сонця до деякої точки відліку позначити як альфа (α), то напруга на одній сонячній панелі може бути ідеально представлена у вигляді рівняння (3.1).

$$\begin{aligned} V_{PVI} &= 0,72 \cos(\alpha + \gamma/2) + 0,72V; \\ V_{PVI} &= 0,72 \cos(\alpha + 77,5^\circ) + 0,72V. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Напруга на протилежній панелі в ідеалі може бути представлена у зворотному вигляді (3.2)

$$V_{PV2} = 0,72 \cos(\alpha - 77,5^\circ) + 0,72V. \quad (3.2)$$

Оскільки косинус є парною функцією, різниця напруг між двома панелями дорівнюватиме нулю при $\alpha = 0^\circ$. Щоб врахувати кутове положення трекера (p) відносно тієї ж точки відліку, що і сонце, рівняння були модифіковані наступним чином (3.3).

$$\begin{aligned} V_{PVI} &= 0,72 \cos((\alpha - p) + 77,5^\circ) + 0,72V; \\ V_{PV2} &= 0,72 \cos((\alpha - p) - 77,5^\circ) + 0,72V. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Тепер, знаючи кут нахилу сонця і трекера, можна розрахувати напругу на панелях.

Далі, потрібно розрахувати швидкість двигуна. Поставивши двигун під навантаження і змінюючи величину ШІМ, ми отримали найнижчу ефективну швидкість приблизно при 17 % робочому циклі. При меншій частоті обертання двигун не зміг би рухати трекер. Виміряна швидкість при 100 % робочому циклі становила 5098,2 об/хв або 530,74 рад/с. Враховуючи робочий цикл і передавальне число редуктора 180:1, швидкість трекера становить приблизно 0,5203 рад/с.

Для моделювання було створено п'ять векторів. Перший вектор - це вектор часу, щоб показати перехідний характер системи. Другий - це вектор, який позначає кутове положення Сонця на протязі вектора часу. Швидкість, з якою сонце змінює своє положення, можна приблизно обчислити як 360° за добу або $7,272 \times 10^{-8}$ рад/мс. Вектор положення спочатку встановлюється в точці відліку і змінюється в процесі моделювання. Останні два вектори - це напруги на панелях у часі. Кожен з них розраховується на основі поточного положення сонця і положення трекера.

Симуляція пропускає зміну положення сонця через рівняння сонячних панелей, щоб отримати напругу на панелях у поточному положенні. Імітуючи мікроконтролер, різниця між двома напругами порівнюється з деяким

еталонним значенням, яке можна змінювати. Якщо різниця більша за еталонне значення або менша за від'ємне, симуляція збільшує вектор положення зі швидкістю трекара, 0,5203 рад/с у напрямку, що відповідає тому, який датчик отримує більше випромінювання. Якщо різниця між додатнім і від'ємним значенням опорного сигналу дорівнює нулю, позиція залишається незмінною.

Після того, як симуляція працює протягом заданого часу, створюється останній вектор - вектор похибки. Похибка - це різниця між сонцем і трекаром. Цей вектор був перетворений в градуси для зручності читання.

Використовуючи еталонне значення $5 * 4,88 \text{ мВ} = 24,4 \text{ мВ}$, γ в радіанах, яка становить 2,7053 рад і швидкість 0,5203 рад/с, симуляція будує графіки напруги на панелях (рис.3.1), положення сонця і трекара поруч один з одним, а також похибку трекара протягом 500 секунд:

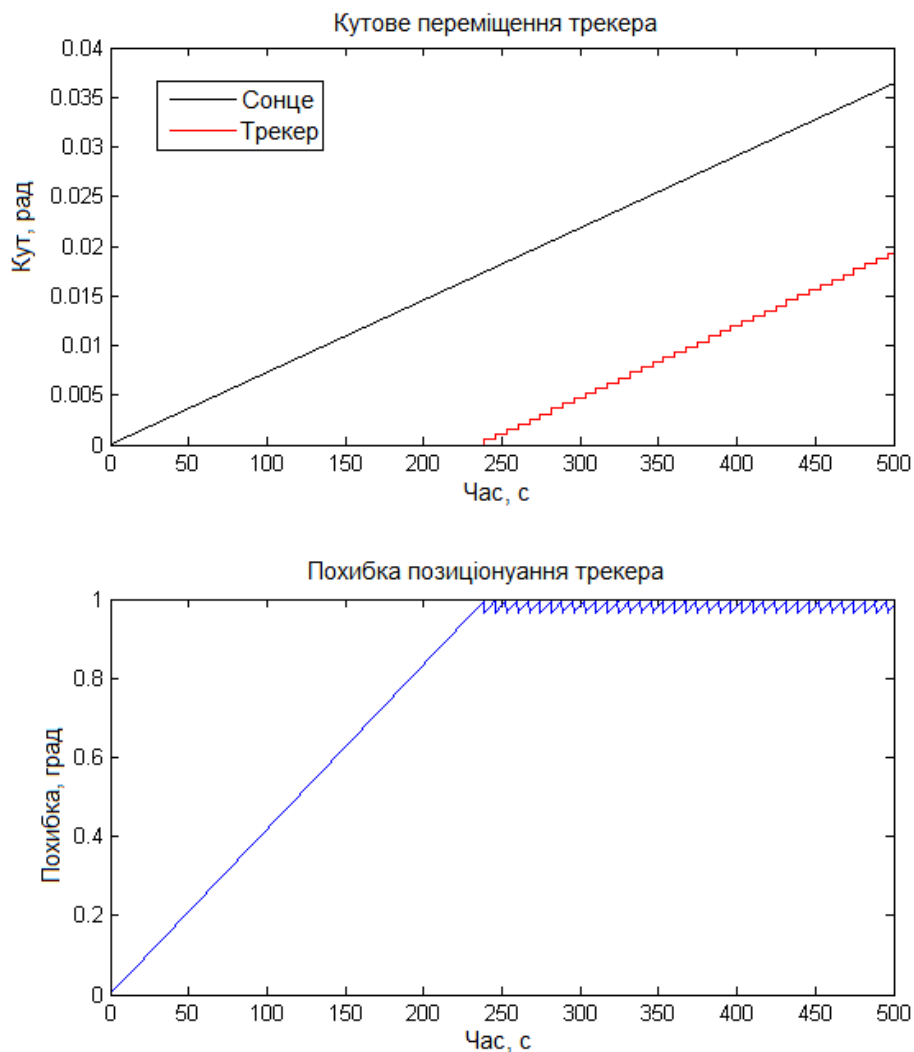


Рисунок 3.1 - Результати моделювання протягом 500 секунд

Моделювання показує, що в ідеальній ситуації одна вісь трекера працює як очікувалося. Він слідує за сонцем і зберігає положення не більше, ніж приблизно на 1° від сонця. Однак рух трекера відбувається з невеликим кроком. Збільшивши масштаб до інтервалу в 15 секунд, на графіках (рис. 3.2) видно сходинки.

