

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики

(інститут)

Електротехнічний факультет

(факультет)

Кафедра електропривода

(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеню магістр  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Фоменко Олександра Ігоровича  
(ПІБ)

академічної групи 141-19М-4  
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(офіційна назва)

на тему Енергоефективна електромеханічна система орієнтування сонячної панелі

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи				
розділів:				
Вступ	Азюковський О.О.			
Технологічна частина	Азюковський О.О.			
Автоматизований електропривод	Азюковський О.О.			
Дослідження динаміки ел.привода	Азюковський О.О.			
Техніко-економічне обґрунтування	Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Казачковський М.М.			

Дніпро  
20\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
електропривода

(повна назва)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Казачковський М.М.  
(прізвище, ініціали)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня** \_\_\_\_\_ магістр  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Фоменко О.І. \_\_\_\_\_ академічної групи 141-19М-4 \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації \_\_\_\_\_  
за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(офіційна назва)

на тему Енергоефективна електромеханічна система орієнтування сонячної панелі

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Розділ	Зміст	Термін виконання
Вступ		
Технологічна частина		
Автоматизований електропривод		
Дослідження динаміки ел.привода		
Техніко-економічне обґрунтування		

Завдання видано \_\_\_\_\_ (підпис керівника) \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали)

Дата видачі

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_ Фоменко О.І. \_\_\_\_\_  
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 94 сторінки, 21 рисунок, 3 таблиці, 17 джерел, презентація PowerPoint.

Об'єкт детальної розробки: Енергоефективна електромеханічна система орієнтування сонячної панелі.

Мета роботи: визначити найбільш ефективний спосіб орієнтації сонячних батарей і запропонувати його реалізацію.

У першому розділі було досліджене найефективніше використання сонячної енергії, оцінений вплив різних факторів на ефективність перетворення сонячної енергії, завдяки використанню систем орієнтування сонячних панелей.

У другому розділі проводиться розробка та оцінка ефективності різних систем орієнтування сонячних панелей на основі факторів, що більше підходять місту Дніпро. Визначена найефективніша та доцільна система орієнтування.

У третьому розділі здійснюється вибір обладнання та комплектуючих частин для побудови системи орієнтування сонячної панелі. Також був запропонований алгоритм роботи системи, оцінена ефективність і працездатність обраних елементів.

В економічному розділі розрахована загальна вартість створення установки враховуючи всі витрати на купівлю обладнання і оплату праці робітників. Були розраховані щорічні витрати на обслуговування, ремонт обладнання, амортизаційні витрати.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Аналіз способів і засобів орієнтації сонячних панелей.....	7
1.1 Актуальність досліджуваної проблеми.....	7
1.2 Обґрунтування для використання сонячного трекера.....	8
1.3 Вплив кута нахилу сонячних панелей на ефективність.....	11
1.4 Вплив зовнішніх факторів на ефективність роботи.....	13
1.5 Способи орієнтації сонячних панелей.....	14
1.6 Структура сонячного трекера.....	16
1.7 Принцип роботи трекера.....	18
2. Дослідження ефективності систем орієнтації.....	21
2.1 Раціональне використання енергії сонця.....	21
2.2 Математична модель роботи фотоелектричних модулів.....	25
2.3 Детальний розрахунок.....	36
3. Обґрунтування вибору двовісної конструкції системи орієнтування сонячних панелей.....	46
3.1 Вибір розробляемого об'єкта.....	46
3.2 Конструктивне виконання установки.....	46
3.3 Розрахунок моменту інерції конструкції.....	52
3.4 Підвищення живучості та надійності функціонування АСУ стеження при дії вітрового навантаження.....	55
3.5 Вибір геліотрекера.....	56
3.6 Розробка алгоритму стеження за Сонцем.....	57
3.7 Розробка фотоелементів і вузлів зв'язку.....	70
3.8 Розрахунок елементів управління.....	72
3.9 Зняття ВАХ сонячної батареї.....	76
4. Економічна частина.....	86
4.1 Завдання економічного розрахунку.....	86

4.2 Розрахунок вартості конструювання двухосної системи орієнтування сонячних панелей.....	87
4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	90
4.4 Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт обладнання.....	92
4.5 Річна економія.....	93
5. Список літератури.....	95

# ВСТУП

З розвитком цивілізації людство все більше й більше використовувало електричну енергію в побуді та виробництві. Причому чим далі, тим більше. В даний час люди все більше переходять на нові, альтернативні джерела енергії.

Загалом значення, **альтернативна енергетика**, означає, виробення електричної енергії без шкідливих наслідків, властивих при використанні палива для виробництва енергії. Зокрема, високим рівнем викидів діоксиду вуглецю (парникових газів), що є одною з причиною глобального потепління. Одним з напрямків в альтернативній енергетиці є геліоенергетика, або, сонячна енергетика.

Геліоенергетика є важливим джерелом відновлюваної сонячної енергії, яку можна застосовувати функціональним або пасивним методом. З одного боку, використовуючи функціональний метод застосування даного типу енергії, може виробляти електричну енергію в фотоелектричних системах. З іншого боку, застосовувати цей вид енергії при будівництві будівель, акцентуючи свій інтерес на виборі матеріалів, що мають корисну для нас теплоємність або володіють важливими дисперсійними якостями, що дозволяє направляти спорудження до сонця і застосовувати це при проектуванні площ, коли ми бажаємо досягти натуральної циркуляції повітря або підходящої освітленості приміщення.

Одним з видів впровадження геліоенергетики є фотоелектрика (фотовольтаніка, від англ. photovoltaic, PV).

Завдяки фотоелектриці існують способи перетворення сонячної енергії в електричну енергію постійного струму з впровадженням напівпровідникових матеріалів, які проявляють фотоелектричний результат, явище традиційно досліджуються в галузі фізики, фотохімії та електрохімії. Цей результат пояснюється дією фотонів (часток світла), які володіють потрібною енергією (довжиною хвилі), на електрони напівпровідникової речовини (традиційно, кремнію), в результаті відбувається їх «виривання», що призводить до

виникнення фотоструму (або електричного струму). Зокрема, це називається **зовнішнім фотоефектом**.

Для того щоб наростити ємність установки, що використовує явище зовнішнього фотоефекту, пластинки кремнію (сонячні складових), як правило, поєднують у модулі, іменовані сонячними батареями.

Сонячні батареї виробляють гальванічний струм під дією сонячного світла. Ця електроенергія, в свою чергу, може бути орієнтованою на живлення обладнання та/або для підзарядки акумулятора.

За принципом роботи сонячна батарея являє собою фотоелектричний генератор постійного струму, який використовує ефект перетворення променевої енергії в електричну. Точніше, у сонячних батареях використана властивість напівпровідників на основі кристалів кремнію. Кванти світла, потрапляючи на пластину напівпровідника, вибивають електрон із зовнішньої орбіти атома даного хімічного елемента, що створює достатню кількість вільних електронів для виникнення електричного струму. Однак для того, щоб напруги й потужності такого джерела було достатньо для застосування в побутових цілях, одного або двох кремнієвих елементів недостатньо. Тому їх збирають у цілі панелі, де з'єднують паралельно або послідовно. При цьому площа таких панелей може становити від декількох квадратних сантиметрів до декількох квадратних метрів. Збільшуючи кількість панелей можна добитися більшої генерованої потужності сонячною батареєю. Однак продуктивність сонячної батареї залежить не тільки від площі, але також від інтенсивності сонячного світла й кута падіння променів. Отже, продуктивність сонячної батареї залежить від місцевості й географічної широти, де розташований будинок, від погоди й пори року, від часу доби.

Головним практичним використанням сонячних батарей було живлення орбітальних супутників та інших космічних апаратів, а на нинішній день більша частина фотоелектричних модулів використовується для вироблення електроенергії в побуті і для індустріальних компаній.

Існує деякі прийоми, які можуть допомогти допомогти збільшити продуктивність сонячних батарей і дістати більш сонячної енергії. Перший прийом - це **простежувати точку максимальної потужності**, а другий - **простежувати розташування Сонця**.

Відстеження точки максимальної потужності (ОТММ, англ. Maximum power point tracking, MPPT) виконуються з підтримкою особливих контролерів ОТММ, які вбудовуються в більшість сучасних сонячних інверторів. Сутність цього методу полягає в тому, що контролер досліджує вольт-амперну характеристику (ВАХ) сонячної батареї для знаходження оптимального режиму роботи, при якому даної кількості освітленості стане достатньо для вироблення максимальної кількості енергії.

Стежети за положенням сонця дозволяють сонячні трекери, про яких і буде йти мова в запропонованій роботі.

Вироблення енергії завдяки застосуванню сонячного трекера зростає, так як він допомагає збільшити кількість сонячної енергії, що потрапляє на модуль.

Для перетворення сонячної енергії в електричну використовується сонячна панель. Сонячна панель забезпечує живлення контролер заряду, який в свою чергу накопичує енергію в акумуляторних батареях. Так як найбільшій ефективності використання сонячної енергії досягається завдяки направленню променів перпендикулярно до сонячної панелі. Необхідно обертати її в різні напрямки в залежності від часу доби. Для цього використовується сонячний трекер. Сонячний трекер складається з механічної системи пересувань, крокової двигуна і електронної системи контролю кроковим двигуном.



# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

## 1.1 Актуальність досліджуваної проблеми

Результати проведених досліджень з оцінки використання сонячного випромінювання для цілей енергетики свідчать про економічну неефективність та комерційну непривабливість фотоелектричних модулів (далі ФМ) в сучасних цінових умовах. Зниження вартості виробництва електроенергії можливо двома способами:

1. зниження вартості ФМ
2. підвищення ефективності отримання енергії.

Здешевлення першого способу виробництва — цеху автоматичного виробництва можливо наступними шляхами: здешевлення виробництва фотоелектричних модулів; здешевленням матеріалу геліоприймача.

Що стосується другого способу, підвищити ефективність можна застосовуючи такі методи:

- використовувати багат шарові фотоприймачі з гетеропереходами, проте їх вартість набагато вище звичайних, тому співвідношення ціна / ефективність практично не змінюється;
- застосовувати двосторонні фотоелектричні перетворювачі, що незначно збільшує ефективність при значному збільшенні ціни;
- додавати різні концентратори, які збільшують фотовідповідь, але фотоелементи при цьому гріються, що негативно позначається на їх ККД і терміну служби;

- обладнати фотоелементи системою стеження за Сонцем, що дає найкраще співвідношення вартість / ефективність.

На даному етапі розвитку сонячної енергетики найбільш пильну увагу слід приділити останньому варіанту. Величиною, що впливає на вироблену потужність фотоелектричними модулями, є кут падіння сонячних променів на їх поверхню. Навіть в разі найефективнішої стаціонарної установки фотоелектричних модулів програш в виробленій потужності становить до 50%, ніж при безперервному орієнтуванні на Сонце. Застосування систем стеження дозволить змінювати кут нахилу фотоелектричних модулів протягом дня таким чином, щоб зберігати прямий і найефективніший кут падіння сонячних променів на його поверхню. Це дозволить збільшити кількість отриманої потужності, а, отже, і кількість вироблюваної потужності батареями. Даний спосіб підходить для вже працюючих сонячних електростанцій, для цього потрібно тільки змінити опорну конструкцію.

## **1.2 Обґрунтування при використанні сонячного трекера**

Сонячний трекер - це пристрій, призначений для відстеження положення сонця і орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від сонячних батарей (або інших пристроїв, встановлених на трекері). Концепція трекера досить проста - за кількома датчикам контролер визначає оптимальне положення для сонячної батареї і змушує серводвигун повертати платформу з пристроєм в необхідну сторону.

У межах використання таких пристроїв в фотоелектричних системах, трекери застосовуються для відстеження положення сонця і періодичного повороту сонячних панелей для максимізації вироблення електроенергії протягом дня.

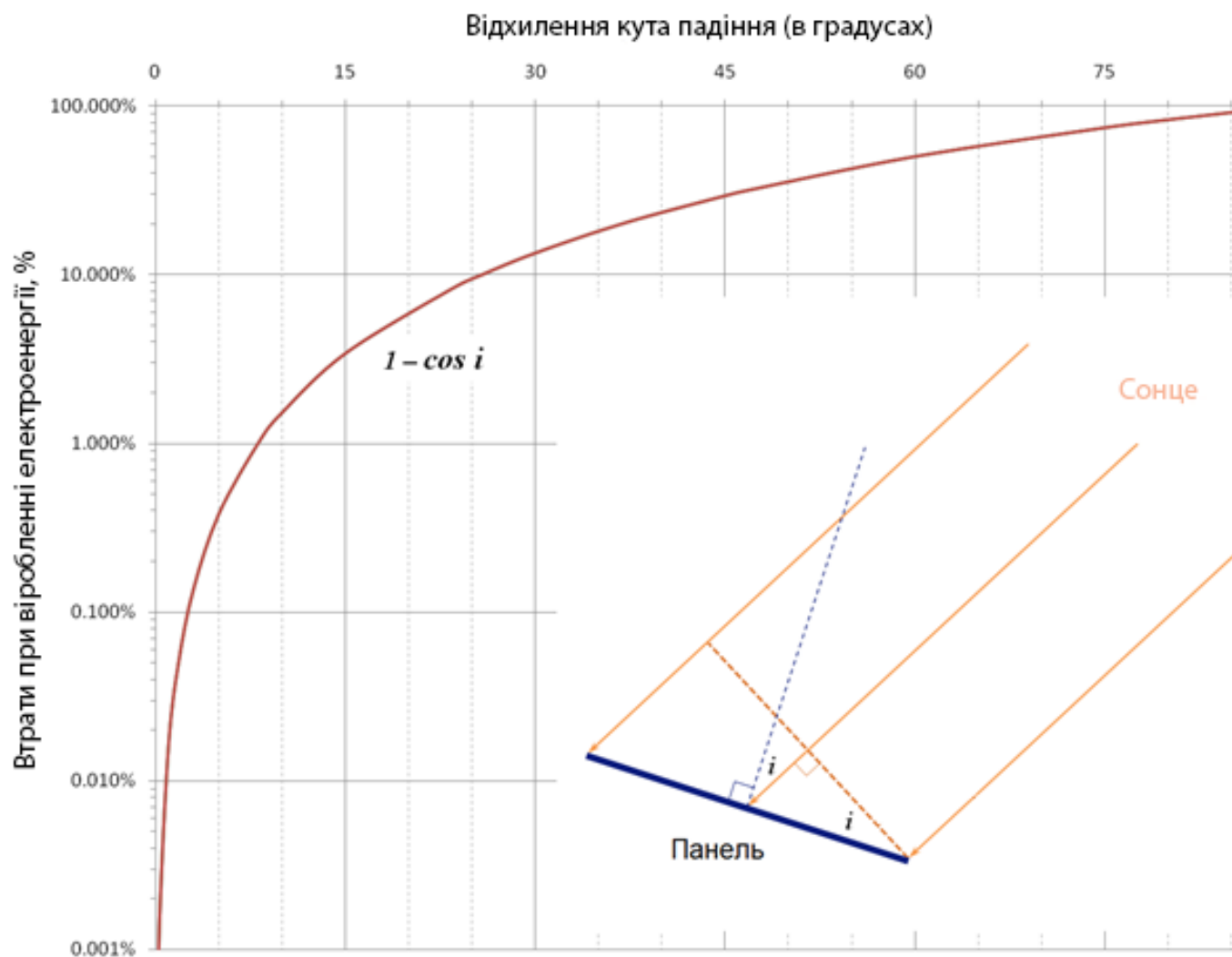


Рис 1.1 Залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями від величини кута

Даний графік відображає залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями від величини кута відхилення від оптимального положення площини панелі. З графіка залежності видно, що трекер з точністю  $\pm 5^\circ$  забезпечує уловлювання панеллю більш 99,6% енергії прямих променів і 100% - від розсіяного світла.

Враховуючи особливості щоденної траєкторії руху сонця можна сказати, що ефективний кут повороту панелей - близько  $150^\circ$ . Панель, яка зафіксована в напрямку рівно по середині між точками заходу і сходу втрачає до 75% від

максимально можливого значення вироблення енергії в ранковий і вечірній час.

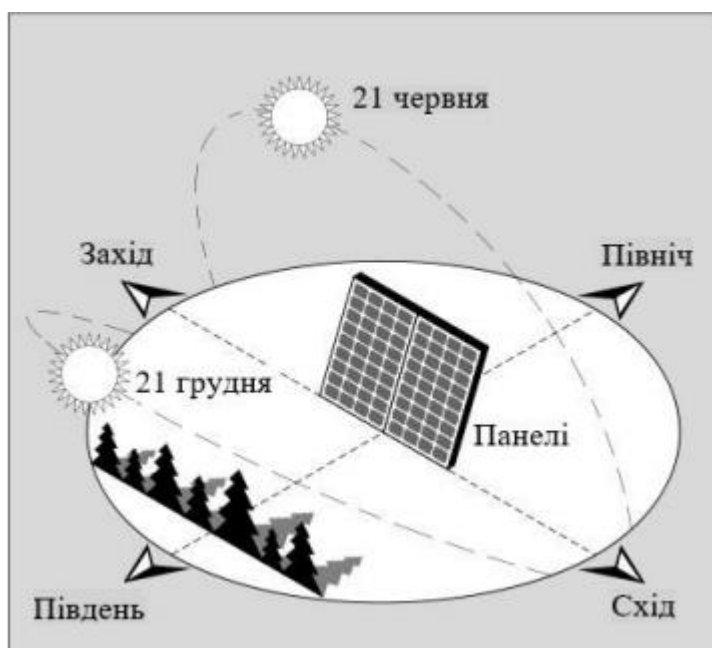


Рис. 1.2 Орієнтація панелі за траєкторію руху сонця

Обертання панелі від сходу на захід для мінімізації цих втрат називають Однокоординатний стеженням. Крім денного руху зі сходу на захід сонце робить сезонне переміщення між північною і південною сторонами світла на  $46^\circ$ . Для врахування цих змін, необхідно двох-координатне стеження.

Трекери для сонячних батарей бувають декількох конфігурацій, реалізують різні алгоритми при виборі напрямку, мають різні приводні механізми. Незважаючи на масу можливих відмінностей між трекерами, найчастіше вони діляться на два типи - Однокоординатний і двокоординатні.

Трекери необхідні для орієнтації робочої поверхні на сонце. Робочою поверхнею в даному випадку виступають:

- батарея, що складається їх сонячних фотоелектричних модулів (панелів);
- дзеркало параболічного відбивача, що фокусує сонячну енергію на двигуні Стірлінга, який виробляє електричну енергію;

- дзеркало рефлектора, що фокусує сонячну енергію на будь-який інший приймач сонячної енергії, яким може виступати будь-який пристрій або теплоносій, в залежності від типу системи;
- оптичні пристрої і інше;

Точна орієнтація робочих поверхонь систем на Сонце необхідна для досягнення їх максимальної продуктивності. При цьому завдання трекера - зменшити кут падіння сонця на робочу поверхню сонячних панелей (PV-модулів, CPV-концентрованих фотоелектричних модулів, CSP систем, HCPV систем, параболічних відбивачів і інше).