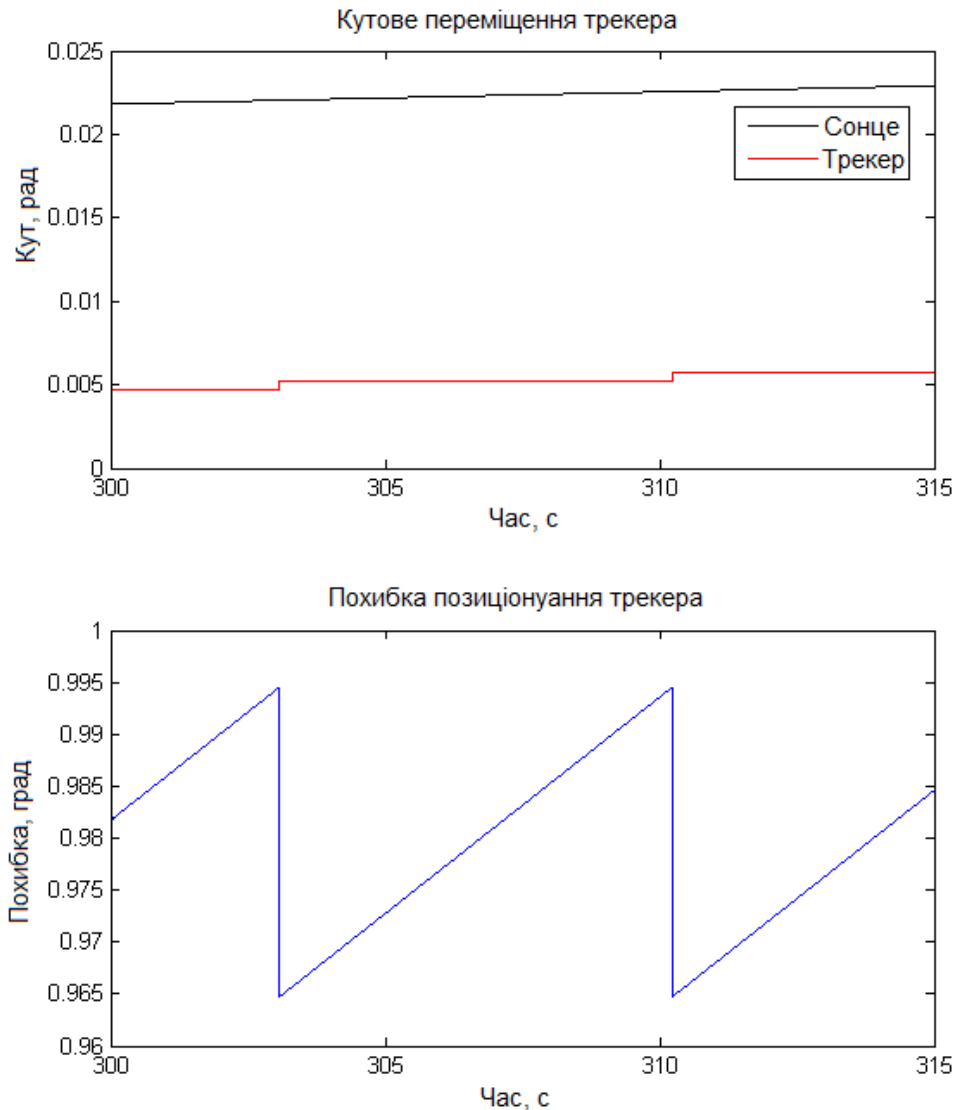


Рисунок 3.2 - Результати моделювання за 15 секунд

На цих збільшених графіках видно, що трекер змінює своє положення приблизно кожні 7 секунд. Це результат того, що трекер формує "безпечну зону", яка знаходиться на відстані $0,9945^\circ$ від положення сонця. Коли трекер знаходиться в цій безпечній зоні, система перебуває в рівновазі і трекер не рухається. Коли сонце виходить за межі безпечної зони, трекер бачить помилку і реагує на неї, вмикаючи двигун у тому напрямку. Двигун розкручує трекер

назад у безпечну зону і рухається швидше, ніж трекер може реагувати, тому він переміщує його приблизно на $0,965^\circ$ від сонця, що знаходиться в межах безпечної зони. Після цього трекер перебуває в рівновазі, доки сонце знову не відійде занадто далеко, і цикл повторюється.

Щоб вивчити внутрішню роботу трекера, найкраще також подивитися, як реагує напруга на панелі з плином часу. Модифікувавши код симуляції для виведення напруг на сонячних панелях, а також різниці між ними протягом інтервалу в 15 секунд, ми отримали наступний результат (рис. 3.3).