### **1.3 Вплив кута нахилу сонячних панелей на ефективність роботи.**

Сонячні панель працюють найбіль ефективно, коли вони направлені на сонце і їх поверхня перпендикулярна сонячним промінням. Сонячні панель зазвичай розміщують на даху або підтримуючій конструкції в зафіксованому положенні і не мають можливості стежити за положення сонця протягом дня. Тому, зазвичай сонячні панель НЕ знаходяться під оптимальним кутом (90 градусів) протягом усього дня. Кут між горизонтальною площиною і сонячною панеллю зазвичай називають кутом нахилу.

Внаслідок обертання Землі навколо Сонця, мають місце також сезонні зміни. Взимку сонце не досягає того ж кута, як влітку. В ідеалі, сонячні панель повинні бути розміщені влітку більш горизонтально, ніж взимку. Тому кут нахилу для роботи влітку вибирається менше, ніж для роботи взимку. Якщо немає можливості змінювати кут нахилу двічі на рік, то панелі повинні розміщуватися на оптимальному куті, значення якого лежить десь посередині між оптимальними кутами для літа і зими. Для кожної широти є свій оптимальний кут нахилу панелі. Тільки для місцевостей близьких до екватора сонячні панелі повинні

розполюгатися горизонтально.

Зазвичай, для весни та осені, оптимальним кутом нахилу приймається рівним значенню широти місцевості. Для зими до цього значення додається 10-15 градусів, а влітку від цього значення віднімається 10-15 градусів. Тому, зазвичай, рекомендується міняти двічі на рік кут нахилу з "літнього" на "зимовий". Якщо такої можливості немає, то кут нахилу вибирається приблизно рівним широті місцевості.

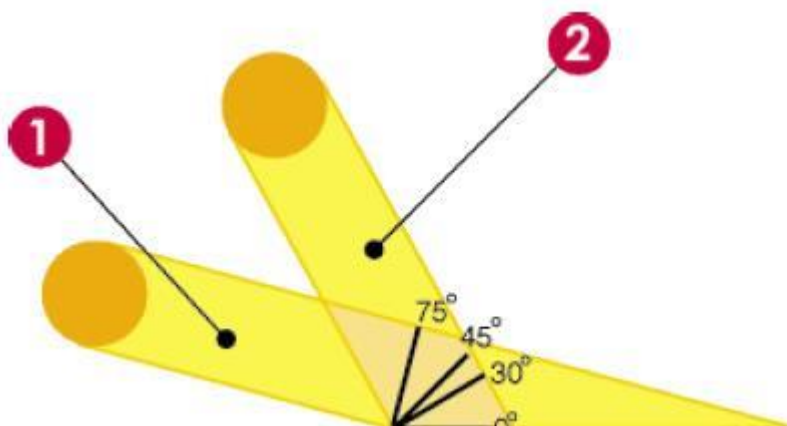


Рисунок 1.3 - *Оптимальний кут нахилу взимку і літом.*

Невеликі відхилення (до 5 градусів) від цього оптимума призводять до незначного ефекту на продуктивність модулів. Різність погодних умов більш впливає на виробництво електроенергії. Для автономних систем оптимальний кут нахилу залежить від місячного графіка навантаження, тобто якщо в даному місяці споживається більше енергії, то кут нахилу потрібно обирати оптимальним саме для цього місяця. Також, потрібно враховувати, яким є поточне значення протягом дня. Наприклад, якщо зі східного боку у вас розташоване дерево, а з західної частини все чисто, то, швидше за все, має сенс змістити орієнтацію з точного півдня на південний захід.

Таблиця 2.1 - Втрати вироблення електроенергії внаслідок відображення (у відсотках до перпендикулярного напрямку на модуль)

Кут падіння променів світла	Втрати
9	1.2%
18	4.9%
40	19.0%
45	29.0%

#### 1.4 Вплив зовнішніх факторів на ефективність роботи сонячних панелей

Сонячне світло проходить свій шлях від Сонця до Землі по прямій лінії. Коли він досягає атмосфери, частина світла заломлюється, а частина досягає землі по прямій лінії. Друга частина света поглинається атмосферою. Заломлене світло - це те, що зазвичай зветься дифузійної радіацією, або розсіяним світлом. Та частина сонячного світла, яка досягає поверхні землі без розсіювання або поглинання - це пряма радіація. Пряма радіація — найбільш інтенсивна.

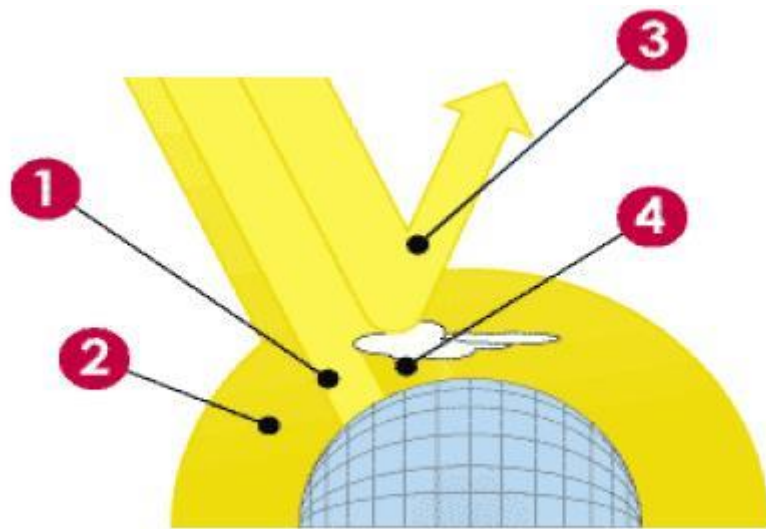


Рисунок 1.4 - Випромінювання до поверхні землі:

*1. пряме; 2. поглинуте; 3. відбите; 4. непряме.*

Сонячні модулі виробляють електричну енергію навіть коли немає прямого сонячного світла. Тому, навіть при хмарній погоді фотоелектрична

система буде виробляти електричну енергію. Однак, найкращі умови для генерації електроенергії будуть при яскравому сонці і при орієнтації панелі перпендикулярно сонячному світлу. Для місцевостей північної півкулі панелі повинні бути орієнтовані на південь, для країн південної півкулі - на північ.

Таблиця 1.2 - Вплив різних світлових умов на вироблення фотоелектричних модулів (в% від повної потужності)

Умова	% від «повного» сонця
Яскраве сонце - панелі розташовані перпендикулярно сонячним променям	100%
Легка хмарність	60-80%
Похмура погода	20-30%
За вікном, один шар, скло і модуль перпендикулярні сонячним промінням	91%
За вікном, 2 шари, скло і модуль перпендикулярні сонячним промінням	84%
За вікном, один шар, скло і модуль під кутом 45% до сонячного промінням	64%
Штучне світло в офісі, на поверхні письмового столу	0.4%
Штучне світло всередині яскравого приміщення (наприклад, магазину)	1.3%
Штучне світло всередині житлового приміщення	0.2%

### 1.5 Способи орієнтації сонячних панелей

Всього існує три способи контролю орієнтації фотоелектричних модулів:

1. Ручний спосіб, при якому наведення на Сонце проводиться оператором;



2. Пасивний спосіб, при якому поворот фотоелектричних модулів протягом дня проводиться за заданим алгоритмом управління;
3. Активний спосіб, що забезпечує постійну орієнтацію на максимально можливий і оптимальний кут падіння сонячного випромінювання.

У системах з ручним наведенням ФМ на Сонце всі дії виконує оператор. Для орієнтації великої кількості фотоелектричних модулів використовується пульт управління з загальним приводом. Точність, як і кількість виробленої енергії протягом дня безпосередньо залежить від роботи оператора: його вибраного кута нахилу ФМ, кількості поворотів ФМ протягом дня і часу роботи поворотного пристрою.

Всі пасивні системи контролю мають один принцип роботи - управління швидкістю обертання ФМ, на основі розрахунково-постійних характеристик для даного географічного положення ФМ. Вихідні величини для розробки алгоритму роботи системи контролю є постійними: географічна широта місцевості, тривалість дня для даної місцевості, зміна висоти сонцестояння протягом дня і року.

Для використання таких систем необхідні дані метеослужби для кожного конкретного місця розташування ФМ і вимагають перерахунку кута і швидкості повороту ФМ, а, отже, регулярних змін програми. Для перерахунку і перепрограмування мікроконтролера необхідна робота фахівців, що позбавляє її універсальності і збільшує вартість установки.

Активні системи контролю набули найбільшого розвитку і поширення на сьогоднішній день. На відміну від пасивних систем активні орієнтують поверхню ФМ на максимальний потік сонячного випромінювання, іншими словами на найяскравіше пляма на небі. Використання таких систем найбільш економічно виправдане і вимагає найменшого обслуговування і втручання зі сторони персоналу.

## 1.6 Структура сонячного трекера

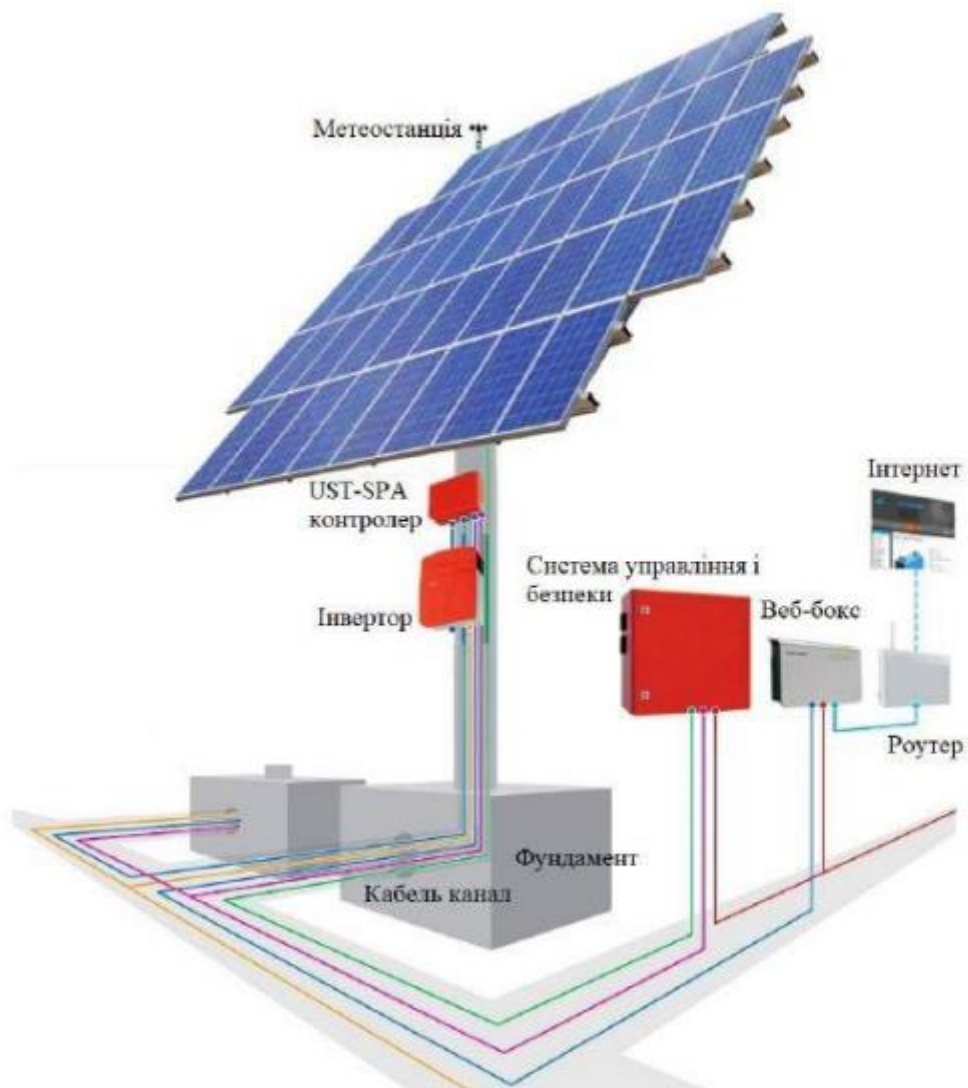


Рис 1.5 стандартна структура сонячного трекера

Сонячний трекер в повній комплектації складається з:

1. Несучої конструкції, що складається з фіксованої і рухомої частин, рухома частина має одну або дві осі обертання (Рис.1.3);
2. Системи орієнтації (позиціонування) рухомої частини трекера, що складається з актуаторів, і пристрої управління ними;
3. Системи безпеки, що включає в себе: будуть мінімізовані в період їх дії, а робочі поверхні захищені від руйнування або псування.

- захист від блискавки;
  - захист від перевантажень;
  - метеостанцію, призначену для попередження системи про ураган, град, сніг, несприятливих погодних умовах. Аналізуючи дані метеостанції, система переорієнтує трекер в положення, при якому несприятливі умови;
  - стабілізатори;
4. Системи управління і інтерфейс, призначені для настройки, контролю і обслуговування енергосистеми;
  5. Системи дистанційного доступу - для віддаленого моніторингу та управління системою;
  6. Система навігації - для визначення географічного положення системи, висоти над рівнем моря (для трекерів на мобільній базі). На стаціонарних трекерах навігація не обов'язкова. Значення широти, довготи, висоти над рівнем моря місця, де ставиться трекер, вводяться постачальником при монтажі системи.
  7. Інвертор — перетворює енергію, що надходить від корисного навантаження трекера (PV-модулів і ін.) постійний струм в змінний 220В (110В) і передає його споживачам або на приймаючу станцію, одночасно, живлячи трекер. Кількість інверторів на трекері може бути від одного до трьох. Інвертори виконуються в захищеному варіанті (польове) або ж в корпусі, що встановлюється в приміщенні. Схеми підключення інверторів в системі можуть бути різними.

Необхідність повної комплектації трекера не завжди економічно доцільна, залежить від виду трекера, призначення, та інших факторів, тому на практиці часто багато зазначених вище складові елементів трекера відсутні.

Конструктив трекера повинен забезпечувати здатність витримувати сильні вітрові навантаження, при його роботі в складі енергосистеми. Зі

збільшенням розмірів робочої поверхні корисного навантаження збільшується парусність комплексу. Вага корисного навантаження теж має значення. Тому тим, хто проектує систему, часто доводиться в своїх рішеннях перерозподіляти навантаження на трекер, збільшуючи габарити системи. Надійність при цьому є основним фактором.

### 1.7 Принцип роботи трекера

Рухомою частиною трекера може змінювати своє положення за допомогою ручного приводу, або за допомогою 1-2-х актуаторів - виконавчих пристроїв, зроблених на електродвигунах.

Завдання трекера - встановити кути нахилу робочої поверхні навантаження, зорієнтувавши, її чітко на сонце. Простіше кажучи, сонячні промені повинні падати перпендикулярно площині сонячної батареї.

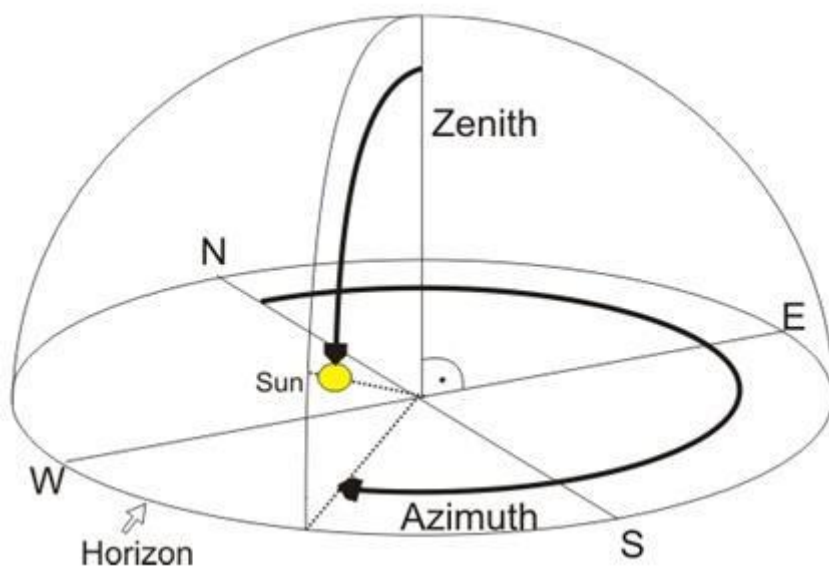


Рис 1.6 *Зеніт і азимут*

Подібної орієнтації можна досягти декількома способами:

У першому випадку пристрій управління актуаторами за допомогою декількох фотоприймачів аналізує освітленість при різних положеннях трекера і передає сигнали на актуатори до моменту, коли потік світла на всіх фотоелементах не стане однаковим. Розбалансування системи через рух сонця дасть імпульс для активації нового переміщення, в напрямку до сонця. Принципові схеми таких пристроїв нескладні і недорогі. Але в них є один істотний недолік. У похмуру погоду, при опадах і забрудненні фотоприймачів система непрацездатна.

Переорієнтувати систему можна вручну, або, керуючи актуаторами, подаючи сигнали за допомогою перемикачів. Але такий спосіб прийнятний в основному для сезонної орієнтації трекерів, коли на якийсь період часу виставляється відповідний кут нахилу (на зображенні даний кут позначений як Zenith (зенітний кут нахилу сонця (Рис 1.4.)). Точність орієнтації при цьому невелика, оператор не може постійно перебувати біля трекера, тому даний спосіб мало поширений, але для сезонної орієнтації малобюджетних систем він цілком підходить.

Управління рухом трекера по азимутальних і зенітних кутах можливо пристроєм управління, до складу якого входить таймер. При цьому актуатори починають свою роботу по добовій програмі таймера (при необхідності, і за річною програмою). Точність орієнтації при цьому не велика, так як сонце протягом року постійно змінює час, місце сходу і заходу, зенітний кут.

Наприклад, влітку в наших широтах зенітний кут малий, а взимку сонце йде по горизонту і зенітний кут великий. Даний спосіб прийнятний для недорогих систем.

Найбільш ефективним став спосіб управління актуаторами за програмою, яка в певні інтервали часу розраховує розташування сонця. За внутрішнім годинником пристрою програма на блок управління видаватиме інформацію про значення азимутального (Azimuth) і Зенітного (Zenith) кутів (Рис.1.4), з урахуванням місця розташування трекера (широта, довгота, висота над рівнем моря), після чого виконавчим пристроєм проводиться відповідна

переорієнтація трекера в розрахункове положення. Дана програма для розрахунку розташування сонця, називається - SPA (Алгоритм сонячної позиції).

Пристрої управління трекера можуть бути виконані на захищених комп'ютерах, PLC - Програмованих логічних контролерах, або у вигляді окремих закінчених пристроїв, що програмуються постачальником при поставці трекера, з прив'язкою до місцевості. Група трекерів може управлятися одним комп'ютером, що знижує собівартість електростанції.

В розділі 3 буде запропонована система орієнтування на основі геліотрекера який визначає положення сонця по відношенню до установки.

### **1.8 Висновки по розділу**

1. В цьому розділі були проведені обґрунтування використання системи орієнтування сонячних панелей для більш ефективного використання сонячної енергії.
2. Досліджено вплив різних факторів на ефективність отримання сонячної енергії.
3. Наведено способи орієнтації сонячного трекера, склад установки орієнтування, а також принципи його роботи.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ

### 2.1 Раціональне використання енергії сонця

Для найбільшої ефективності роботи сонячних панелей, тобто перетворення сонячної енергії в електричну, необхідно, щоб сонячні промені були направлені перпендикулярно поверхні модуля. В такому разі освітленість поверхні сонячних панелей буде максимальною. Для цього необхідно, щоб система контролю максимуму освітленості протягом дня періодично змінювала положення сонячних панелей для збереження прямого кута між напрямом променів і його площиною. Система, що забезпечує поворот сонячних панелей протягом дня на максимальний потік сонячного випромінювання, називається системою контролю максимуму освітленості сонячних панелей (далі по тексту система контролю).

Переміщення Сонця по небу протягом року і дня є вхідний параметром для системи контролю. Система контролю відповідає за орієнтування сонячних панелей на Сонце протягом дня і року, тому розглянемо геометричні відношення між Сонцем і Землей. Протягом року Земля описує еліптичний шлях навколо Сонця (малюнок 1.1). Цей рух є причиною зміни сезонів року і тривалості світлового дня. Зміна висоти Сонця на небосхилі протягом року визначається прецесією земної осі (рисунок 1.2), що відповідає за нахил осі Землі відносно площини екліптики протягом року. Протягом дня Земля також обертається навколо своєї осі, описуючи повне коло, цей рух є причиною сходів і заходів.

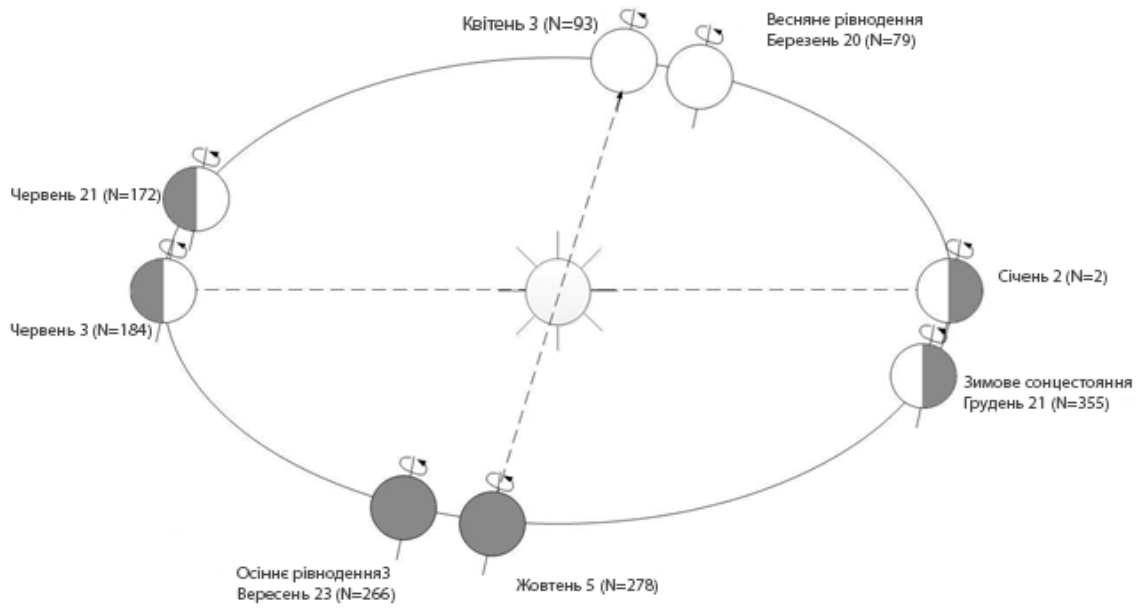


Рисунок 2.1. *Обертання Землі навколо Сонця протягом року.*

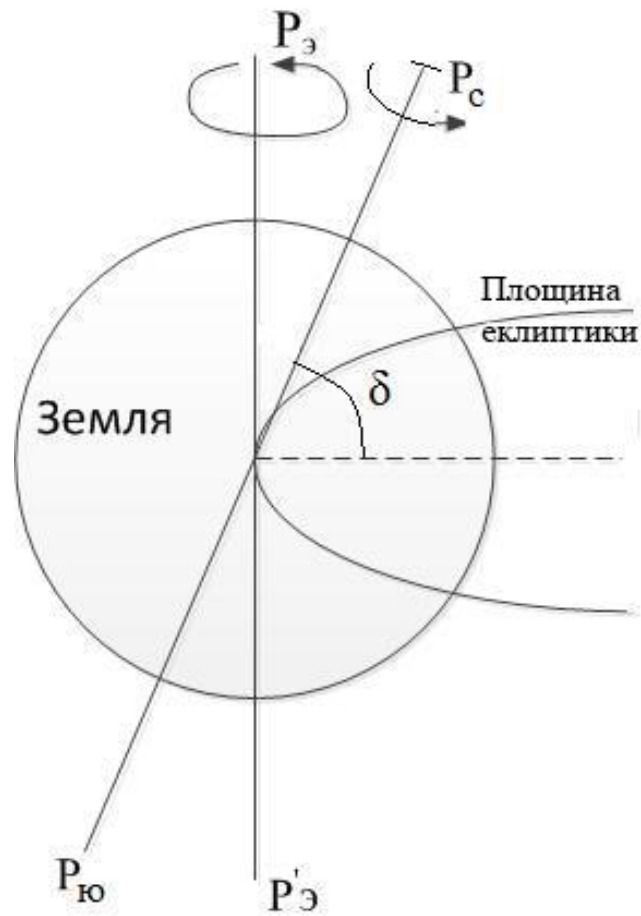


Рисунок 2.2. *Схематичне зображення прецесії земної осі.*



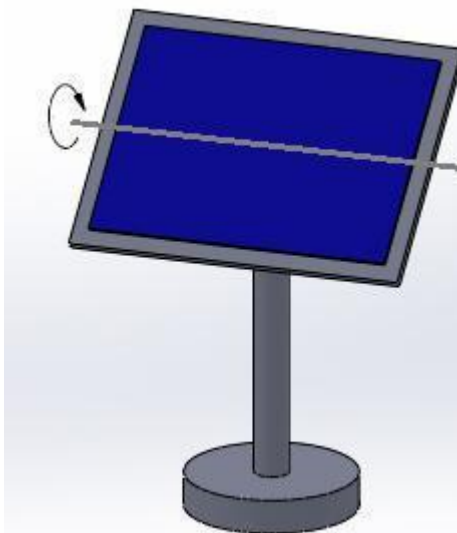
За одну добу Земля обертається навколо своєї осі на  $360^\circ$ , однак сонячні панелі будуть генерувати енергію тільки протягом світлового дня. Тривалість дня змінюється в залежності від широти і місця установки сонячних панелей. Необхідно стежити за двома умовами зміни висоти Сонця: протягом дня і умови зміни висоти Сонця за порами року.

Положення Сонця на небосхилі може бути описано двома кутами: азимут і зеніт. Азимут - кут між дійсним напрямом півночі і проекцією Сонця на горизонтальну площину Землі.

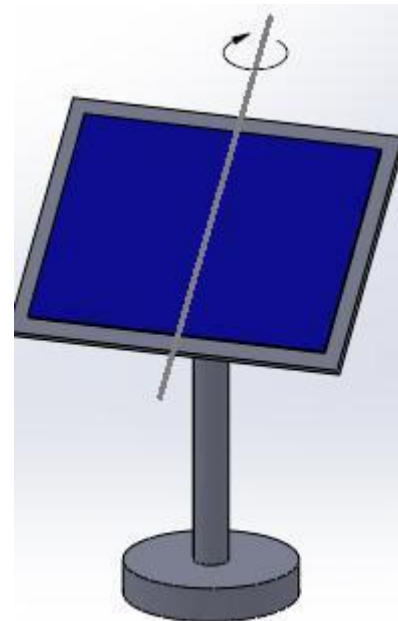
Зенітний кут характеризує висоту сонцестояння. Азимут змінює значення протягом дня через обертання Землі навколо своєї осі (його також називають часовий кут), а зенітний кут змінюється через прецесії земної осі. Отже, при проектуванні системи контролю необхідно брати до уваги два обертальних рухи Сонця: щоденний рух (переміщення по осі азимута) і щорічної прецесії земної осі (переміщення по осі екліптики).

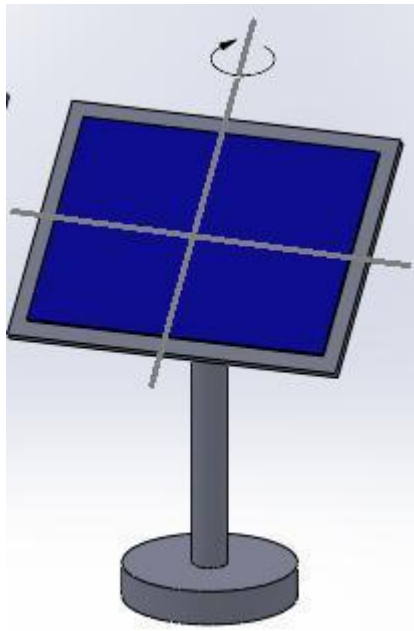
Існує два способи контролю положення Сонця: по одній осі і по двом. Кількість осей визначає механізм системи контролю: одноосьова і двовісна (рисунок 1.3).

а)



б)





в)

Рисунок 2.3. Системи контролю: а – одноосьова азимутальна, б - одноосьова зенітальна, в — двоосьова.

Одноосьові системи обертають сонячні панелі тільки в одній площині, що здійснюють контроль під час переміщення Сонця по азимуту або екліптиці. На практиці системи контролю по осі екліптиці не застосовуються, тому що переміщення Сонця протягом дня по осі азимута значніше.

Для досягнення більшої ефективності при одноосьовому стеженні по екліптиці другу вісь виставляють паралельно осі Землі, тобто на південь під кутом до горизонту, відповідно широті місцевості (рисунок 2.4).

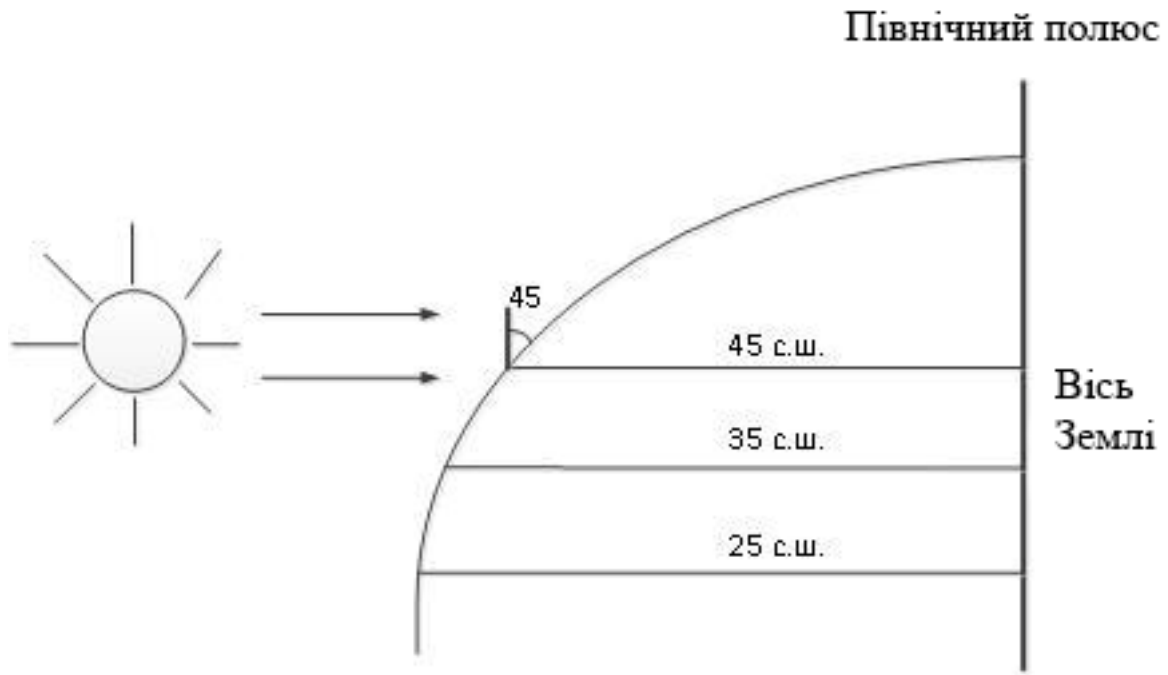


Рисунок 2.4. Розташування ФМ відносно горизонту.

Двоосьові системи контролюють положення Сонця в двох площинах (азимуту і екліптики Сонця), що забезпечує точне відстеження переміщення Сонця протягом дня.

Двоосьові системи мають більшу ефективність у порівнянні з одноосьовими, проте вартість їх набагато вище, в зв'язку з ускладненою конструкцією і блоку контролера. Тому частіше використовують системи з однією віссю контролю, а другу вісь, як казалося раніше, виставляють паралельно осі Землі або, для досягнення більшої ефективності, виставляють вручну 3-4 рази на рік на найбільш ефективний кут.

## 2.2 Математична модель роботи ФМ

Зробимо розрахунок потужності, яка буде вироблена сонячними панелями. Тому, спочатку визначимо величину сонячної радіації, яка надходить на батареї протягом дня. За формулою прямої сонячної радіації  $S_{пр}$  на поверхню, що розташовано під кутом  $\beta$  до цього потоку дорівнює:

$$Sr_{пр} = Sr_{max} * K_{ат} * \cos\beta$$

$Sr_{max}$  - кількість радіації, що надходить від Сонця на Землю.

Це значення є сонячною постійною, що рівне 1325Вт / м<sup>2</sup>. При розрахунках потрібно враховувати, що 30-35% цієї енергії відбивається назад до космосу, тому прийmemo  $Sr_{max} = 925 \text{ Вт} / \text{м}^2$ .

$\beta$  - приведений кут падіння сонячних променів на поверхню інсоляції,

$K_{ат}$  - коефіцієнт поправки на повітряну масу, яку необхідно пройти променю.

$$K_{ат} = 1.254 - \frac{0,1366}{\sin hc}$$

$$\cos\beta = \sin hc * \cos\alpha + \coshc * \cos\alpha$$

$\alpha$ - кут нахилу площини ФМ до горизонту,  $K_{ат}$

$hc$  - кут, який визначає висоту Сонця над горизонтом в даний момент часу.

Вісь Землі відхиляється від перпендикуляра до площини екліптики на кут 23° 27 ', тому половину року кожне географічне розташування нахилене в бік Сонця, а іншу половину - від Сонця.

Опівдні весняного рівнодення висота сонцестояння дорівнює  $h = 90^\circ - \theta$ , де  $\theta$  - географічна широта. Опівдні дня літнього сонцестояння висота відповідає найбільшому значенню  $h_{max} = 90^\circ - \theta + 23^\circ 27'$  і тривалість світлового дня максимальна. Коли Сонце знаходиться в точці осіннього рівнодення, тривалості дня і ночі рівні, а висота сонцестояння опівдні дорівнює  $h = 90^\circ - \theta$ , як і в день весняного рівнодення. Опівдні зимового

сонцестояння висота сонцестояння відповідає найменшим значенням  $h_{min} = 90^\circ - \theta - 23^\circ 27'$  і тривалість світлового дня мінімальна.

Тепер можемо знайти значення для висоти сонцестояння  $h_c$ . Сонячний зенітний кут - кут між напрямком вектора сонячних променів  $S$  і зенітної віссю відносно спостерігача. Зенітний кут  $v_z$  характеризує висоту сонцестояння  $h_c$ .

$$v_z = 90^\circ - h_c$$

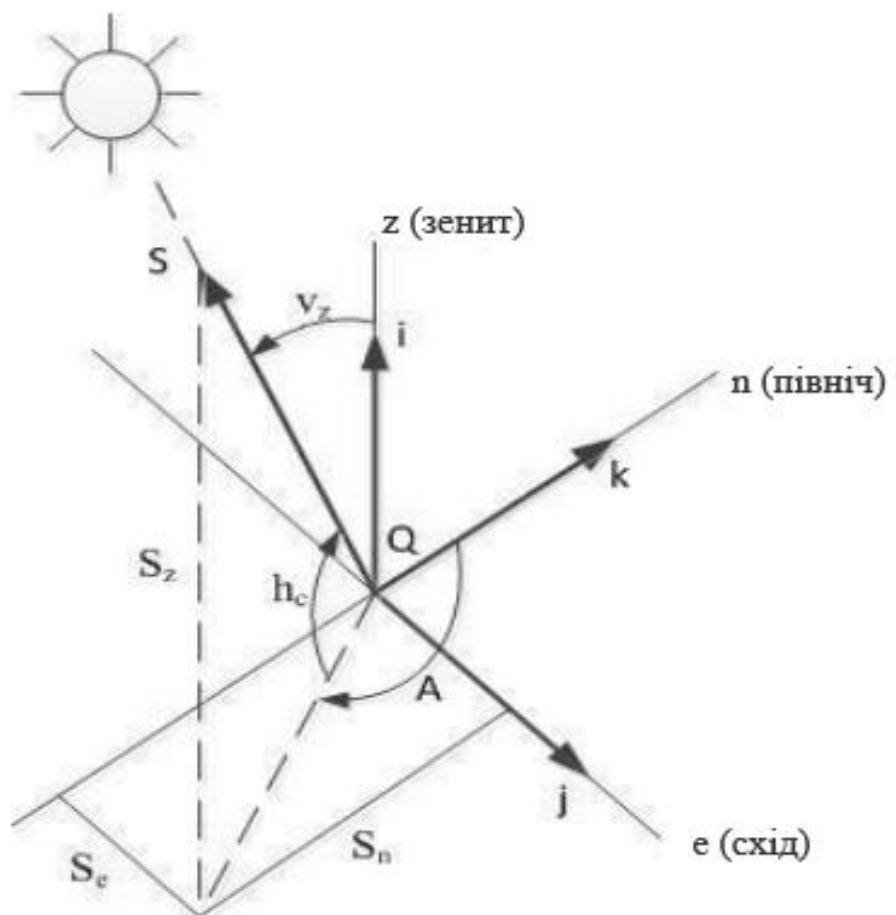


Рисунок 2.5. Сонячний кут для спостерігача

У векторних позначеннях  $S$  можна записати у вигляді:

$$S = S_z + S_e j + S_n k$$

де  $i$ ,  $j$  і  $k$  - одиничні вектори вздовж осей Зеніт ( $z$ ), Схід ( $e$ ) і Північної ( $n$ ).