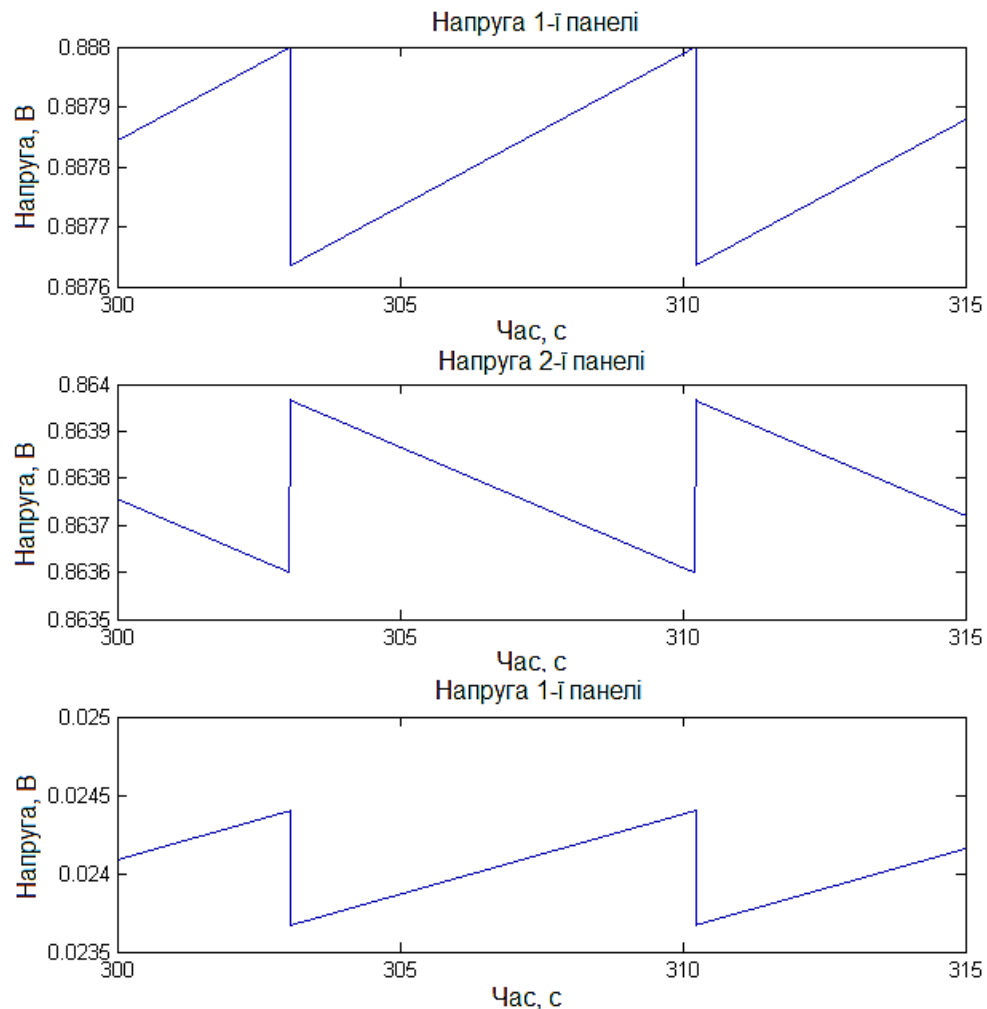


Рисунок 3.3 - Напруги панелей за 15 секунд моделювання

Панель 1 - це датчик, який знаходиться найближче до сонця під час цієї симуляції. Якщо змінити напрямок руху сонця, то ближчою буде панель 2. Тому симуляція правильно показує, що при русі сонця напруга на панелі 1 зростає, а напруга на панелі 2 зменшується. Різниця між ними повільно зростає,

поки не досягне 24,4 мВ, після чого трекер починає рухатися. Ступінчасті результати все ще є ефектом швидкості двигуна, описаним вище.

Моделювання показує чудові результати, які майже точно корелюють з теоретичними розрахунками, зробленими до початку проекту. Код MATLAB для цього моделювання наведено в Додатку В. Після перевірки результатів моделювання, наступним кроком було створення робочого прототипу для вимірювання фактичних результатів і порівняння їх з теоретичними.

3.2 Конструкція

Остаточний дизайн системи складається з механічної збірки, виготовленої з прозорого акрилу для демонстрації внутрішньої роботи системи, алюмінієвих, сталевих і латунних деталей для кріплення осі, шпинделя і двигуна, а також електричної системи управління, яка складалася з плати розробки мікроконтролера і двох виготовлених друкованих плат для Н-міста та інших схем. Живлення трекера подається від 8 лужних батарей по 1,5 В для отримання необхідної напруги 12 В і контролюється за допомогою однополюсного перемикача живлення (SPST).

Друкована плата була розроблена таким чином, щоб розмістити схему на якомога меншій площі. На ній розміщені Н-міст для двигуна, потенціометри для балансування сигналів від сонячних панелей і два індикаторні світлодіоди, що використовуються для пошуку та усунення несправностей в системі. Оскільки вимоги до обох осей трекера ідентичні, друкована плата була спроектована для однієї осі, а виготовлена для двох. Це дозволило зменшити розмір плати, а також гарантувало, що у випадку несправності не потрібно буде виготовляти цілу нову плату. Макет друкованої плати показано на рис.3.4.

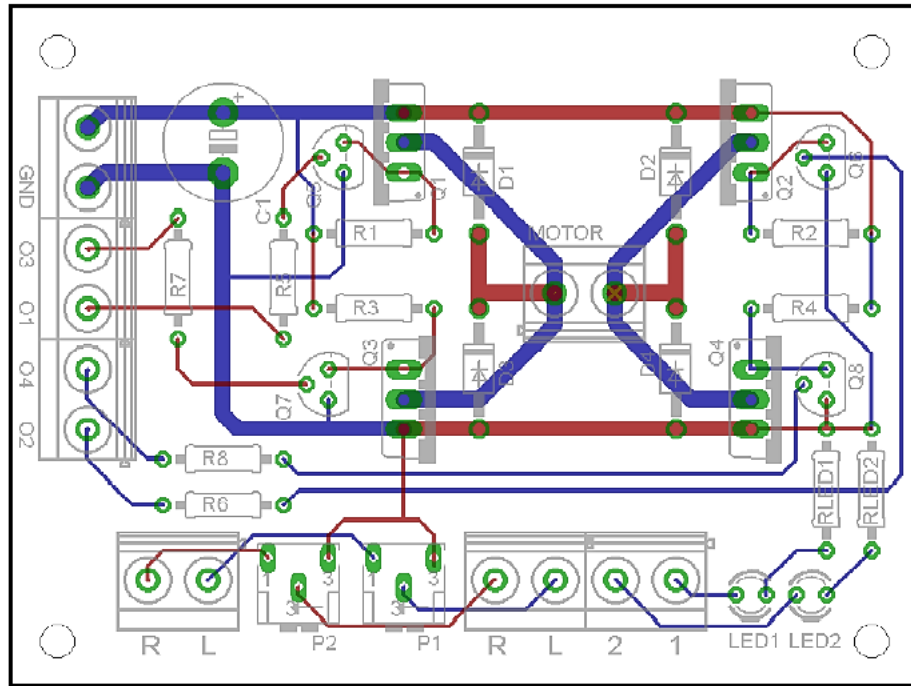


Рисунок 3.4 – Розташування елементів на друкованій платі

3.3 Результати тестування функціональності

Після того, як прототип був побудований, він пройшов кілька тестів на функціональність, щоб переконатися, що він відповідає початковим вимогам проекту. Було виміряно кутову похибку та енергоспоживання трекера, щоб розрахувати вироблення електроенергії трекером у порівнянні з іншими системами сонячних панелей.