З точки зору сонячного азимута і висоти,  $S$  можна записати у вигляді:

$$S_z = \sin(h_c)$$

$$S_e = \cos(h_c) \sin(A)$$

$$S_n = \cos(h_c) \cos(A)$$

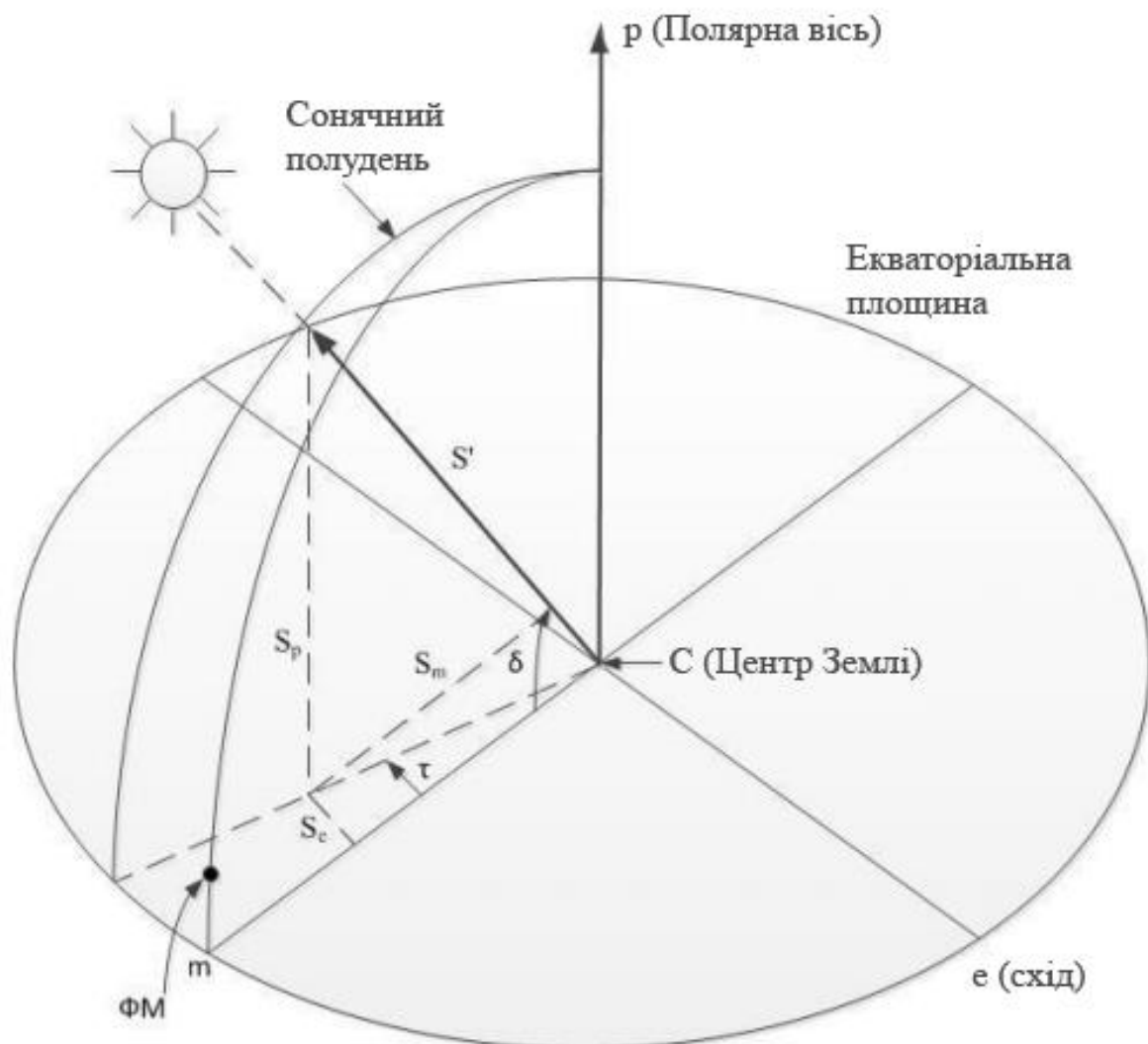


Рисунок 2.6. Геометрія сонячного кута

За геоцентричною системою координат, показаної на рисунку 2.6, вісь  $m$  перетинає центр Землі і точку перетину між місцевим меридіаном і екваторіальною площиною.

Вісь  $e$  перпендикулярна осі  $m$  і лежить в екваторіальній площині. Ось  $p$  - нормаль екваторіальній площині, яка перетинає Північний полюс. Новий сонячний вектор  $S$  може бути описаний за допомогою кута сонячного відмінювання і годинного кута.

$$S'' = S_m' i + S_e' j + S_n' k$$

$$S_e = \cos(\delta) \cos(\tau)$$

$$S_e = \cos(\delta) \sin(\tau)$$

$$S_n' = \sin(\delta)$$

Топоцентричні і геоцентричні координати пов'язані між собою обертанням навколо осі  $e$  через кут широти ( $\varphi$ ).

$S_z$	$\cos(\theta)$	0	$\sin(\theta)$	$S_m$
$S_e =$	0	1	0	* $S_e$
$S_n$	$-\sin(\theta)$	0	$\cos(\theta)$	$S_y$

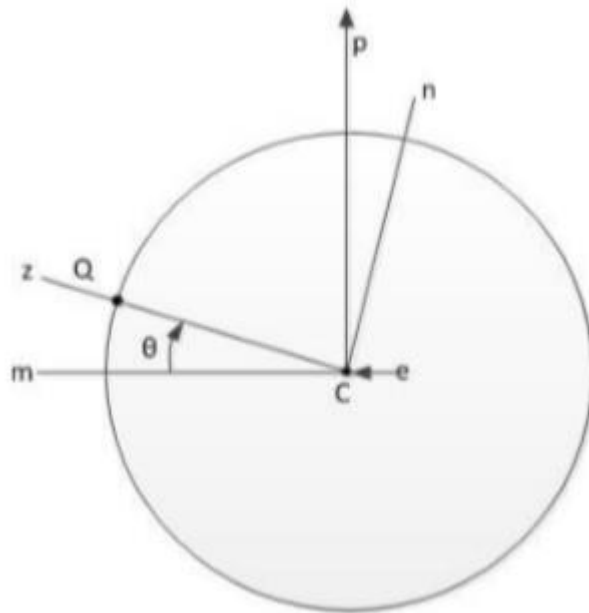


Рисунок 2.7. Перетворення геоцентричних координат в топологічні

Вирішивши останнє рівняння і підставивши в попередні вирази, то отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin(h_c) = \sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\sigma) \cos(\omega) \cos(\theta) \\ \cos(h_c) \sin(A) = -\cos(\sigma) \sin(\tau) \\ \cos(h_c) \cos(A) = \sin(\sigma) \cos(\theta) - \cos(\theta) \cos(\tau) \sin(\theta) \end{array} \right\}$$

Із системи рівнянь виводимо  $h_c$ :

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\tau) \cos(\theta))$$

Таким чином, висота сонцестояння  $h_c$  залежить від величини нахилу Сонця  $\delta$ , часового кута  $\tau$  і широти місцевості  $\theta$ . Широта місцевості відповідає географічному розташуванню сонячних панелей. Залишилися розрахувати дві останні величини.

### Кут нахилу Сонця

Побудуємо графік зміни кута нахилу Сонця опівдні протягом року, для цього скористаємося формулою Буржаса:

$$\delta = 0,372 + \sum_{k=1}^3 [A_k * \sin(kD) + B_k * \cos(kD)]$$

де коефіцієнти  $k$ ,  $A_k$  і  $B_k$  відповідають значенням, представленим в таблиці 2.1.

Коефіцієнт  $D$  можна визначити за формулою:

$$D = \frac{360}{362,5} * (N - 79,346)$$

де  $N$  - порядковий номер дня року.

Таблиця 2.1. Значення коефіцієнтів  $k$ ,  $A_k$  і  $B_k$

$k$	$A$	$B$
1	23,2567	-0,758
2	0,1149	0,3656
3	-0,1712	0,0201



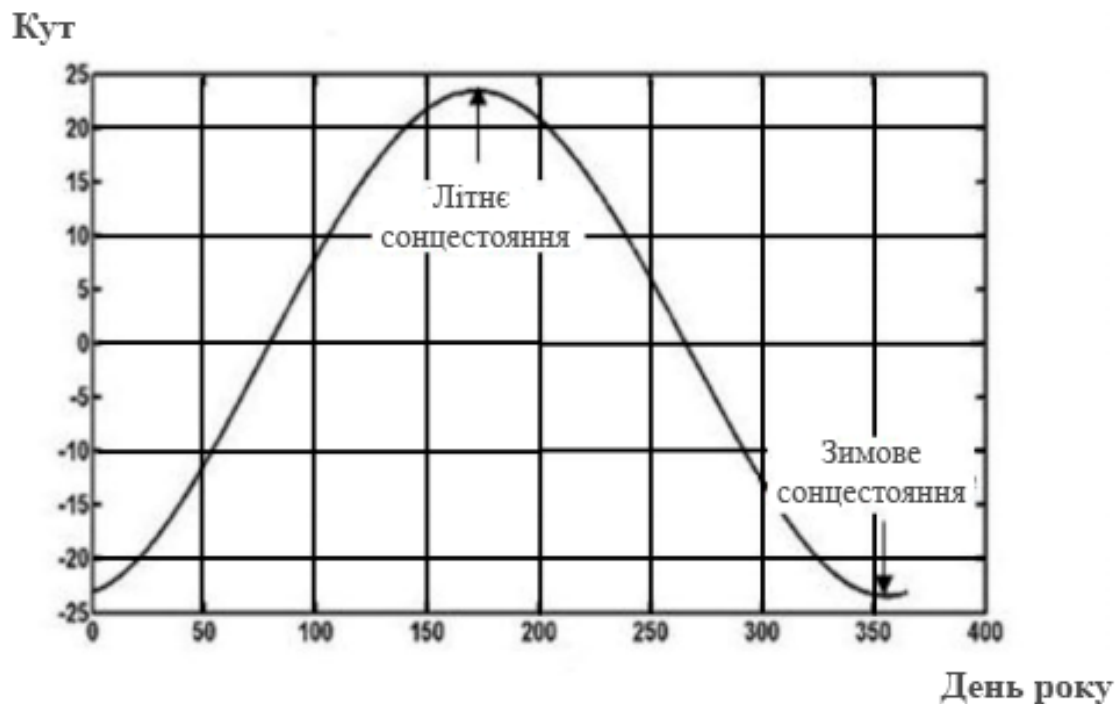


Рис 2.8 – Графік кута нахилу сонця

Як видно з цього графіка, представленого вище, значення кута нахилу Сонця змінюється протягом року від  $-23,5^\circ$  до  $23,5^\circ$ . Кут нахилу Сонця можна визначити, використовуючи більш просту формулу:

$$\delta = 23.5 * \sin\left(\frac{365}{60} * 81 - d\right)$$

де  $d$  - порядковий номер дня року.

### Часовий кут

Місцевий кут знаходиться в лінійній залежності від місцевого сонячного часу

$$\tau = 15(T_s - 12)$$

де  $\tau$  - годинний кут,  $^{\circ}$ ,

$TS$  - місцевий час, ч

Різниця між середнім і істинним сонячним часом називається рівнянням часу. Різниця виникає з двох причин:

- через еліптичну орбіту Землі і нерівномірний рух по ній, з максимальною швидкістю в перигелії і з мінімальною в афелії;
- через нахил екліптики до екватора поблизу рівнодення проекція швидкості Сонця на екватор менше, ніж в період сонцестояння, коли воно рухається паралельно екватору.

Обидва відхилення мають вигляд синусоїд (рисунок 2.9). Сума цих двох графіків є графіком рівняння часу:

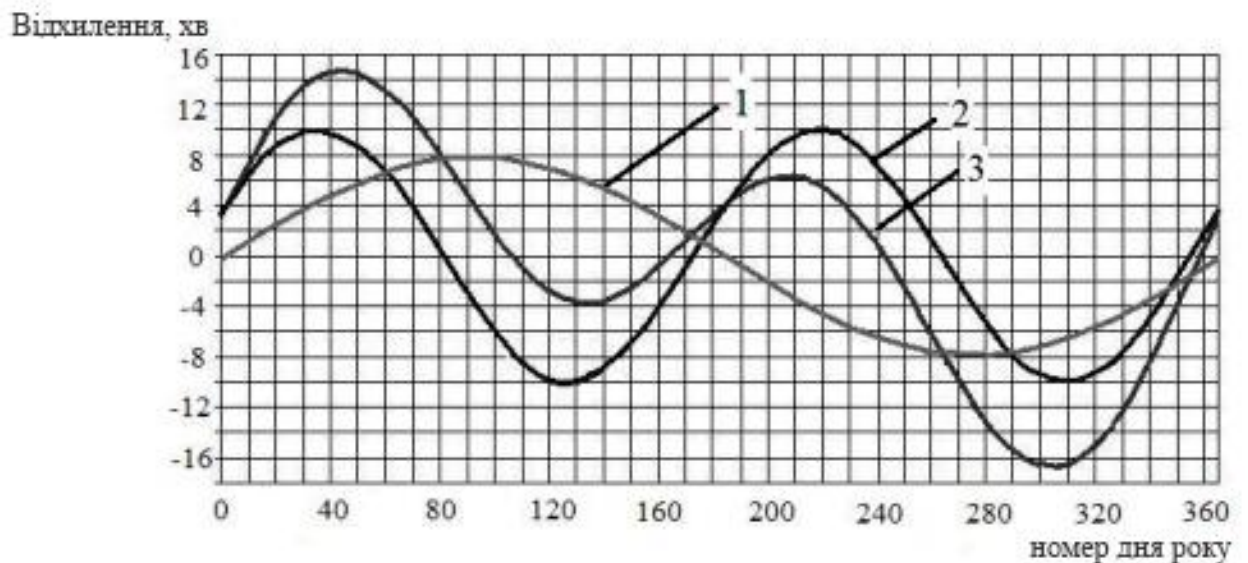


Рисунок 2.9. Графіки поправок часу і рівняння часу:

1 - поправка, викликана еліптичністю земної орбіти;

2 - поправка, викликана нахилом екліптики;

3 - графік рівняння часу.

Як видно з рисунка 1.9, справжній сонячний час може зміщуватися на 17 хвилин від середнього сонячного часу.

Вираз для визначення рівняння часу ЕОТ буде мати вигляд:

$$EOT = 60 \sum_{k=1}^6 \left[ Ak * \cos\left(\frac{360kn}{365.25}\right) + Bk * \sin\left(\frac{360kn}{365.25}\right) \right]$$

де  $n$  - порядковий номер в циклі високосного року (від 1 до 1461),

$k$ ,  $A$  і  $B$  - константи, значення яких наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2. Значення коефіцієнтів  $k$ ,  $A_k$  і  $B_k$

<b>k</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	$2,0870 \cdot 10^{-4}$	0
2	$9,2869 \cdot 10^{-3}$	$-1,2229 \cdot 10^{-1}$
3	$-5,2258 \cdot 10^{-2}$	$-1,5698 \cdot 10^{-1}$
4	$-1,3077 \cdot 10^{-3}$	$-5,1602 \cdot 10^{-3}$
5	$-2,1867 \cdot 10^{-3}$	$-2,9823 \cdot 10^{-3}$
6	$-1,5100 \cdot 10^{-4}$	$-2,363 \cdot 10^{-4}$

Залежність істинного значення сонячного часу і місцевого часу має вигляд:

$$Ts = Tl - \frac{EOT}{60} - P - LC$$

де  $Tl$  - місцевий час,

$P$  - поправка на перехід на літній час ( $P = 1$  після переходу на літній час,  $P = 0$  після переходу на зимовий).

Таким чином, Україна, починаючи з листопада по березень має зимовий час, а з квітня по жовтень - літній.

LC можна визначити за формулою:

$$LC = (M.д - Д.ст.м)/15$$

*де М.Д. - місцева довгота,*

*Д.ст.м. - довгота стандартного меридіана*

Таким чином, визначені вирази для всіх величин, що впливають на потік прямої сонячної радіації, що приходить на поверхню, розташовану під деяким кутом до цього потоку.

Визначимо формули для потоку прямої сонячної радіації, що надходить на поверхню ФМ із застосуванням одно і двухвісних систем контролю.  $\delta$ , часового кута  $\tau$  і широти місцевості  $\theta$ .

При використанні двухосної системи контролю, поверхня сонячних панелей направлена на Сонце, отже, кут  $\beta$  між нормаллю поверхні і сонячними променями дорівнює 0, тоді:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am}$$

Вираз приходить потужності сонячного випромінювання для ФМ з одноосної системою контролю матиме вигляд:

$$Sr = Sr_{max} * K_{am} * \cos(\theta - hc)$$

В даному випадку враховано кут нахилу поверхні до горизонту по другій осі (зазвичай кут дорівнює широті місця розташування сонячних панелей).

Розрахувати потужність сонячного випромінювання що надходить на нерухому поверхню, встановлену під кутом до горизонту, можна за формулою:

$$S_r = S_{r_{max}} * K_{am} * \cos(\theta - h_c) * \cos(90 - \tau)$$

Описані формули відображають залежність потужності сонячного випромінювання, що приходить на поверхню ФМ із застосуванням двухосної і одноосної системи контролю, а також на поверхню стаціонарно встановленого ФМ під кутом до горизонту.

Для оцінки ефективності систем контролю необхідно порівняти потужності сонячних панелей, вироблених із застосуванням систем контролю, з потужністю стаціонарно встановлених сонячних панелей. Для цього необхідно визначити залежність вихідної потужності сонячних панелей від потужності сонячного випромінювання, що приходить на поверхню.

### **Потужність сонячних панелей**

Найбільш проста модель розрахунку потужності сонячних панелей - це спосіб, при якому вироблена потужність отримується шляхом множення ККД сонячних панелей на сонячне випромінювання, яке прийшло на поверхню сонячних панелей.

$$P_{\text{ФМ}} = S_{r_{\text{пр}}} * \text{ККД} * S_{\text{сп}}$$

де  $P_{\text{сп}}$  - вироблена потужність сонячних панелей;

$\text{ККД}$  - коефіцієнт корисної дії ФМ;

$S_{\text{сп}}$  - площа сонячних панелей.

В результаті, після описання всіх формул, можна скласти математичну модель роботи сонячних панелей, працюючих напротязі дня. Ця модель може бути використана при моделюванні роботи СЕС з метою попередньої оцінки вироблюваної потужності і розрахунку необхідної кількості СП.

### Детальний розрахунок

Для початку, обчислимо справжній сонячний час для Дніпра. Розглянемо ЕОТ для кожного місяця з січня по грудень, для розрахунків візьмемо перше число кожного місяця. Для спрощення розрахунку можна скористатися таблицями, які знаходяться у вільному доступі, так як розрахунки ЕОТ не залежить від місця застосування.

Таблиця 2.3 Значення ЕОТ в залежності від місяця

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
ЕОТ	1,9	13,4	14,4	6,1	-2,4	-3,5	1,9	5,7	0,8	-9,6	-16,3	-11,7

Тоді залежність істинного значення сонячного часу і місцевого часу матиме вигляд:

$$T_s = T_l - \frac{EOT}{60} - P - LC$$

де  $T_l$  - місцевий час,

$P = 0$  для місяців з листопада по березень, і  $P = 1$  з квітня по жовтень (оскільки ми прийняли значення на перше число).

Тепер маємо:

$$LC = (M.d - D.ст.м)/15$$

де  $M.d.$  - місцева довгота,

$D.ст.м.$  - довгота стандартного меридіана

Для міста Дніпро місцева довгота дорівнює 35,1 східної довготи.

$$LC = \frac{35,1}{15} = 2,33^\circ$$

Коли всі величини відомі, розрахуємо  $T_s$  для кожного місяця:

$$T_{s_1} = 12 - \frac{3.4}{60} - 2.33 = 9.613$$

$$T_{s_2} = 12 - \frac{13.6}{60} - 2.33 = 9.443$$

$$T_{s_3} = 12 - \frac{12.5}{60} - 2.33 = 9.462$$

$$T_{s_4} = 12 - \frac{4.1}{60} - 2.33 = 9.602$$

$$T_{s_5} = 12 - 1 - \frac{3.4}{60} - 2.33 = 8.613$$

$$T_{s_6} = 12 - 1 + \frac{2.9}{60} - 2.33 = 8.718$$

$$T_{s_7} = 12 - 1 + \frac{2.4}{60} - 2.33 = 8.71$$

$$T_{s_8} = 12 - 1 - \frac{3.6}{60} - 2.33 = 8.61$$

$$T_{s_9} = 12 - 1 - \frac{0.2}{60} - 2.33 = 8.667$$

$$T_{s_{10}} = 12 - 1 + \frac{10.1}{60} - 2.33 = 8.838$$

$$T_{s_{11}} = 12 + \frac{16.4}{60} - 2.33 = 9.943$$

$$T_{s_{12}} = 12 + \frac{11.2}{60} - 2.33 = 9.857$$

Таблиця 2.4 Значення істинного сонячного часу в залежності від місяця

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
$T_{s,\Gamma}$	9,61	9,44	9,46	9,6	9,62	9,63	9,61	9,57	9,67	9,51	9,4	9,48

Тепер нам необхідно розрахувати місцевий годинний кут. Що знаходиться в лінійній залежності від *місцевого TS* - місцевий час.

$$\tau = 15(12 - Ts)^\circ$$

$t_1 = 15 * (12 - Ts_1) = 35.8$	$t_7 = 15 * (12 - Ts_7) = 49.35$
$t_2 = 15 * (12 - Ts_2) = 38.35$	$t_8 = 15 * (12 - Ts_8) = 50.85$
$t_3 = 15 * (12 - Ts_3) = 38.075$	$t_9 = 15 * (12 - Ts_9) = 50$
$t_4 = 15 * (12 - Ts_4) = 35.975$	$t_{10} = 15 * (12 - Ts_{10}) = 47.425$
$t_5 = 15 * (12 - Ts_5) = 50.8$	$t_{11} = 15 * (12 - Ts_{11}) = 30.85$
$t_6 = 15 * (12 - Ts_6) = 49.225$	$t_{12} = 15 * (12 - Ts_{12}) = 32.15$

*Таблиця 2.5 Залежність значення місцевого годинного кута від місяця*

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
$\tau^\circ$	35,8	38,35	38,075	35,975	50,8	49,23	49,35	50,85	50	47,43	30,9	32,15

Визначимо кут нахилу сонця:

$$\delta = 23,5 * \sin((365/360) * (81 - d))$$

*де d - порядковий номер дня в році.*

Порядкові номери перших чисел кожного місяця:

$$d = 1, 32, 60, 91, 121, 152, 182, 213, 244, 274, 305, 335$$



$\sigma_1 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_1 - 81)^\circ\right)$ $= -23.218$	$\sigma_7 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_7 - 81)^\circ\right) = 22.952$
$\sigma_2 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_2 - 81)^\circ\right)$ $= -17.918$ $\sigma_3 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_3 - 81)^\circ\right) = -8.533$	$\sigma_8 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_8 - 81)^\circ\right) = 16.952$ $\sigma_9 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_9 - 81)^\circ\right) = 5.978$
$\sigma_4 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_4 - 81)^\circ\right) = 4.137$	$\sigma_{10} = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_{10} - 81)^\circ\right)$ $= -6.351$
$\sigma_5 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_5 - 81)^\circ\right)$ $= -15.279$	$\sigma_{11} = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_{11} - 81)^\circ\right)$ $= -17.218$
$\sigma_6 = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_6 - 81)^\circ\right) = 23.348$	$\sigma_{12} = 23,5 * \sin\left(\frac{365}{360} * (d_{12} - 81)^\circ\right)$ $= -22.945$

Таблиця 2.6 Значення кута нахилу сонця в залежності від місяця року

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
$\tau^\circ$	-23,22	-17,9	-8,53	4,14	15,18	22,35	22,95	16,95	5,95	-6,35	-17,21	-22,94

Тоді, знайдемо висоту сонцестояння  $h_c$ , що залежить від величини нахилу Сонця  $\delta$ , часового кута  $\tau$  і широти місцевості  $\theta$ . Широта місцевості відповідає географічному розташуванню ФМ.

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta) * \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\tau) \cos(\theta))$$

$x_1 = 0.206$ $hc_1 = x_1 * \frac{180}{\pi} = 0,206$	$x_7 = 0.691$ $hc_7 = x_7 * \frac{180}{\pi} = 34,955$
$x_2 = 0.271$ $hc_2 = x_2 * \frac{180}{\pi} = 15,509$	$x_8 = 0,621$ $hc_8 = x_8 * \frac{180}{\pi} = 35,568$
$x_3 = 0,411$ $hc_3 = x_3 * \frac{180}{\pi} = 23,528$	$x_9 = 0.505$ $hc_9 = x_9 * \frac{180}{\pi} = 28,944$
$x_4 = 0,594$ $hc_4 = x_4 * \frac{180}{\pi} = 0,594$	$x_{10} = 0.368$ $hc_{10} = x_{10} * \frac{180}{\pi} = 21,068$
$x_5 = 0.604$ $hc_5 = x_5 * \frac{180}{\pi} = 34,955$	$x_{11} = 0.329$ $hc_{11} = x_{11} * \frac{180}{\pi} = 18,835$
$x_6 = 0,687$ $hc_6 = x_6 * \frac{180}{\pi} = 39,348$	$x_{12} = 0.232$ $hc_{12} = x_{12} * \frac{180}{\pi} = 13,292$

Таблиця 2.7 Значення висоти сонцестояння в залежності від місяця

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
$\tau^\circ$	11,97	15,51	23,53	34,02	34,6	39,35	39,6	35,57	28,94	21,06	18,84	13,29

Тепер розрахуємо *Kat* - коефіцієнт поправки на повітряну масу, яку необхідно пройти променю, щоб дістатися поверхні батареї:

$$Kat = 1,1254 - (0,1366/\sin(hc))$$

$\text{Кат}_1 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_1}\right) = 0.462$	$\text{Кат}_7 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_7}\right) = 0.928$
$\text{Кат}_2 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_2}\right) = 0.621$	$\text{Кат}_8 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_8}\right) = 0.905$
$\text{Кат}_3 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_3}\right) = 0.793$	$\text{Кат}_9 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_9}\right) = 0.855$
$\text{Кат}_4 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_4}\right) = 0.895$	$\text{Кат}_{10} = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_{10}}\right) = 0.754$
$\text{Кат}_5 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_5}\right) = 0.899$	$\text{Кат}_{11} = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_{11}}\right) = 0.71$
$\text{Кат}_6 = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_6}\right) = 0.926$	$\text{Кат}_{12} = 1,1254 - \left(\frac{0,1366}{x_{12}}\right) = 0.537$

Таблиця 2.8 Залежність коефіцієнта поправки на повітряну масу від місяця

М	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Кат	0,46	0,62	0,79	0,895	0,899	0,93	0,93	0,91	0,86	0,75	0,71	0,54

При використанні двухосної системи контролю поверхню сонячної панелі спрямована на Сонце, отже, кут  $\beta$  між нормаллю поверхні і сонячними променями дорівнює 0, тоді, формула набуває вигляд:

$$S_r = S_{r\max} * \text{Кат}$$

$Srd_1 = S_{r\max} * \text{Кат}_1 = 426,989$	$Srd_7 = S_{r\max} * \text{Кат}_7 = 858,184$
$Srd_2 = S_{r\max} * \text{Кат}_2 = 574,186$	$Srd_8 = S_{r\max} * \text{Кат}_8 = 837,453$
$Srd_3 = S_{r\max} * \text{Кат}_3 = 733,293$	$Srd_9 = S_{r\max} * \text{Кат}_9 = 790,867$
$Srd_4 = S_{r\max} * \text{Кат}_4 = 828,172$	$Srd_{10} = S_{r\max} * \text{Кат}_{10} = 697,371$
$Srd_5 = S_{r\max} * \text{Кат}_5 = 831,728$	$Srd_{11} = S_{r\max} * \text{Кат}_{11} = 656,632$
$Srd_6 = S_{r\max} * \text{Кат}_6 = 857,005$	$Srd_{12} = S_{r\max} * \text{Кат}_{12} = 496,318$

Таблиця 2.9 Потужність для двухосной системи, залежно від місяця

М	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Sr <sub>д</sub>	426	574	733	828	831	857	858	837	790	697	657	496

Згідно формули для одноосной системи орієнтування:

$$Sr = Sr_{\max} * K_{am} * \cos(\theta - h_c)$$

$SrO_1 = Srd_1 * \cos(48 - h_{c1}) = 344.522$	$SrO_7 = Srd_7 * \cos(48 - h_{c7}) = 848.982$
$SrO_2 = Srd_2 * \cos(48 - h_{c2}) = 484.311$	$SrO_8 = Srd_8 * \cos(48 - h_{c8}) = 817.816$
$SrO_3 = Srd_3 * \cos(48 - h_{c3}) = 667.417$	$SrO_9 = Srd_9 * \cos(48 - h_{c9}) = 747.526$
$SrO_4 = Srd_4 * \cos(48 - h_{c4}) = 803.631$	$SrO_{10} = Srd_{10} * \cos(48 - h_{c10}) = 621.74$
$SrO_5 = Srd_5 * \cos(48 - h_{c5}) = 809.069$	$SrO_{11} = Srd_{11} * \cos(48 - h_{c11}) = 573.386$
$SrO_6 = Srd_6 * \cos(48 - h_{c6}) = 847.251$	$SrO_{12} = Srd_{12} * \cos(48 - h_{c12}) = 408.003$

Таблиця 2.10 Залежність коефіцієнта поправки на повітряну масу від місяця

М	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Sr <sub>о</sub>	344	484	667	804	809	847	849	818	748	622	573	408

Для постійно встановленої панелі:

$$Sr = Sr_{\max} * K_{am} * \cos(\theta - h_c) * \cos(90 - \tau)$$

$SrB_1 = SrO_1 * \cos(90 - t_1) = 201.531$	$SrB_7 = SrO_7 * \cos(90 - t_7) = 644,125$
$SrB_2 = SrO_2 * \cos(90 - t_2) = 300.497$	$SrB_8 = SrO_8 * \cos(90 - t_8) = 634,213$
$SrB_3 = SrO_3 * \cos(90 - t_3) = 411.591$	$SrB_9 = SrO_9 * \cos(90 - t_9) = 572,638$
$SrB_4 = SrO_4 * \cos(90 - t_4) = 472.078$	$SrB_{10} = SrO_{10} * \cos(90 - t_{10}) = 457,845$
$SrB_5 = SrO_5 * \cos(90 - t_5) = 626.983$	$SrB_{11} = SrO_{11} * \cos(90 - t_{11}) = 294,028$
$SrB_6 = SrO_6 * \cos(90 - t_6) = 641.607$	$SrB_{12} = SrO_{12} * \cos(90 - t_{12}) = 217,114$

*Таблиця 2.11 Значення потужності без системи орієнтування в залежності від місяця*

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру
Srб	202	300	411	472	626	641	644	634	573	458	294	217

Розглянемо, на прикладі середнього місячного показника сонячної радіації (сонячної постійної) в Дніпрі (кВт\*г / м<sup>2</sup> / день), який був отриманий за даними NASA.

*Таблиця 2.12 Значення сонячної інсоляції в залежності від місяця*

м	січ	лют	бер	кві	тра	чер	лип	сер	вер	жов	лис	гру	Всього
	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,7	5,08	3,66	2,27	1,2	0,96	3,36

Порівняти розрахункові показники з безпосередніми показниками NASA неможливо, так як розрахункові дані для конкретного часу в конкретний день, в той час як інформація NASA в середньому за місяць, але ми можемо побачити чітку відповідність і там, і там, рівень радіації постійно зростає, досягає максимального в липні і далі падає до кінця року.

Для порівняння ефективності всіх видів систем орієнтування створимо візуалізацію розрахунків

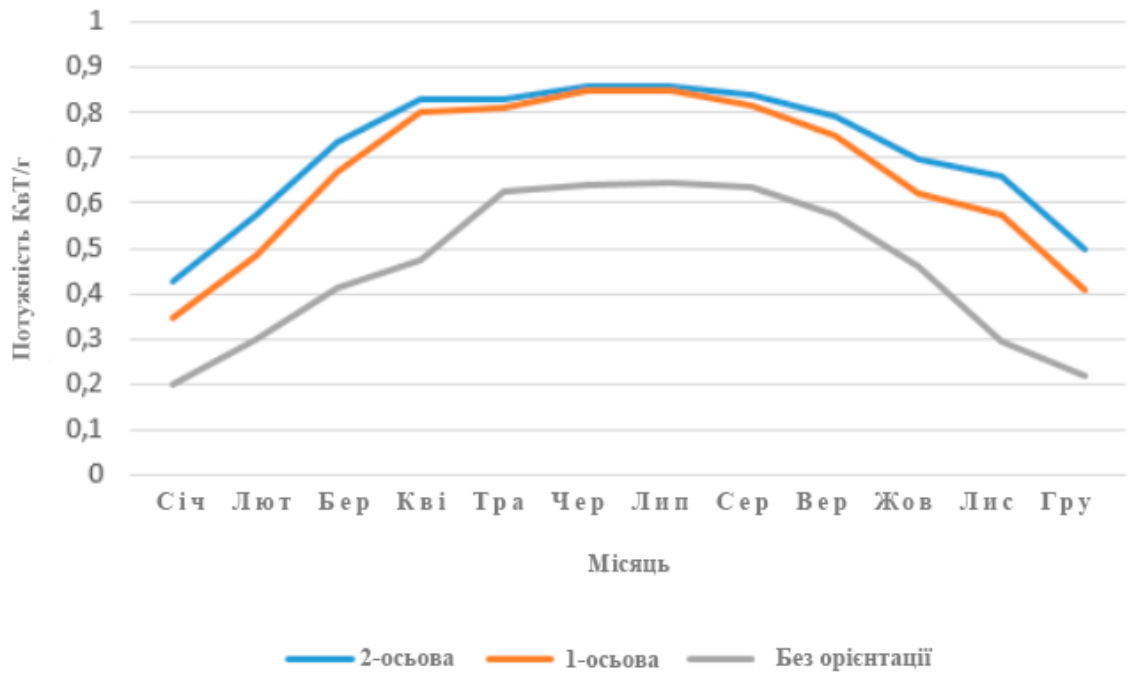


Рисунок 2.10 Графік максимальної потужності на 1 м<sup>2</sup> в залежності від дати

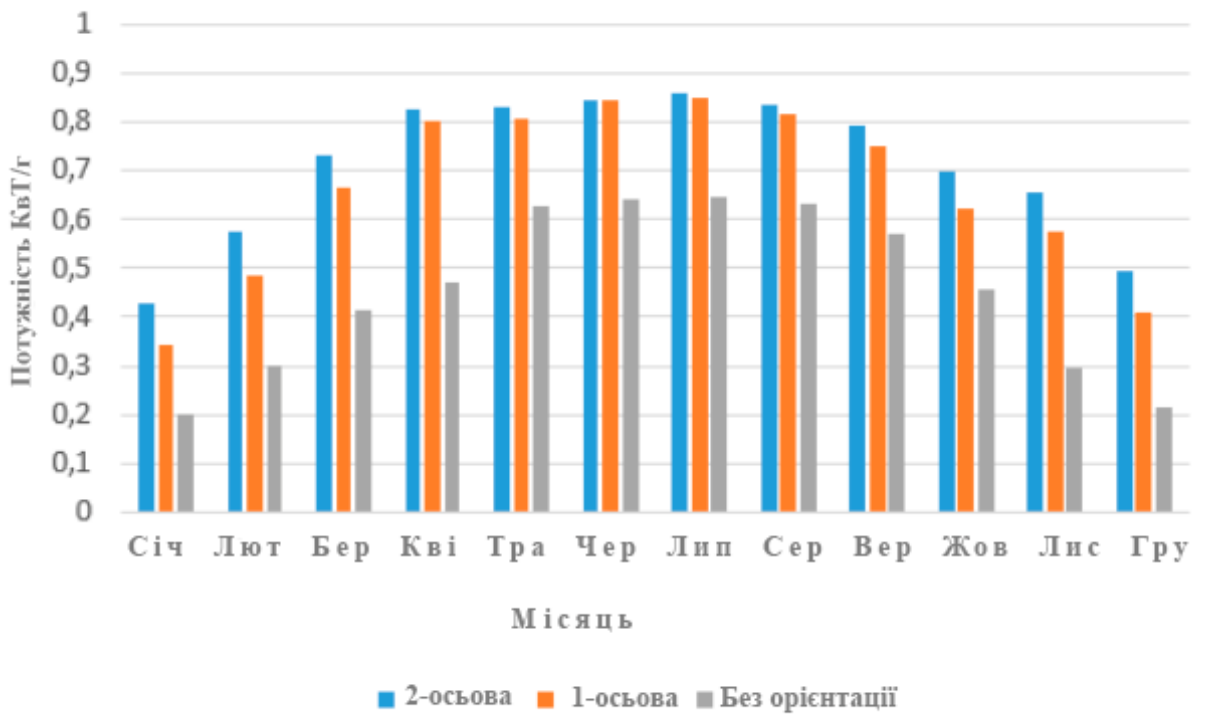


Рисунок 2.10 Гістограма максимальної потужності на 1 м<sup>2</sup> в залежності від дати.