3.2.1 Кутова похибка

Першим випробуванням прототипу було вимірювання кутової різниці між джерелом світла і центром трекера, так званої кутової похибки. Для цього вісь висоти трекера була відключена шляхом вимкнення живлення Н-містка. Вісь висоти також була орієнтована під кутом 90° так, щоб азимутальні датчики були перпендикулярні до джерела світла. Потім, виходячи з цього, був знайдений і позначений точний центр трекера шляхом вимірювання до точного

центру масиву датчиків і перенесення цього центру на нижню пластину за допомогою маятника.

Випробувальна установка складалася з галогенної лампи потужністю 100 Вт на тій самій висоті, що й датчики, і трималася на відстані 45" від трека за допомогою балки. На одному кінці балки була насічка, щоб вона могла обертатися навколо тієї ж осі, що і трекер..

Для цього тесту центр трека був зорієнтований на початкову точку і вимкнений. Підсвічування було встановлено на позначці 0° на транспортірі так, щоб похибка перед увімкненням трека дорівнювала його початковому положенню в градусах. Потім трекер вмикали і уважно спостерігали за його рухом до світла. Помітні особливості руху полягали в тому, чи не "проскочив" трекер повз світло, чи не пройшов він 0° , чи не вібрував трекер, коли наближався до світла, і чи досягнув він взагалі стаціонарної точки. Якщо трекер досягав стаціонарної точки, записувався кут різниці, і тест повторювався для того ж стартового кута в протилежному напрямку.

Перший тест був проведений з початковою точкою 45° , мікропроцесорний еталон був встановлений на 5, що означає допустиму різницю $\sim 24,4$ мВ між панелями, а величина ШІМ двигуна була встановлена на 210, що означає зниження швидкості на 17,65 %. Коли трекер був встановлений прямо на лінії світла, лівий датчик на вході мікроконтролера показав 0,852 В, а правий - 0,862 В. Починаючи рух проти годинникової стрілки, умовно названий від'ємним напрямком, від світла під кутом 45° , трекер вийшов у стаціонарний стан з кутовою похибкою $2,5^\circ$, не дотягнувши до джерела світла. Починаючи рух за годинниковою стрілкою (позитивний напрямок) від світла, трекер вийшов в стаціонарне положення без помітної кутової похибки до світла.

Збільшивши початкову точку до 75° в обох напрямках, кутова похибка змінилася до 3° , не доходячи до світла, що виходить від $+75^\circ$. Вийшовши з точки -75° , трекер фактично перевищив світло на 1° . Ця помилка, очевидно, пов'язана з невідповідністю між напругами двох сонячних модулів у датчику, що надходять на мікроконтролер.

Відрегулювавши напругу на мікроконтролері за допомогою потенціометрів на платах, лівий датчик показав напругу 0,843 В, а правий - 0,848 В, що фактично вдвічі зменшило різницю в напрузі між двома датчиками. Знову ж таки, вимірюючи кутову похибку з трекером, що починається під кутом $\pm 75^\circ$ до світла, похибка була на $0,5^\circ$ меншою, ніж для світла, що надходило під кутом -75° . Якщо починати під кутом $+75^\circ$, похибка становила $1,5^\circ$ до світла.

Слід зазначити, що навіть якщо панелі не були точно підігнані, загальна кутова похибка, розрахована шляхом додавання похибок в обох напрямках, становила близько 2° , що тісно корелює з результатами моделювання похибки в 1° в обох напрямках.

Щоб оцінити поведінку трекера при значній похибці датчиків, потенціометри були налаштовані таким чином, щоб лівий датчик видавав 0,622 В, а правий - 0,735 В. Починаючи з $+75^\circ$, трекер повертався вправо і ніколи не досягав стаціонарного стану. Це було б особливо небезпечно для осі висоти, де масив датчиків не має зазору для повороту на всі 360° .

Зменшивши різницю між датчиками так, щоб лівий датчик видавав напругу 0,744 В, а правий - 0,771 В, було виконано той самий тест. Починаючи з $+75^\circ$, трекер зупинився за 9° до джерела світла. При русі від -75° трекер зупинився на відстані $5,5^\circ$ від джерела світла. Це свідчить про те, що невірне калібрування не тільки збільшує кутову похибку в обох напрямках обертання, але й збільшує загальну кутову похибку трекера, утримуючи його в межах $4,5^\circ$ від джерела світла.

3.4 Енергоспоживання

Щоб переконатися, що система стеження насправді виробляє більше енергії, ніж споживає, були проведені вимірювання енергоспоживання кожного окремого компонента системи. Один резистор 0,49 Ом (виміряне значення)

використовувався як силовий шунт для вимірювання струму, що йде від акумулятора до системи стеження, як показано на схемі на рис. 3.5.

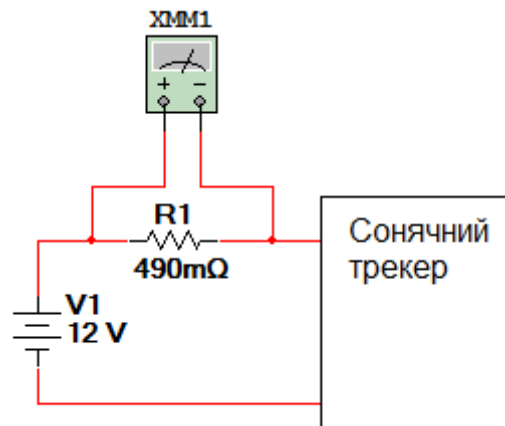


Рисунок 3.5 Схема тестування енергоспоживання

Напруга, виміряна вольтметром VR1, поділена на опір, дає струм, що надходить до трекара. Помноживши струм на напругу живлення, 12 В, можна розрахувати споживану потужність.