За графіками ми можемо побачити, що системи орієнтування максимально себе реалізують в холодну пору року. Різниця між одноосною і двухосною системами в літню пору практично немає, проте з жовтня по березень двовісна система орієнтування дає вигоду до 30 відсотків у порівнянні з одноосною.

Сумарно за рік одноосьова система орієнтування дає приріст приблизно 51 відсоток у порівнянні з панелями без орієнтування, двовісна, ще більше - 63 відсотки.

В економічній частині буде досліджено що система орієнтування в загальній сумі займає приблизно чверть вартості в порівнянні з панелями без системи орієнтування ( $\approx 8000$  грн /  $32800$  грн), витрати на її обслуговування мінімальні. При прирості продуктивності в 53 відсотка її використання однозначно обгрунтовано. Так як за рік одноосьова система орієнтування дає приріст 53 приблизно 51 відсоток у порівнянні з панелями без орієнтування, двовісна - 63 відсотки.

### **Висновки по розділу**

Для міста Дніпро проведено розрахунок ефективності різних систем орієнтування сонячних панелей. Для цього була розрахована максимальна потужність, яку може отримати панель площею  $1\text{м}^2$ , для розрахунку були обчислені висота сонцестояння, сонячний кут, часовий кут, справжній сонячний час і інші величини для даної місцевості. За рік одноосьова система орієнтування дає приріст приблизно 51 відсоток у порівнянні з панелями без орієнтування, двовісна - 63 відсотки.

## РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДВОВІСНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

### **3.1 Вибір розробляемого об'єкта**

За результатами розрахунків, проведених в розділі 2 можна зробити висновок що найбільш ефективною є 2-вісна система орієнтування, однак її використання має сенс тільки при невисоких витратах на установку і обслуговування в порівнянні з одноосной. Існує багато готових варіантів виконання, але в основному вони відрізняються високою вартістю в слідстві невеликого спектру в обраних компонентах.

Завданням цього розділу - запропонувати конструкцію при якій була б можлива орієнтація установки по двох осях, а також запропонувати і обгрунтувати вибір всіх її компонентів.

### **3.2 Конструктивне виконання установки**

Пропонована конструкція складається з нерухомого підстави; рухомої основи, що приводиться в рух електромеханічною системою азимутального обертання; двох стійок; рами з закріпленими на ній чотирма СБ приводиться в рух електромеханічною системою стеження за оптимальним кутом.



На рисунку нижче приведений ескіз установки:



*Рисунок 3.1 - конструкція системи*

Основні деталі конструкції:

- рама з СБ типу КСМ-190;
- рухомий каркас;
- нерухомий каркас;
- блоки двох редукторів включаючи черв'ячний редуктор;
- два крокових двигуна (далі КД);
- датчик положення Сонця;
- п'ять кінцевих вимикачів.

В якості елементів поглинання сонячної енергії приймемо 4 сонячні батареї КСМ-190, як найбільш економічно обґрунтовані. Площа однієї сонячної панелі дорівнює 1,26 м<sup>2</sup>.

Величина маси рами з чотирма СБ типу КСМ-190 становить 102 кг, ширина - 3,2 м, висота - 1,6 м.



*Рисунок 3.2 Сонячна панель КСМ-190*

Таблиця 3.1 Характеристики сонячної панелі КСМ – 190

Сонячна батарея	КСМ-190
Потужність $P_{max}$ , Вт	190
Напруга в точці Max Power, В	35,7
Струм в точці Max Power, А	5,4
Напруга холостого ходу, В	44,7
Струм короткого замикання, А	5,8
Комутаційна напруга, В	24
Габаритні розміри, мм	1586x806x35
Маса, кг	16

В якості силових механізмів, що забезпечують поворот фотоелектричної установки, використовуємо редуктори з загальними передавальними відносинами 1: 250 (по азимуту) і 1: 900 (по куту місця). На рисунку 3.2 показані редуктори, з'єднані з КД, для механізмів переміщення по азимуту і куту місця.



Рисунок 3.3 - Двигуни КД -5д з редукторами

В таблиці 3.2 представлені паспортні характеристики двигуна КД -5Д.

Таблиця 3.2 - Паспортні характеристики крокової двигуна

<b>Характеристики</b>	<b>Показники</b>
Напруга живлення, В	24,48
Максимальний струм фази, А	3
Статична похибка спрацювання кроку, хв	27
Номінальний момент, Н * м	0,1
Максимальна частота спрацювання кроків в номінальному режимі, Гц	16000
Режим роботи	Довготривалий
Одиничний крок КД, градус	1,5
Одиничний крок при використанні драйвера типу DQ356M, градус	0,03
Номінальний момент інерції навантаження, кг * м <sup>2</sup>	4*10 <sup>-6</sup>
Номінальна прийомистість, крок/с	2000
Момент інерції ротора, кг * м <sup>2</sup>	7*10 <sup>-6</sup>
Опір фазної обмотки постійному струму, Ом	10,1
Індуктивність фазної обмотки, мГн	16+-4
Максимально допустиме значення струму в фазових обмотках при імпульсному форсуванню, А	7
Граничне підвищення температури обмоток, *С	+170

Граничне підвищення температури корпусу, С	+130
Момент інерції навантаження, кг * м2	4*10-6
<b>Характеристики</b>	<b>Показники</b>
Максимальний момент при частоті задаючих імпульсів 2000 Гц і інерції навантаження $J_n = 2 * 10^{-6}$ , кг * м2	0,5 Н*м
Максимальний момент при частоті задаючого імпульсу 2000 Гц і інерції навантаження $J_n = 8 * 10^{-6}$ , кг * м2	0,4 Н*м

В установці застосовуються шестифазні двигуни КД-5д. Шість обмоток двигуна з'єднуються в трифазне включення (в зірку або трикутник). В цьому випадку можна використовувати кілька типів драйверів: КND BD3Н, DQ-356М, DM-356М.



*Рисунок 3.4 – Драйвер типу КND BD3Н*

### 3.3 Розрахунок моментів інерції конструкції

Для дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи стеження, необхідно знати величину приведенного до валу двигуна моменту інерції рами з СБ. У розробленій конструкції змінюється момент інерції механізму, а саме зміна положення 60 рами з СБ по куту місця, що призводить до зміни моменту інерції по азимуту. Тому потрібно провести розрахунок моменту інерції механізму, в якому встановлені чотири СБ типу КСМ-190. Момент інерції механізму визначається за такою формулою:

$$\begin{cases} J_h = \frac{1}{12} * m(w^2 + d^2) \\ J_d = \frac{1}{12} * m(h^2 + w^2) \\ J_w = \frac{1}{12} * m(h^2 + d^2) \end{cases}$$

де  $m$  - маса рами з СБ;  $h$  - висота рами з СБ;  $d$  - ширина рами з СБ,  $w$  - глибина рами з СБ

Приведений до валу двигуна момент інерції зменшується на величину, рівну квадратній залежності від передаточного числа редуктора  $i$  ( $i = 900$  згідно з паспортними даними).

Розрахуємо момент інерції для азимутального виконавчого механізму стеження при двох крайніх положеннях рами з СБ по куту місця: перший варіант - рама з СБ знаходиться у вертикальному положенні (кут місця дорівнює 0 градусів); другий варіант - рама з СБ знаходиться в горизонтальному положенні (кут місця дорівнює 90 градусів). Спрощено,

механічна частина установки, коли рама з СБ знаходиться у вертикальному положенні, показана на рисунку 3.2а, а коли рама з СБ знаходиться в горизонтальному положенні – відображено на рисунку 3.2б.

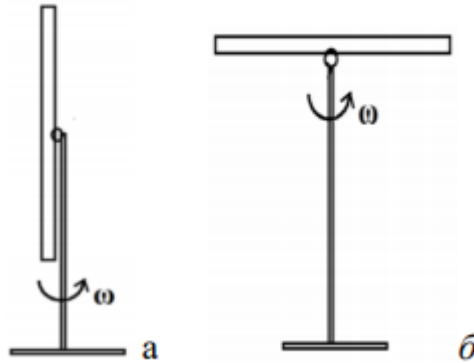


Рисунок 3.4 - Розташування конструкції рами з СБ при куті місця, рівному 0 і 90 градусів

В першому варіанті момент інерції можна розрахувати, як для пластини з шириною  $d$  глибиною  $w$  і масою  $m$  за такою формулою:

$$J_1 = \frac{1}{12} * m(d^2 + w^2)$$

$$J_1 = 87.04 \text{ кг} * \text{м}^2$$

$$J_{i1} = \frac{J_1}{i^2} = 107.4 * 10^{-6} \text{ кг} * \text{м}^2$$

В другому варіанті момент інерції можна розрахувати, як для твердого кубоїду з висотою  $h$ , шириною  $d$ , глибиною  $w$  і масою  $m$  за формулою:

$$J_1 = \frac{1}{12} * m(h^2 + d^2)$$

$$J_1 = 108.9 \text{ кг} * \text{м}^2$$

$$J_{i2} = \frac{J_1}{i^2} = 134 * 10^{-6} \text{ кг} * \text{м}^2$$

Розрахунок моментів інерції може бути використаний при подальших розрахунках перехідних процесів.

Для дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи стеження необхідно провести розрахунок величини додаткового моменту від вітрового навантаження, діючого на раму з СБ. Момент від вітрового навантаження може бути розрахований за такою формулою:

$$M_{\text{вітр}} = \frac{1}{4}SLW$$

де  $W = 0,61V^2$ ;  $S$  - площа СБ;  $L$  - висота рами (установки);  $V$  - швидкість вітру.

Таблиця 3.3 - Величина моменту для крокової двигуна від швидкості вітру

Швидкість вітру, м / с	1	5	10	15	20	25	30
Момент вітрового навантаження, Н * м	0,6	15	60	130	240	375	540
Наведений момент до валу двигуна по куту місця, Н * м	0,00066	0,0166	0,066	0,148	0,26	0,4	0,6
Наведений момент до валу	0,0024	0,06	0,24	0,54	0,96	1,5	2,16



двигуна по азимуту, Н * м							
---------------------------	--	--	--	--	--	--	--

При використанні двигуна КД-5д в установці при швидкості вітру 15 м / с моменту дії вітрового навантаження в системі переміщення по азимуту перевищується максимальний момент двигуна КД-5д в 1,4 рази, при швидкості вітру 20 м / с - в 2,4 рази, а в системі переміщення по куту місця при швидкості 25 м / с момент від дії вітрового навантаження перевищується за максимальний момент крокового двигуна. У рекомендаціях щодо застосування КД для виключення збою в КД момент навантаження не повинен бути вище 0,3-0,5 від максимального моменту. Відповідно при швидкостях вітру вище 15 м / с краще переводити установку в горизонтальне положення.

### **3.4 Підвищення живучості та надійності функціонування АСУ стеження при дії вітрової навантаження**

Для підвищення живучості та надійності роботи АСУ стеження при дії ураганного вітрового навантаження (наприклад, швидкість вітру більше 25 м / с), яка може привести до пошкодження механізму переміщення, пропонується переводити раму з СБ в захисне горизонтальне положення. Це необхідно робити по сигналу від МНС (або іншого інформаційно-технічного джерела поширення оперативної інформації про штормове попередження) або від оператора компанії, яка обслуговує установку, через канал GPRS. В АСУ стеження здійснюється прийом команд від модуля GPRS через контролер стеження. В установці встановлений кінцевий вимикач, який визначає горизонтальне положення рами по куту місця. При отриманні сигналу про ураганне вітрове навантаження АСУ стеження переводить раму з СБ в горизонтальне положення. При цьому йде повідомлення оператору, що система переведена в захисне положення.

### 3.5 Вибір геліотрекера

Для максимального використання енергії сонця, панель повинна постійно знаходитися перпендикулярно сонячним променям. Геліотрекер дослівно можна перекласти як «відстежувач шляху Сонця». Через те, що він постійно спрямований на Сонце. Простий і досить недорогий варіант показаний на рисунку 1.27. Виберемо для установки геліотрекер АЕDR-8300-1К2. Він складається з фотоприймача, контролера і виконавчого механізму у вигляді двох двигунів з редукторами, що повертають СБ і укріплений на ньому фотоприймач. Фотоприймач являє собою невелику плату з укріпленими на ній 4 фотодатчиками. Всі фотодатчики розділені між собою хрестоподібною перегородкою. При орієнтації на Сонце освітлені всі чотири фотодатчика. Сонце в процесі свого руху по небосхилу змінює освітленість фотоприймача, тому 2 або 3 фотодатчика виявляються в тіні. В алгоритмі роботи датчика всього 9 команд в залежності від положень фотоприймача. На рисунку 1.27 кожен фотодатчик позначється окремою буквою. Всі можливі варіанти освітлення датчиків представлені в таблицях нижче.

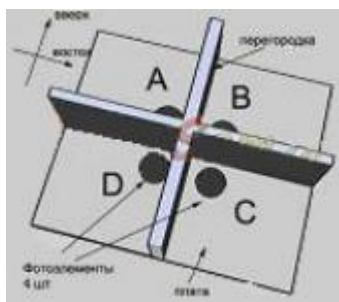


Рисунок 3.4 – Геліотрекер

Таблиця 3.4 - Можливі варіанти освітлення датчиків для  
двухкоординатной системи стеження

Датчик А	1	0	1	1	0
Датчик В	0	1	1	0	0
Датчик С	0	0	0	0	1
Датчик D	0	0	0	1	0

Застосування	Сонце вище та західніше	Сонце вище та східніше	Сонце вище	Сонце західніше	Сонце нижче і східніше
Вертикальний рух	Вверх	Вверх	Вверх	Стояти	Вниз
Горизонтальний рух	На захід	На схід	Стояти	На захід	На схід

Таблиця 3.4 - Можливі варіанти освітлення датчиків для двухкоординатной системи стеження

Датчик А	0	0	0	1
Датчик В	1	0	0	1
Датчик С	1	1	0	1
Датчик D	0	1	1	1
Застосування	Сонце східніше	Вниз	Вниз	Стояти
Вертикальний рух	Стояти	Вниз	Вниз	Стояти
Горизонтальний рух	Сонце східніше	Стояти	Сонце західніше	Стояти

У таблицях 3.3 та 3.4 були прийняті наступні позначення: 1 - датчик освітлений; 0 - датчик в тіні перегородки.

### 3.6 Розробка алгоритму стеження за сонцем

Наступне завдання - забезпечення стеження конструкції СБ за Сонцем з заданою точністю. Вирішується наступним шляхом:

- розробкою нелінійного алгоритму стеження за Сонцем;
- забезпеченням підвищення статичної точності переміщення при використанні КД;
- використанням спеціалізованого контролера стеження за Сонцем (32-розрядної мікроконтролера з вбудованим 16-розрядних АЦП), спеціального двокоординатного датчика положення Сонця (володіє заданою чутливістю в широкому діапазоні зміни освітленості), двокоординатного електромеханічного виконавчого механізму з КД (забезпечує нелінійний режим позиціонування).

Для відстеження положення Сонця найбільш раціонально використовувати Безперервно-дискретне стеження за Сонцем. Безперервно-дискретне стеження за Сонцем мається на увазі переміщення на необхідний (заданий) кут з подальшою зупинкою КД. Його необхідно реалізовувати, виходячи з таких положень:

- чим вище точність спостереження СБ за Сонцем, тим більше СБ виробляє електричної енергію в систему. Підвищення точності стеження відбувається шляхом зменшення кроку переміщення в електромеханічному виконавчому механізмі;
- при зменшенні освітленості (в кілька разів) вироблення енергії СБ падає і підвищення точності стеження в системі не призводить до істотного збільшення вироблення енергії.

Виникає парадокс в постановці і вирішенні завдання: підвищення точності стеження веде до збільшення енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом, а збільшення кроку переміщення під час стеження веде до зменшення точності стеження. Таким чином, виникає необхідність пошуку найоптимальнішого вирішення даного завдання. З вищенаведеного аналізу маємо: чим вище освітленість, тим менше необхідно робити крок переміщення, наприклад, при максимальній освітленості робити крок

переміщення дорівнює 1 градусу, при зменшенні освітленості в 5 разів збільшувати дискретність переміщення треба до 3 градусів. На рисунку 3.6 наведено графік зміни дискретного кроку переміщення в залежності від освітленості.

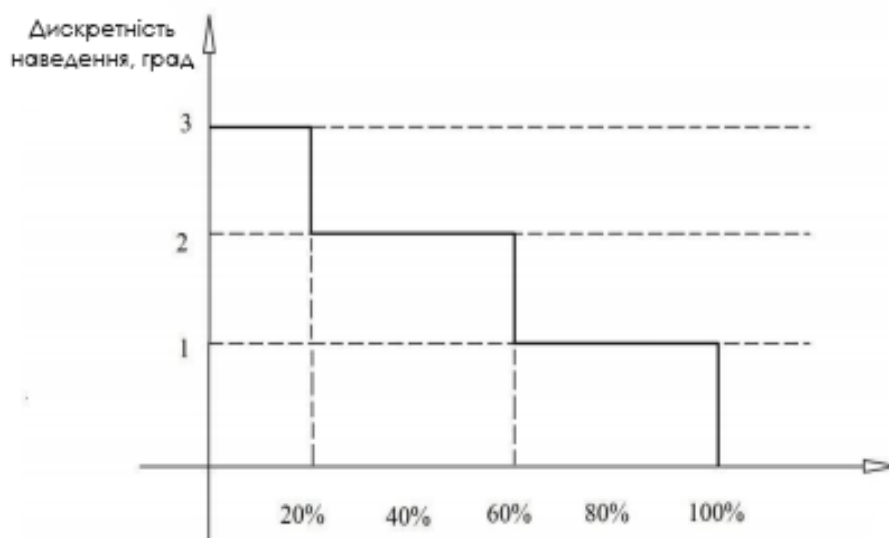


Рисунок 3.7 – Графік зміни дискретного кроку перемещення

В датчику положення сонця (далі ДПС) прийняті наступні позначення:  $I_{ф1}$ ,  $I_{ф2}$  і  $I_{ф3}$ ,  $I_{ф4}$  - струми в протилежних гранях фотоелементів датчика;  $I_{ф5}$  - струм в тилевій частині фотоелемента датчика,  $I_{ф6}$  - струм фотоелемента у верхній межі усіченої піраміди. При вимірюванні струмів в ДПС в мікроконтролері КСС здійснюється фільтрація (усереднення) значення струмів фотоелементів, а саме протягом секунди відбувається 60 опитувань струму граней ДПС і усереднення значень струму. Це необхідно для виключення випадкових змін освітленості (наприклад, можливе випадкове затінення ДПС від прольоту птиці, вертольоти і т.д.) і зменшення рівня перешкод. Також в КСС є аналогова фільтрація на операційних підсилювачах, підключених до фотоелементів ДПС. Середні значення струму в протилежних гранях фотоелементів датчика розраховуються за такими формулами:

$$I_{cp1} = \frac{I_{\phi1} + I_{\phi3}}{2}$$

$$I_{cp2} = \frac{I_{\phi2} + I_{\phi4}}{2}$$

Середню поточну освітленість  $E_1$  можна представити як середнє значення струмів в протилежних гранях ДПС, наведені в відносних одиницях (в порівнянні з максимальним струмом фотоелемента датчика при максимальній освітленості), за такою формулою:

$$E_1 = \frac{I_{cp1} + I_{cp2}}{2I_{max}}$$

де  $I_{max}$  - максимальне значення струму фотоелемента датчика.

В таблиці нижку для прикладу наведені енергетичні характеристики системи при зміні дискретного кроку переміщення, що показують, як зменшення величини дискретного кроку переміщення (кута переміщення) призводить до збільшення споживаної електричної енергії.

Таблиця 3.6 - енергетичні характеристики системи при зміні дискретного кроку переміщення.

№	Швидкість (Гц)	Прискорення (крок/с <sup>2</sup> )	Гальмування (крок/с <sup>2</sup> )	Час (с)	Робочий струм (А)	Пусковий струм (А)	Споживана потужність (Вт)
1	3000	3000	3000	0,9	1	1,4	29,4
2	3000	3000	3000	1,3	1	1,4	29,4
3	3000	3000	3000	1,67	1	1,4	29,4

Примітка:

- № 1 з дискретним кроком переміщення 2 градуси;
- експеримент № 2 з дискретним кроком переміщення 3 градуси;
- експеримент № 3 з дискретним кроком переміщення 5 градусів

Алгоритм стеження з використанням датчика положення Сонця полягає в наступному: якщо струми в фотоелементах протилежних граней піраміди фотодатчика ( $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 3}$  і  $I_{\phi 2}$ ,  $I_{\phi 4}$ ) рівні, то переміщувати раму з СБ не потрібно, а якщо є відмінність, то необхідно провести переміщення рами з СБ (із закріпленим на ній датчиком положення Сонця) в такому напрямку, щоб компенсувати цю різницю по струму. Якщо два протилежних фотоелемента (в протилежних гранях усіченої піраміди) у датчика положення Сонця показують однаковий струм, то датчик положення Сонця (і відповідно СБ) точно наведений на Сонце або знаходиться в тіні і переміщення рами проводити не потрібно. Якщо тиловий фотоелемент датчика положення Сонця ( $I_{\phi 5}$ ) показує найбільший струм, то Сонце світить із зворотного боку рами і необхідно повернути раму в напрямку Сонця. Це відбувається на наступний день після сходу сонця.

Вищеописаний алгоритм стеження пояснюється нижче. Середнє значення струму (струм в гранях фотоелементів ДПС) визначається за формулами (3.1) і (3.2). Розрахунок відносної помилки положення по азимуту відбувається за наступною формулою:

$$\Delta l_2 = \frac{l_{\phi 1} - l_{\phi 3}}{1}$$

При  $\Delta l_2 > 0$  йде відставання дійсної траєкторії і необхідно робити переміщення (стеження за Сонцем) при виконанні умови:

$$\Delta l_1 \geq K_{\text{зн}}$$

При цьому відбувається переміщення по азимуту з формуванням заданої траєкторії позиціонування на заданий кут. За умови  $\Delta l_1 > 0$  відбувається випередження дійсної траєкторії по азимуту і переміщати раму з СБ не потрібно.

За умовою:

$$\Delta l_1 \leq K_{\text{зн}}$$

рама з СБ наведена з заданою точністю на Сонце.

При виконанні умови:

$$l_{\phi 1} \leq l_{\phi 3} \leq l_{\phi 5}$$

переміщення немає і рама з СБ знаходиться в тіні.

Виконання умов:

$$\begin{cases} l_{\phi 5} > l_{\phi 1} \\ l_{\phi 5} > l_{\phi 2} \\ l_{\phi 5} > l_{\phi 3} \\ l_{\phi 5} > l_{\phi 4} \end{cases}$$

Це означає, що Сонце світить із зворотного боку рами і необхідно виконати поворот рами (по азимуту) в початкове положення.

Розворот рами з СБ по азимуту здійснюється при максимально можливій швидкості обертання КД. При підході до заданому положенню (коли помилка зменшується до 0,5 градуса) відбувається гальмування зі зниженою швидкістю і прискоренням.



Розрахунок відносної помилки положення по куту місця визначається за такою формулою:

$$\Delta l_2 = \frac{l_{\phi 2} - l_{\phi 4}}{l_{cp2}}$$

Переміщення рами здійснюється, коли відносна помилка  $\Delta l_2$  перевищить задану відносну величину помилки, яка визначається як зона нечутливості  $K_{zn}$ .

При виконанні умови:

$$\Delta l_2 \geq K_{zn}$$

раму з СБ необхідно переміщати вгору, при цьому відбувається формування алгоритму переміщення на заданий кут.

При виконанні умови:

$$\Delta l_2 \leq -K_{zn}$$

раму з СБ необхідно переміщати вниз, при цьому відбувається формування алгоритму переміщення на заданий кут.

При виконанні умови:

$$-K_{zn} < \Delta l_2 < K_{zn}$$

рама з СБ не рухається і це означає, що вона наведена точно на Сонце або знаходиться в тіні.

Величина коефіцієнту зони нечутливості може вибиратися в межах 5-10% зони при визначенні закінчення перехідного процесу по керуючому

впливу. Однак при переміщенні на 1 градус і при коефіцієнтах зони нечутливості 5-10% потрібно забезпечити чутливість датчика положення Сонця на 0.05-0.1 градусів, що важко піддається реалізації в датчиках положення Сонця.

Тому для уникнення великої величини перерегулювання по положенню при спостереженні і можливості реалізації ДПС значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{zn}$  має бути не більше 25% від заданої величини переміщення. З огляду на, що переміщення відбувається дискретно на 1-3 градуси в напрямках обох координат, значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{zn}$  має бути змінно залежно від заданої величини переміщення, яка в свою чергу залежить від поточної освітленості. У таблиці нижче наведено зміну значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{zn}$ , розрахованого за формулою.

$$K_{zn} = \begin{cases} 0.25^\circ & \text{при } E = (100 - 60)\% \text{ від } E_{max} \\ 0.5^\circ & \text{при } E = (100 - 20)\% \text{ від } E_{max} \\ 0,75^\circ & \text{при } E = (100 - 0)\% \text{ від } E_{max} \end{cases}$$

Де  $E$  – значення поточної освітленості;

$E_{max}$  - максимальна освітленість.

Таблиця 3.7 - Зміна значення коефіцієнта зони нечутливості

Дискретність заданого переміщення в режимі стеження СБ за Сонцем, градус	1	2	3
Точність переміщення, %	25	25	25

Величина поточної освітленості від максимальної, %	100-60	60-20	20-0
Значення коефіцієнта зони чутливості, градус	0,25	0,5	0,75

На рисунку 3.7 показана функціональна схема системи з урахуванням алгоритму стеження за таблицею 3.4.

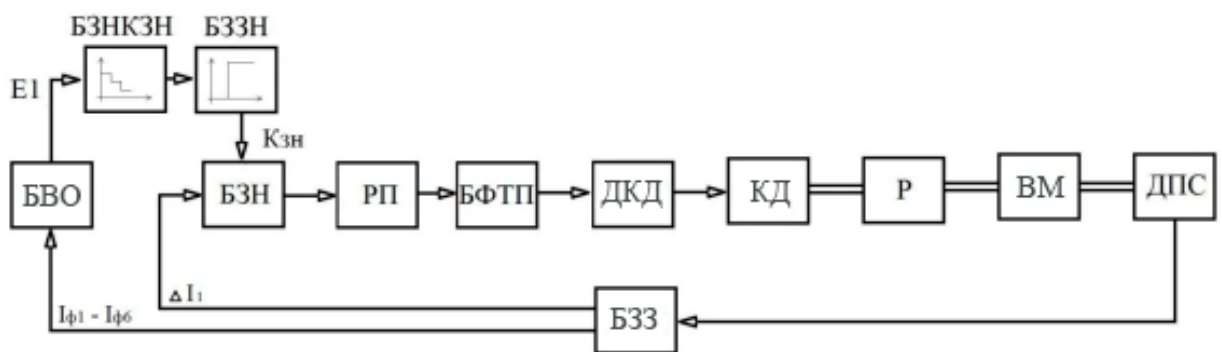


Рисунок 3.8 - Функціональна схема системи стеження з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості

На рисунку 3.8 прийняті наступні позначення:

БЗНКЗН - блок завдання нелінійного коефіцієнта зони нечутливості;

ДКД - драйвер крокової двигуна;

КД - кроковий двигун;

Р - редуктор;

ВМ - виконавчий механізм;

ДПС - датчик положення Сонця;

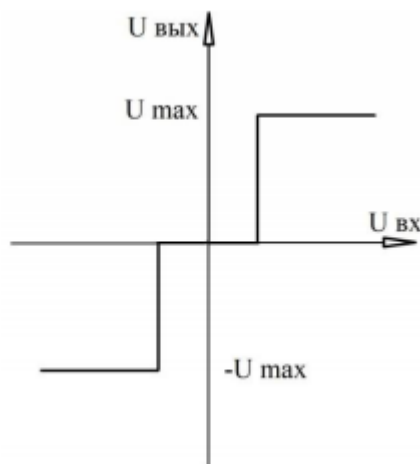
- БЗЗ - блок зворотного зв'язку;
- БВО - блок визначення освітленості;
- БЗЗН - блок визначення зони нечутливості;
- БЗН - блок завдання нелінійного коефіцієнта зони нечутливості;
- РП - регулятор положення;
- БФТП - блок формування траєкторії позиціонування;
- КЗН - коефіцієнт 75 зони нечутливості;
- Е1 - середня поточна освітленість, розрахована (виміряна) по ДПС;
- ΔП - відносна величина помилки положення по азимуту;
- Іф1, Іф2, Іф3, Іф4 - струми в похилих площинах ДПС.

Регулятор положення (РП) можна представити, як релейний елемент із змінною величиною зони нечутливості за формулою:

$$U_{\text{вих рп}} = \begin{cases} U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{вх}} < -K_{\text{зн}} \\ 0 & \text{при } -K_{\text{зн}} < U_{\text{вх}} < K_{\text{зн}} \\ +U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{вх}} > K_{\text{зн}} \end{cases}$$

де  $U_{\text{вх}}$  - вхідний сигнал;  $U_{\text{вих рп}}$  - вихідний сигнал;  $K_{\text{зн}}$  - величина зони нечутливості релейного елемента.

На рисунку 3.8 показано його характеристику:



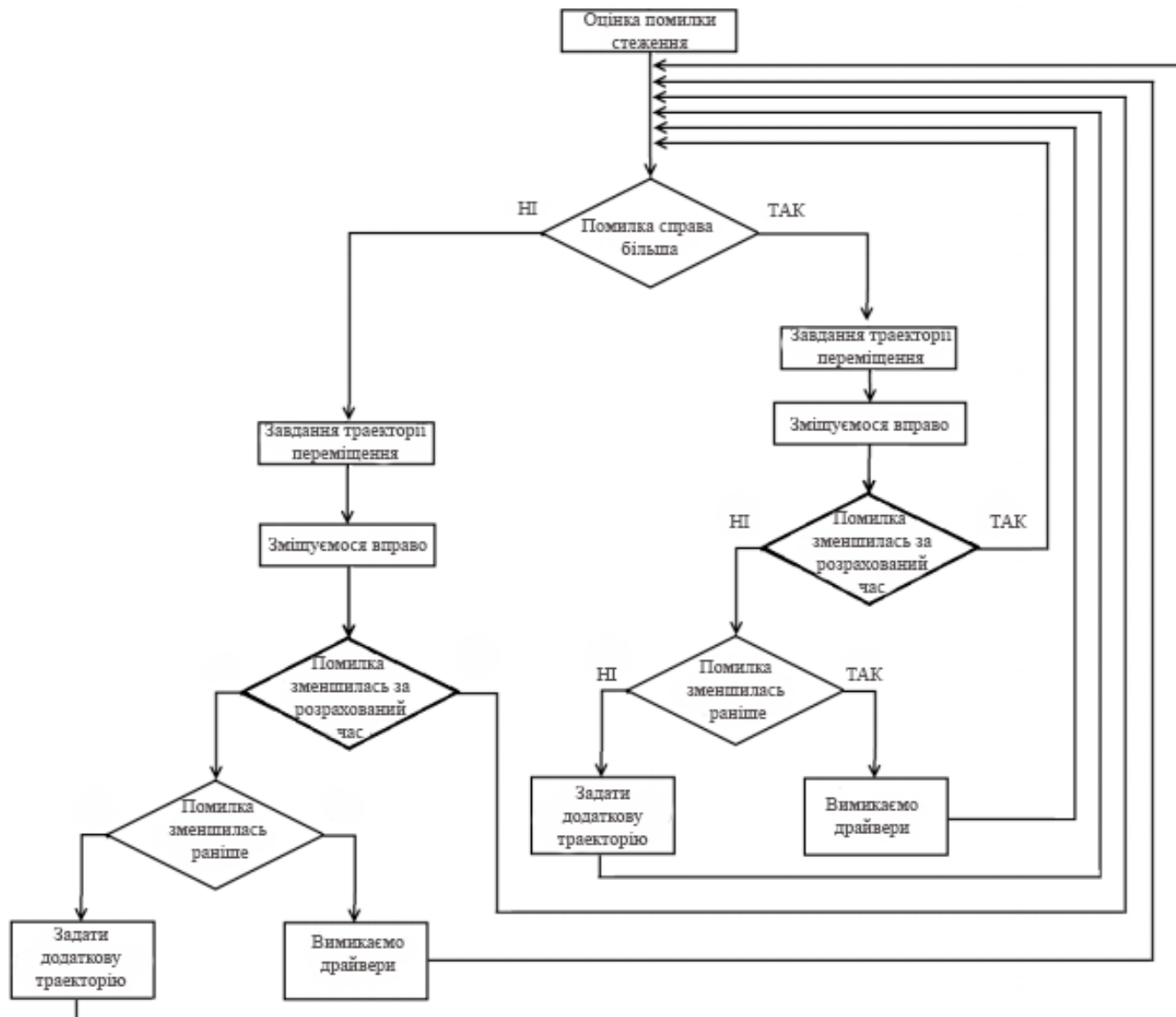
Характеристика блоку зони нечутливості визначається по таблиці 3.7 і її величина пропорційна поточній освітленості  $E_1$ , яка визначається за формулою 3.19. Також її можна представити у вигляді:

$$K_{zn} = K_2 * E_1$$

де  $K_2$  - коефіцієнт передачі блоку визначення зони нечутливості.

При переміщенні рами з СБ закінчення режиму переміщення на заданий кут в режимі позиціонування (закінчення реальної траєкторії відпрацювання заданого переміщення) може випереджати або відставати від часу закінчення розрахункової траєкторії. Тому запропонований алгоритм корекції траєкторії, що забезпечує істотне зменшення перерегулювання по положенню. Алгоритм корекції траєкторії наведено на рисунку 3.9.

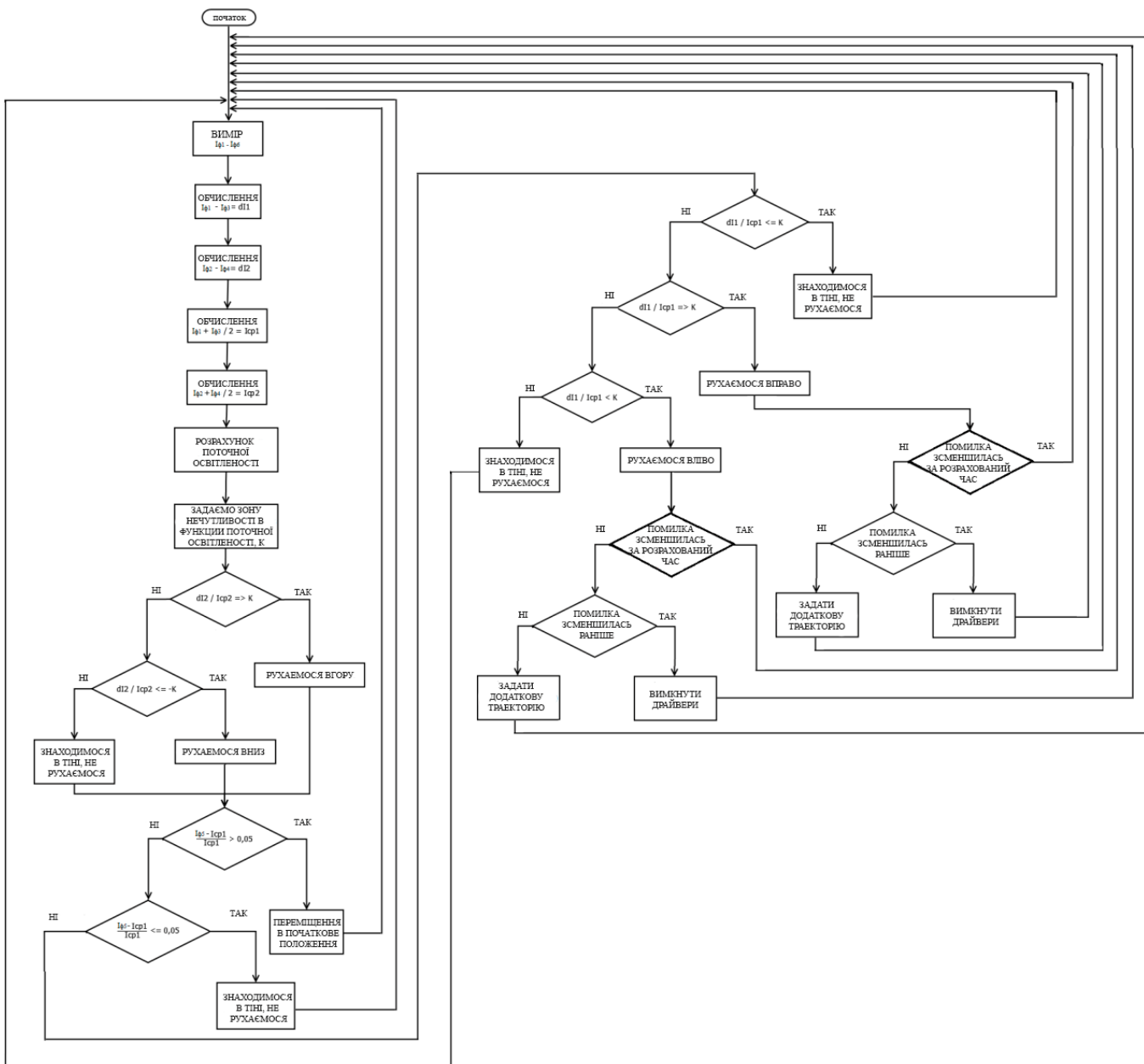
Рисунок 3.10 - алгоритм корекції траєкторії стеження.