Було проведено кілька вимірювань, щоб знайти індивідуальне споживання струму кожною секцією системи. Перші вимірювання були проведені для всієї системи, з шунтом між акумулятором і рештою системи. Струми вимірювалися, коли система була нерухомою, одна вісь рухалася, інша вісь рухалася і обидві осі рухалися одночасно. Щоб змусити рухатися лише одну вісь, входи датчиків на мікроконтролері були неправильно зміщені, щоб система бачила різницю і намагалася її виправити. Для вимірювання напруг під час руху системи було взято найбільше спостережуване значення. Результати можна побачити в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Загальне енергоспоживання системи

	Струм (мА)	V_{RI} (мВ)	Потужність
Стационарний	39,59	19,4	0,48
Вісь висоти рухається	200,0	98,0	2,40
Вісь азимута рухається	300,0	147,0	3,60
Обидві осі рухаються	400,0	196,0	4,80

З цих результатів можна зробити наступні висновки. Мікроконтролер, всі чотири індикаторні світлодіоди і струм спокою Н-мостів споживають 0,48 Вт, коли система нерухома. Вісь висоти споживає $2,40 - 0,48 = 1,92$ Вт при переміщенні датчиків через точку максимального навантаження або коли датчики розташовані паралельно землі. Вісь азимута споживає $3,60 - 0,48 = 3,12$ Вт в точці максимального навантаження, що визначається тертям в механічній частині. Загальна потужність споживання в точці максимального навантаження дорівнює $0,48 + 1,92 + 3,12 = 5,52$ Вт. Різниця між цією величиною і виміряною пояснюється тим, що трекер не проходить через обидві точки максимального навантаження одночасно.

Ці вимірювання показують, що енергоспоживання, коли система не рухається, становить трохи менше 0,5 Вт, а коли система рухається по обох осях, у найгіршому випадку, вона споживає 5,52 Вт.

3.5 Висновки до розділу

1. Азимутально-висотний двовісний сонячний трекер, спроектований в рамках цього проекту, має явну перевагу над нерухомими і одновісними системами стеження. Створений трекер має максимальну кутову похибку щодо сонця $1,5^\circ$ в обох осях руху. Це значення забезпечує виграш в генерації енергії в 49 % порівняно з нерухомою сонячною панеллю, якщо припустити, що сонячні панелі, встановлені на трекері та нерухомій системі, є ідентичними панелями потужністю 20 Вт.

2. Тестування показало, що потужність, яку використовувала побудована система стеження, була набагато меншою, ніж потужність, отримана завдяки точному відстеженню сонця. Це означає, що якби система стеження заряджала власні батареї, вона була б повністю самодостатньою, за винятком технічного обслуговування.

3. На основі моделювання, результатів тестування та аналізу результатів можна стверджувати, що даний проект досягнув поставленої мети. Однак, щоб

підвищити ефективність запропонована конструкція двоосного трекара визначено ряд рекомендацій для подальшого вдосконалення конструкцій сонячних трекерів.

4. У трекара є кілька недоліків. Однак багато з цих недоліків можна усунути шляхом внесення певних змін у конструкцію.

5. Джерело живлення у проекті не є ідеальним для реального виробництва. В ідеалі слід використовувати батарею, яка є дуже доступною в усіх країнах, наприклад, невелику герметичну свинцево-кислотну або автомобільну батарею. Ця батарея може бути використана подвійно: як джерело живлення для трекара і для зберігання енергії від сонячної панелі (панелей), підключених до трекара. Використання акумулятора для зберігання енергії вимагатиме розробки надійної системи зарядки. Крім того, в ідеалі в цю систему слід інтегрувати трекер максимальної потужності (MPPT). MPPT - це ефективний перетворювач постійного струму в постійний, який дозволяє отримати максимальну потужність від сонячної панелі (панелей) в будь-який момент часу. Дослідження повинні бути зосереджені на розробці MPPT і пошуку найбільш підходящої батареї.

6. Функції мікропроцесора, що використовуються, досить прості і стосуються лише номінальних умов. Як згадувалося раніше, хмари і перешкоди можуть призвести до значного зміщення. Одним із способів усунення цієї похибки є обчислення приблизного положення сонця за допомогою алгоритму, що базується на місцезнаходженні та часі, а потім використання масиву датчиків для зменшення похибки до мінімуму. Другий спосіб вирішити цю проблему - перевіряти лише кут нахилу сонця і налаштовувати трекер раз на кілька хвилин або близько того. Ще однією можливою функцією, яку міг би забезпечити мікроконтролер, є автоматичне калібрування сонячних датчиків. Як показало тестування, неправильно відкалібровані датчики можуть призвести або до поганого стеження, або до того, що система не досягне стану рівноваги. Це може бути реалізовано за допомогою внутрішньої компенсації через

програмування або за допомогою потенціометрів з цифровим керуванням для зовнішньої компенсації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Вступний інструктаж проводиться [13]:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві.

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами

або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних

об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки

технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [14].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, токопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотику людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для

ремонтнопрофілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час

На основі всебічного аналізу факторів, що впливають на стійкість роботи об'єктів енергетики, робляться висновки про ймовірність виникнення аварій, стихійних лих, терористичних актів та їх впливу на виробничу діяльність і визначаються основні напрямки (шляхи) підвищення стійкості функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу [15]:

1. Забезпечення надійного захисту робітників та службовців від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих і засобів ураження
2. Захист основних виробничих фондів від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих та засобів ураження, в тому числі і від вторинних вражаючих факторів;
3. Забезпечення стабільності і безперервності управління виробництвом та ЦЗ;
4. Забезпечення надійності постачання об'єкта енергоносіями.

Для надійного функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях завчасно організовуються і проводяться заходи, спрямовані на підвищення стійкості їх роботи. До них відносяться:

1. Інженерно-технічні заходи (ІТЗ).
2. Технологічні заходи.
3. Організаційні заходи.

Інженерно-технічні заходи – заходи, спрямовані на забезпечення підвищення стійкості будівель, споруд, обладнання, енергетичних систем до впливу НС.

Технологічні заходи – заходи, спрямовані на здійснення підвищення стійкості шляхом зміни технологічного режиму, що виключає виникнення вторинних факторів ураження.

Організаційні заходи – заходи, спрямовані на завчасну розробку і планування дій керівного складу, особового складу, штабу ЦЗ, служб, невоснізованих формувань об'єктів енергетики в умовах надзвичайних ситуацій.

Основними напрямками підвищення стійкості функціонування є наступне:

- забезпечення захисту населення і його життєдіяльності;
- раціональне розміщення виробничих сил та потужностей на території об'єкта енергетики, регіону;
- підготовка до роботи в умовах НС мирного та воєнного часу;
- підготовка до виконання робіт по відновленню об'єктів в умовах НС;
- підготовка системи управління.

Всі ці заходи повинні забезпечити максимально можливе зниження втрат і руйнувань та зменшити можливість виникнення повторних зон зараження при впливі РР, ОР та НХР. Зміст таких заходів, виходячи з галузевих і інших нормативних документів, конкретизується для кожної територіальної ланки..

Ми знаємо, що електропостачання є основою всякого виробництва. Для забезпечення надійного електропостачання в НС при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із завдань цивільного захисту:

1. Електропостачання повинно здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива.
2. Великі електростанції слід розміщувати одну від одної і від великих міст на значних відстанях.
3. Районні понижуючі підстанції, диспетчерські пункти енергосистем та лінії електропередач необхідно розміщувати розсереджено і надійно захищати.
4. Постачання електроенергією великих міст слід передбачати від двох незалежних джерел.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати рухливі електростанції

на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не включені до енергосистеми. Система електропостачання повинна мати грозозахисту систему та захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

Енергетичні споруди та електричні мережі повинні проектуватися з урахуванням забезпечення стійкого електропостачання категорійних міст і об'єктів. Схема електричних мереж енергосистем при необхідності повинна передбачати можливість автоматичного розподілу енергосистеми на збалансовані, незалежно працюючі частини. При проектуванні енергетичних систем і їхнього об'єднання теплові (конденсаційні) електростанції слід розміщати поза зонами можливого катастрофічного затоплення. У категорійних містах припускається розміщення тільки теплоелектроцентралей незалежно від їхньої встановленої потужності з максимальним віддаленням їх від центрів житлової і промислової забудов. Нові атомні електростанції та атомні теплоелектроцентралі повинні розміщатися з урахуванням їх впливу на навколишнє середовище і радіаційну безпеку населення. На існуючих та на тих, що проектуються і будуються атомних станціях, передбачається створення систем автоматизованого контролю за радіаційною обстановкою на території станції і в зоні спостереження цих станцій, оповіщення та інформаційного забезпечення обслуговуючого персоналу і населення про радіаційну небезпеку, а також захищених пунктів керування протиаварійними діями на території станції і в пристанційних селищах.

При проектуванні схем зовнішнього електропостачання категорійних міст необхідно передбачати їхнє електропостачання від декількох незалежних та територіально рознесених джерел живлення (електростанції і підстанції), частина з яких повинна розташовуватися за межами зон можливих руйнувань. При цьому зазначені джерела і їхні лінії електропередачі повинні, як правило, знаходитися на відстані одне від одного, що виключає можливість їхнього одночасного виходу з ладу. Системи електропостачання категорійних міст повинні враховувати можливість забезпечення транзиту електроенергії в обхід зруйнованих об'єктів за рахунок спорудження коротких перемичок повітряними

лініями електропередачі. Нові лінії електропередачі, що живлять особливо важливих споживачів, слід проектувати в кабельному виконанні. Для забезпечення можливості зниження електричного навантаження в категорійних містах системи електропостачання об'єктів, які не відключаються у воєнний час, повинні бути відділені від систем електропостачання інших об'єктів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено вплив положення сонячної панелі відносно сонця на її ефективність. При фіксованій сонячній панелі значна частина енергії втрачається протягом дня, оскільки панель не тримається перпендикулярно сонячним променям. Система стеження може утримувати кут падіння променів в певних межах і зможе максимізувати вироблену енергію.
2. Сформовано блок-схему двохосного сонячного трекера. Обрано двигуни для приведення в рух механізму трекера. Проведено дослідження характеристик обраного двигуна. Спроектовано та розраховано номінали основних елементів блоку живлення та блоку керування двигуном.
3. Для забезпечення точного та надійного стеження сонця розроблено давач сонця. Проведено тестування роботи давача положення сонця на основі фото резисторів. Поряд з фоторезисторами було протестовано два інших типи датчиків. Окремо тестувалися два тонкоплівкові фотоелементи та два полікристалічні фотоелементи.
4. Спроектований двовісний сонячний трекер має максимальну кутову похибку щодо сонця $1,5^\circ$ в обох осях руху. Це значення забезпечує вигреш у генерації енергії до 49 % порівняно з нерухомою сонячною панеллю.
5. Експериментальні дослідження показали, що потужність, яку використовувала побудована система стеження, була набагато меншою, ніж потужність, отримана завдяки точному відстеженню сонця. Це означає, що якби система стеження заряджала власні батареї, вона була б повністю самодостатньою, за винятком технічного обслуговування.
6. На основі моделювання, результатів тестування та аналізу результатів можна стверджувати, що даний проект досягнув поставленої мети.

Однак, щоб підвищити ефективність запропонована конструкція двоосного трекера визначено ряд рекомендацій для подальшого вдосконалення конструкцій сонячних трекерів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Драпалюк Д.П. Шляхи підвищення енергоефективності фотоелектричних систем // Д. П. Драпалюк; А. В. Коваль; В. О. Ковальчук; М. В. Королевич / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 165.
2. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
3. Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A.. “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. January 2009.
4. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
5. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
6. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021
7. Sefa, I., Demirtas, M., Çolak, I.. “Application of One-Axes sun Tracking System”. Energy Conversion and Management. 2009.

8. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

9. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.

10. Orobchuk, B., & Koval, V. (2020). Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory. Вісник Тернопільського національного технічного університету, 99(3), 124-132.

11. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

12. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023).

13. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

14. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.

15. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с

ДОДАТКИ

Додаток А

Модель двигуна в PSPICE

* MQP_Motor

VS 1 0 12

RM 1 2 2.19

LM 2 3 1.057m

EM 3 4 VALUE={0.0212*I(VF)}

VD 4 0 0

ET 10 0 VALUE={0.0212*I(VD)}

RA 10 11 1u

ER 11 12 VALUE={0.0025*PWR(I(VF),0.088)}

LJ 12 13 0.00001

VF 13 0 0

.PROBE

.IC V(1) = 0

.TRAN 0 0.30 1m UIC

.END

Додаток Б

У мікроконтролері Arduino використовувався наступний код на мові C

```
int leftin = 0; // вибрати вхідний вивід для лівого датчика
int rightin = 1; // вибрати вивід входу для правого датчика
int upin = 2; // вибрати вхідний вивід для датчика вгору
int downin = 3; // вибираємо вхідний вивід для датчика донизу
int ref = 5; // вибрати величину допустимого гістерезису
int ox1 = 3; // обираємо вивід для осі x o1
int ox2 = 4; // вибираємо вивід для осі x o2
int ox3 = 5; // вибираємо вивід для осі x o3
int ox4 = 6; // вибираємо контакт для осі x o4
int oy1 = 12; // вибираємо контакт для осі y o1
int oy2 = 11; // вибрати контакт для осі y o2
int oy3 = 10; // вибрати вивід для осі y o3
int oy4 = 9; // вибрати вивід для осі y o4
int LV = 0; // змінна для зберігання лівого значення
int RV = 0; // змінна для зберігання правого значення
int DV = 0; // змінна для зберігання значення вниз
int UV = 0; // змінна для зберігання значення вгору
int diffx = 0; // змінна для зберігання різниці x
int diffy = 0; // змінна для зберігання різниці y
int Left = 1; // вибрати вивід для лівого світлодіоду
int Right = 2; // вибрати вивід для правого світлодіоду
int Down = 7; // вибрати вивід для нижнього світлодіоду
int Up = 8; // вибрати вивід для світлодіоду вгору
int PV = 210; // вибрати час затримки ШІМ
void setup() { //Налаштування програми
pinMode(ox1, OUTPUT); //Встановити вивід 3 на вихід
pinMode(ox2, OUTPUT); //Встановити вивід 4 на вихід
pinMode(ox3, OUTPUT); //Встановити вивід 5 на вихід
pinMode(ox4, OUTPUT); //Встановити вивід 6 на вихід
pinMode(oy1, OUTPUT); //Встановити вивід 12 на вихід
pinMode(oy2, OUTPUT); //Встановити вивід 11 на вихід
pinMode(oy3, OUTPUT); //Встановити вивід 10 на вихід
pinMode(oy4, OUTPUT); //Встановити вивід 9 на вихід
pinMode(Left, OUTPUT); //Встановити вивід 1 на вихід
pinMode(Right, OUTPUT); //Встановити вивід 2 на вихід
```

```

pinMode(Up, OUTPUT); //Встановити вивід 8 на вихід
pinMode(Down, OUTPUT); //Встановити вивід 7 на вихід
pinMode(13, OUTPUT); //Встановити вивід 13 на вихід
digitalWrite(13,HIGH); //Встановити вивід 13 на HIGH, щоб увімкнути світлодіодний
індикатор, який показує, що програма працює
}
void loop() { //Цикл програми
LV = analogRead(leftin); //Зчитати значення напруги лівого датчика в LV
RV = analogRead(rightin); //Зчитати значення напруги правого датчика в RV
DV = analogRead(downin); //Зчитати значення напруги нижнього датчика в DV
UV = analogRead(upin); //Зчитати значення напруги датчика up в UV
diffx = LV - RV; //Знайти різницю між датчиками азимуту
diffy = UV - DV; //Знайти різницю між датчиками висоти
if (diffx > ref) //Якщо різниця за азимутом більша за величину, задану за допомогою ref
{
digitalWrite(ox2, LOW); //вимикаємо два транзистори, що не використовуються
digitalWrite(ox3, HIGH);
digitalWrite(ox1, HIGH); //вмикаємо Q1, щоб азимутальний двигун повернувся ліворуч
analogWrite(ox4, PV); //видаємо ШІМ сигнал на двигун
digitalWrite(Left, HIGH); //Змінити індикаторні світлодіоди
digitalWrite(Right, LOW); //мікроконтролер вважає лівий ліворуч яскравішим
}
else if (diffx < -ref) //Якщо різниця в азимуті менша за величину, задану від'ємним ref
{
digitalWrite(ox1, LOW); //вимикаємо два транзистори, що не використовуються
digitalWrite(ox4, HIGH);
digitalWrite(ox2, HIGH); //вмикаємо Q2, щоб азимутальний двигун повернувся праворуч
analogWrite(ox3, PV); //видаємо ШІМ сигнал на двигун
digitalWrite(Right, HIGH); //Змінити індикаторні світлодіоди
digitalWrite(Left, LOW); //мікроконтролер вважає, що праворуч яскравіше
}
else //Якщо різниця в межах допустимих значень
{
digitalWrite(ox3, HIGH); //Вимикаємо низьку сторону мосту
digitalWrite(ox4, HIGH);
digitalWrite(ox1, HIGH); //Увімкнути високу сторону мосту
digitalWrite(ox2, HIGH); //гальмуємо двигун азимута
digitalWrite(Left, HIGH); //Встановити індикаторні світлодіоди, щоб показати, що
digitalWrite(Right, HIGH); //мікроконтролер вважає обидва датчики рівними
}
}

```

```

}
if (diffy > ref)
{
digitalWrite(oy2, LOW); //вимикаємо два транзистори, що не використовуються
digitalWrite(oy3, HIGH);
digitalWrite(oy1, HIGH); //вмикаємо Q1, щоб двигун висоти увімкнувся
analogWrite(oy4, PV); //вихідний ШІМ сигнал на двигун
digitalWrite(Up, HIGH); //Змінити індикаторні світлодіоди
digitalWrite(Down, LOW); //мікроконтролер бачить вгору яскравіше
}
else if (diffy < -ref)
{
digitalWrite(oy1, LOW); //вимикаємо два транзистори, що не використовуються
digitalWrite(oy4, HIGH);
digitalWrite(oy2, HIGH); //вмикаємо Q2, щоб двигун висоти вимикався
analogWrite(oy3, PV); //вихідний ШІМ сигнал на двигун
digitalWrite(Down, HIGH); //Змінити індикаторні світлодіоди
digitalWrite(Up, LOW); //мікроконтролер бачить вниз яскравіше
}
else //Якщо різниця в межах допустимих значень
{
digitalWrite(oy3, HIGH); //Вимикаємо низьку сторону мосту
digitalWrite(oy4, HIGH);
digitalWrite(oy1, HIGH); //Увімкнути високу сторону мосту
digitalWrite(oy2, HIGH); //гальмуємо двигун азимута
digitalWrite(Up, HIGH); //Встановити індикаторні світлодіоди, щоб показати, що
digitalWrite(Down, HIGH); //мікроконтролер вважає обидва датчики рівними
}
}

```

Додаток В

Для моделювання всієї системи було використано наступний код
MATLAB.

```
function mqr (gamma,speed,ref)
%приймаємо значення кута між датчиками,
%швидкість двигуна та відлік компаратора
%гамма в радіанах, швидкість в рад/с та
%ref - у вольтах
t = 0:0.001:500; %створити вектор часу довжиною 500 секунд (500000 мс)
sun = t*(7.272*10^-5); %створити вектор положення сонця, який змінюється з часом
v1 = zeros(1,500001); %задати вектор для одного датчика
v2 = zeros(1,500001); %задати вектор для другого датчика
pos = zeros(1,500001); %задати вектор для позиції трекара
n = 2; %ініціалізуємо індикатор
while n <= 500001
v1(n) = 0.72*cos((gamma/2)-(sun(n)-pos(n-1)))+0.72;
%поточне значення v1 базується на куті між датчиком та сонцем, який
базується на гаммі та положенні трекара
v2(n) = 0.72*cos((gamma/2)+(sun(n)-pos(n-1)))+0.72;
%поточне значення v2 базується на куті між датчиком і сонцем, який
базується на гаммі та положенні трекара
if ((v1(n)-v2(n)) > ref) %якщо v1 перевищує референс, а v2 - ні
pos(n) = pos(n-1) + швидкість/1000; %обертаємо до v1
n = n + 1; %індикатор приросту
elseif ((v1(n)-v2(n)) < -ref)%якщо v2 за референсом, а v1 ні
pos(n) = pos(n-1) - швидкість/1000; %обертаємо до v2
n = n + 1; %індикатор приросту
else %якщо різниця між ref та -ref
pos(n) = pos(n-1); %не рухатись
n = n+1; %інкремент індикатора
end %exit if
end %exit while
error = (sun-pos)*(180/(pi)); %обчислити вектор похибки між
сонцем та трекаром
Побудувати графік руху сонця та трекара за 15 секунд:
subplot(2,1,1),plot(t(300001:315000),sun(300001:315000),'black'), hold on,
plot(t(300001:315000),pos(300001:315000),'r'),title('Tracker Movement'),
```

```

xlabel('Час (с)'),ylabel('Кутове положення (рад)'), зачекайте;
legend('Сонце', 'Трекер');
%Побудувати графік вектора похибки на тому ж часовому інтервалі:
subplot(2,1,2),plot(t(300001:315000),error(300001:315000)),
title('Помилка трекера'),xlabel('Час (с)'),ylabel('Помилка (градуси)');
%Додатковий код, який використовується для побудови графіків напруги на панелях:
%Для використання закомментуйте наведені вище графіки та розкоментуйте рядки
нижче
%subplot(3,1,1),plot(t(300001:315000), v1(300001:315000)),
%title('Напруги на панелі 1'),xlabel('Час (с)'),ylabel('Напруга (В)');
%subplot(3,1,2),plot(t(300001:315000), v2(300001:315000)),
%title('Напруги панелі 2'),xlabel('Час (с)'),ylabel('Напруга (В)');
%subplot(3,1,3),plot(t(300001:315000),v1(300001:315000)-v2(300001:315000)),
%title('Різниця в напругах на панелях'),xlabel('Час (с)'),
%ylabel('Напруга (В)');

```

Наступний код MATLAB був використаний для моделювання потужності та енергії, виробленої протягом року чотирма різними установками сонячних панелей:

```

function [total DT YT XT NT] = mqpPower (lat,index)
%Вводимо широту в градусах та індекс для 1/індексного пункту на годину
%Виводимо підсумки енергії за весь рік поспіль у векторі
t = 0:(1/index):8760; %створюємо вектор часу довжиною 365 днів (8760 годин)
latrad = lat/180*pi; %перевести широту в радіани
w = pi/4380; %швидкість зміни кута нахилу до сонця у напрямку Y (північ-південь)
G = zeros(1,8760*index+1); %ініціалізуємо G
Zx = 0.2618.*(t-12); %кут нахилу сонця у напрямку X (схід-захід)
Zy = latrad - 0.4102*sin(w.*t); %кут сонця по Y (північ-південь)
I = cos(Zx).*cos(Zy); % можливе випромінювання у відсотках від загального
ind = find(I >= 0); %знаходимо тільки при позитивному випромінюванні
G(ind) = I(ind); %створюємо вектор тільки позитивних випромінювань
tax = 0.9997^2*G; % потужність відстеження за двома осями у відсотках
oney = 0.9997*G.*cos(Zx); % потужність відстеження за віссю X у відсотках
onex = 0.9997*G.*cos(Zy); % потужності відстеження по осі Y
not = G.*cos(Zy).*cos(Zx); % можлива потужність мобільної панелі

```

```

total = sum(G)/індекс; %сумування для знаходження доступної енергії
DT = sum(tax)/індекс; %підсумок для енергії, отриманої завдяки двохосьовому
відстеженню
YT = sum(oney)/індекс; %сума для енергії, отриманої при відстеженні за віссю Y
XT = sum(onex)/індекс; %сума для енергії, отриманої при відстеженні за віссю X
NT = sum(not)/індекс; %сума для енергії, отриманої від нерухомої панелі
% Побудуйте графік результатів у часі, виведіть коментар для запуску mqrPower.m:
plot(t(1:25*index),G(1:25*index),'black'),
title('Поглинута сонячна радіація'),xlabel('Час (години)'),
ylabel('% можливої радіації'), hold on, plot(t(1:25*index),
tax(1:25*index),'red'),plot(t(1:25*index),not(1:25*index),'blue'),
plot(t(1:25*index),oney(1:25*index),'green'),plot(t(1:25*index),
onex(1:25*index),'magenta'),hold off;
legend('Сонячне випромінювання', 'Двовісний трекер', 'Нерухома панель', 'Відстеження
за віссю Y', 'Відстеження за віссю X');
%Щоб побудувати графік лише за перший день, поставте цей код перед усіма
векторами
%у функціях побудови графіка:
%(1:25*index)

```

Наступний код MATLAB було використано для побудови графіків енергії, отриманої кожною системою стеження в діапазоні широт. Він використовує mqrPower.m,

```

функція mqrplot
%Функція не має входів
lat = -90:1:90; %створює вектор широти від 90S до 90N
total = zeros(1,181); %ініціалізувати нульові вектори для повної сонячної енергії
DT = zeros(1,181); %ініціалізуємо нульові вектори для всіх чотирьох
YT = zeros(1,181); %системи стеження
XT = zeros(1,181);
NT = zeros(1,181);
n = 1; %ініціалізуємо змінну-індикатор
while n <= 181
[total(n) DT(n) YT(n) XT(n) NT(n)] = mqrPower(lat(n),10);
n = n+1;

```

%циклічно перебираємо кожне значення широти і записуємо енергію для усіх п'яти систем стеження

end %вихід з циклу while

Побудувати графік розподілу енергії за широтами:

plot(lat,total,'black'),title('Energy Generated over Latitude'),

xlabel('Широта (градуси)'),ylabel('Згенеровано енергії (кВт-год)'), hold on,

plot(lat,DT,'red'),plot(lat,NT,'blue'),plot(lat,YT,'green'),

plot(lat,XT,'пурпурний'), зачекати;

legend('Сонячне випромінювання', 'Двоівісний трежер', 'Нерухома панель', 'Відстеження за віссю Y', 'Відстеження за віссю X');