В алгоритмі постійно відбувається оцінка помилки в переміщенні в режимі реального часу і порівнюється з зоною нечутливості (в релейному регуляторі). Як тільки значення помилки в переміщенні стає менше значення зони нечутливості (навіть якщо позиціонування не завершено), відбувається припинення переміщення шляхом відключення драйверів КД. У цьому випадку не буде перерегулювання по положенню. Якщо позиціонування завершено, але значення помилки в переміщенні більше значення зони нечутливості, необхідно провести корекцію положення рами шляхом введення

додаткового завдання на переміщення. Пропонується вводити коригувальну траєкторію, рівну 0.5 градусів по положенню. Завдання на коригувальну траєкторію можливо формувати кілька разів в мікроциклі стеження до повної компенсації помилки по положенню. Загальний алгоритм стеження за Сонцем наведено на рисунку 3.10.

Рисунок 3.11 - Алгоритм стеження за Сонцем



У запропонованій структурній схемі АСУ стеження за Сонцем в прямому каналі необхідно застосувати релейний елемент із змінною

величиною зони нечутливості. В умовах низької освітленості (ДПС і СБ) в самій системі стеження погіршується співвідношення сигнал / шум (шум - це фонова засвічення, відбитий сигнал світла від сторонніх предметів, шуми і наведення від довгого кабелю (установка з СБ може перебувати в 20 м від контролера стеження) і інше). Тому збільшення зони нечутливості, а саме значення коефіцієнта зони нечутливості КЗН при зменшенні поточної середньої освітленості  $E_1$  призводить до покращення фільтрації в системі АСУ стеження за Сонцем і до зменшення помилки від сигналу перешкод. Все перелічене вище дозволило розробити алгоритм стеження СБ за Сонцем при використанні датчика положення Сонця, що має нелінійну характеристику блоку зони нечутливості (змінну у функції освітленості) при визначенні необхідності режиму переміщення.

### 3.8 Розрахунок фотоелементів і вузлів зв'язку

Площу фотоелементів ДПС можна розрахувати за такою формулою:

$$S = \frac{I_m}{K_i E_n}$$

де  $I_m$  - максимальний струм фотоелементів ДПС;

$K_i$  - значення коефіцієнта інтегрального чутливості;

$E_n$  - рівень сонячної освітленості.

Максимальне значення струму фотоелементів ДПС  $I_m$  доцільно брати не більше 100-200 мА, щоб не збільшувати площу фотоелементів і відповідно габарити ДПС. Мінімальною освітленістю, при якій ДПС повинен проводити вимірювання, можна вважати 200 Вт / м<sup>2</sup>. Коефіцієнт інтегральної чутливості  $K_i = 10$  мА / лм.



Розрахована за формулою (3.20) площа повинна складати не менше  $10\text{см}^2$ . При цій площі фотоелементів датчик повинен забезпечувати можливість вимірювання переміщення не менше  $0.5$  градуса за положенням при зменшенні освітленості в  $10$  разів від максимальної.

Проведено розрахунок вузла зв'язку фотоелементів блоку датчиків положення Сонця з мікро-контролером. Параметри фотоелемента блоку положення Сонця: вихідна напруга при максимальній освітленості -  $0,5$  В; вихідний максимальний струм -  $100$  мА. Величина опору резистора навантаження вибирається за такою формулою:

$$R_n = \frac{U_d}{I_d} = \frac{0.5\text{В}}{0.1\text{А}} = 5 \text{ Ом}$$

де  $U_d$  - напруга фотоелемента;  $I_d$  - струм фотоелемента.

Обрано прецизійний (високоточний термостабільний) резистор типу С2-29В0,  $125$  Вт номіналом  $5,1$  Ом з точністю  $0,1\%$ . Виконано розрахунок коефіцієнта підсилення операційного підсилювача, що забезпечує підсилення сигналу з фотоелементів блоку датчика положення Сонця. Напруга на виході операційного підсилювача не повинна бути вище опорної (внутрішньої) напруги мікроконтролера STM32F372VCT6, а саме  $U_{\text{оп}} = 2,56$  В. Коефіцієнт підсилення розраховується за такою формулою:

$$K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{оп}}}{U_d} = \frac{2.56\text{В}}{0.5\text{А}} = 5.12$$

де  $U_{\text{оп}}$  - опорна напруга.

### 3.9 Розрахунок елементів плати управління

Для даної конструкції була обрана плата управління для пристрою стеження, здатна регулювати становище площини сонячного пристрою за обома осями, яка також підходить до використовуємих пристроїв і є надійною та економічно доцільною.

Для схеми стеження приймемо плату управління з 8-бітовим FLASH мікроконтролером серії PIC16F887-I/PT. Електрична схема плати управління показана на рисунку 3.11.

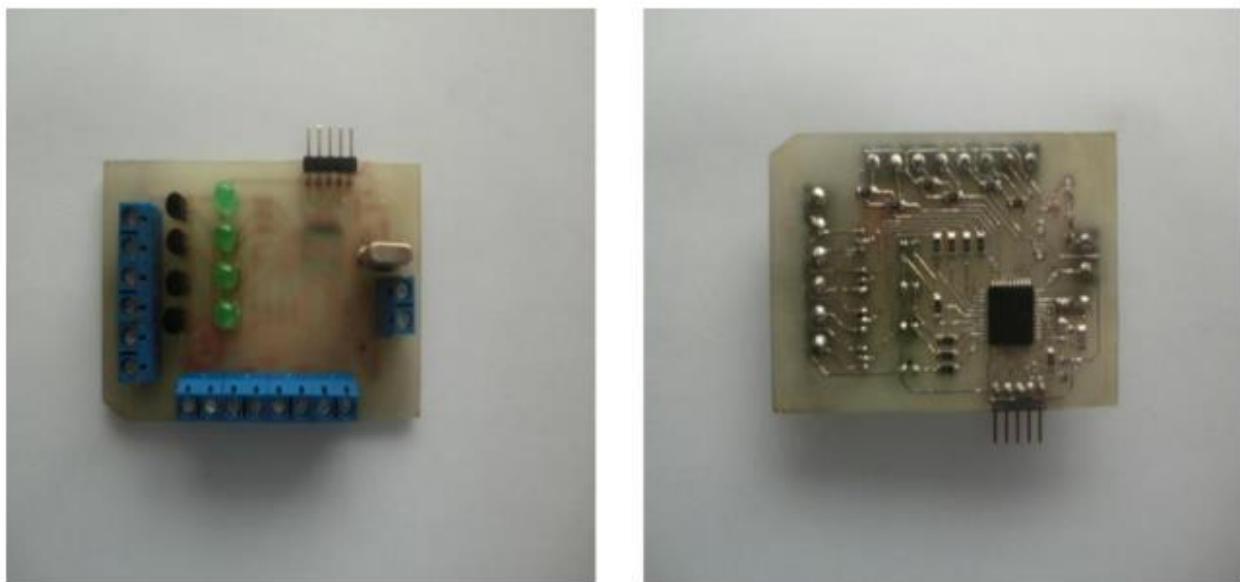


Рисунок 3.12 - Загальний вигляд плати управління пристроєм стеження за сонцем

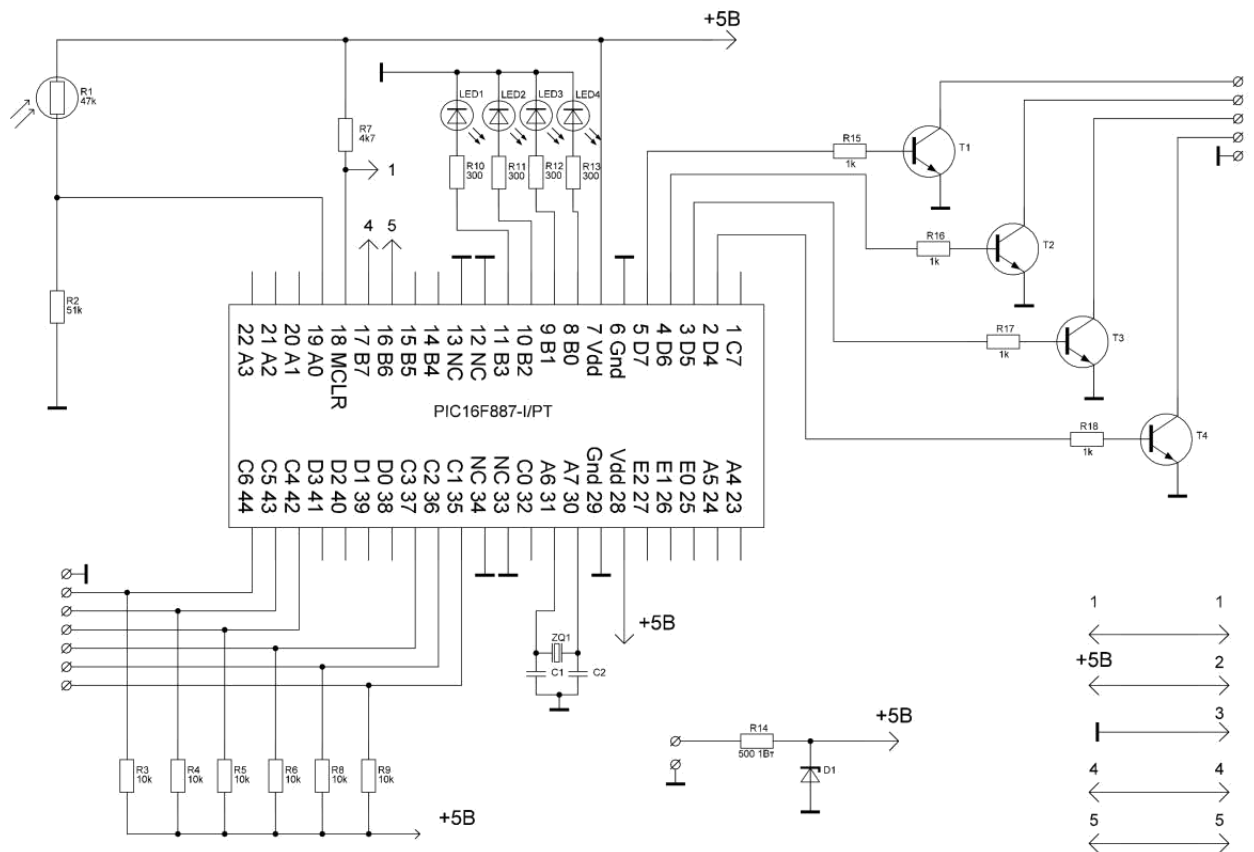


Рисунок 3.13 - Електрична схема плати управління пристроєм стеження за сонцем

Нижче представлені розрахунки елементів для плати управління.

Розрахунок резисторів  $R_{15-18}$ . Транзистори необхідні для подачі напруги на котушку реле, контакти якого запускають в роботу електричні приводу. Напруга живлення реле  $U_{вн} = 24 \text{ В}$ , опір реле  $R_{\text{реле}} = 200 \text{ Ом}$ . Звідси випливає, що струм, що проходить по транзистору дорівнює:

$$I_{mp} = \frac{U_{вн}}{R_{\text{реле}}} \text{ А}$$

Коефіцієнт підсилення струму  $K_u$  транзистора 2N551, приймаємо рівним 30. На базу транзистора необхідно подати струм:

$$I_6 = \frac{I_{mp}}{K_y} A$$

Напруга на ніжках мікроконтролера  $U_{мк}$  - 5 В. Розрахуємо необхідний номінал резистора, для того щоб на базі транзистора створити струм 0,004 А:

$$R_{15-18} = \frac{U_{мк}}{I_6} \text{ Ом}$$
$$R_{15-18} = \frac{5}{0.004} = 1.25 \text{ Ом}$$

Розрахунок резисторів  $R_{10-13}$ . Напруга на світлодіоді  $U_{св}$  - 2,3 В, струм світлодіода  $I_{\phi}$  - 20 мА. Розрахуємо величину, на яку необхідно знизити напругу мікроконтролера - 5 В, для того щоб діоди отримав необхідне живлення:

$$\Delta U = U_{вх} - U_{св} \text{ В}$$
$$\Delta U = 24 - 2.3 = 21.7 \text{ В}$$

Необхідно номінал резистору:

$$R_{10-13} = \frac{\Delta U}{I_{\phi}} \text{ Ом}$$
$$R_{10-13} = \frac{21.7}{0.02} = 1.085 \text{ Ом}$$

Для захисту виходу мікроконтролера від короткого замикання на світлодіоді необхідно, щоб споживання струму діодом не перевищувало електричного навантаження на мікроконтролері  $I_{нар.мк}$  - 20 мА.

$$R_{10-13} = \frac{U_{\text{МК}}}{I_{\text{наг.МК}}} \text{ Ом}$$

$$R_{10-13} = \frac{5}{0.02} = 250 \text{ Ом}$$

Розрахунок резисторів  $R_{3-9}$ . Резистори  $R_{3-9}$  застосовуються для уникнення помилкових спрацьовувань, опір кожного резистора становить 10 кОм.

Розрахунок резистора  $R_2$ . Фоторезистор  $R_1$  в темряві має опір 47 кОм, на світлі - 10 кОм. Тому резистор  $R_2$  обраний так, щоб напруга на вході змінювалося від 2,6 В до 4,1 В.

Розрахунок резистора  $R_{14}$ . Напруга блоку живлення треба зменшити на величину:

$$\Delta U = U_{\text{бп}} - U_{\text{вх}} \text{ В}$$

$$\Delta U = 4.1 - 2.6 = 1.5 \text{ В}$$

З урахуванням того, що одночасно можуть бути відкриті тільки один транзистор і 2 світлодіода, схема споживає не більше 50 мА. Опір резистора дорівнюватиме:

$$R_{14} = \frac{\Delta U}{I_{\text{сх}}} \text{ Ом}$$

$$R_{14} = \frac{1.5}{0.05} = 30 \text{ Ом}$$

### 3.10 Зняття ВАХ сонячної батареї

Під час розробки трекера було знято ВАХ (вольт-амперні характеристики) сонячної батареї (СБ) при різних рівнях освітленості: при високому рівню освітленості (яскраве сонце), хмарність, та різні кути нахилу батареї.

В таблиці нижче наведено ВАХ в умовах яскравого випромінювання та інших умовах, де

$l_{m1}$ - площа сонячної батареї, що знаходиться перпендикулярна Сонцю;

$l_{m2}$ - площа сонячної батареї, що знаходиться перпендикулярна Сонцю, а батареї розміщені за склом;

$l_{m3}$ - при умові коли між площиною сонячної батареї та сонячним випромінюванням кут в 60 градусів;

$l_{m4}$ - при умові коли між площиною сонячної батареї та сонячним випромінюванням кут в 60 градусів і батарея розміщена за склом;

Таблиця 3.8 – ВАХ сонячної батареї за умов  $l_{m1}$  та  $l_{m2}$

R, Ом	$l_{m1}$			$l_{m2}$		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6,7	0,83	125	103	0,7	104	71
22,7	2,74	121	329	2,34	103	238
44,7	5,21	117	606	4,22	95	396
110,4	9,85	90	878	8,64	79	674
230	12,83	57	716	11,97	53	622
252,7	12,86	52	654	12,02	48	571
274,7	12,9	48	606	12,16	45	538
340,4	13,06	39	501	12,28	37	443
477	13,31	29	372	12,87	28	347
922	13,51	16	199	13,29	15	192
$\infty$	14,06	0	0	13,59	0	0

Таблиця 3.9 – ВАХ сонячної батареї за умов  $l_{m2}$  та  $l_{m4}$

R, Ом	$l_{m1}$			$l_{m2}$		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6,7	0,83	125	103	0,7	104	71
22,7	2,74	121	329	2,34	103	238
44,7	5,21	117	606	4,22	95	396
110,4	9,85	90	878	8,64	79	674
230	12,83	57	716	11,97	53	622
252,7	12,86	52	654	12,02	48	571
274,7	12,9	48	606	12,16	45	538
340,4	13,06	39	501	12,28	37	443
477	13,31	29	372	12,87	28	347
922	13,51	16	199	13,29	15	192
$\infty$	14,06	0	0	13,59	0	0

Проінтерполюємо отримані значення в програмі MathCad 15 і побудуємо графік з отриманої ВАХ.

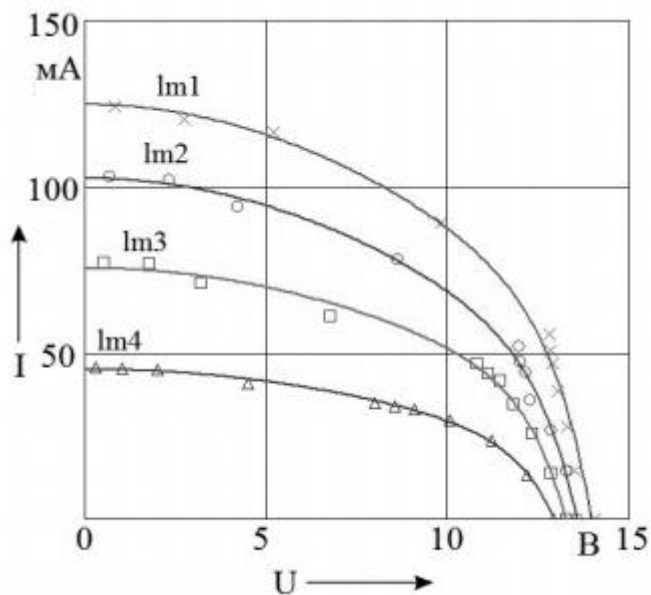


Рисунок 3.14 – ВАХ сонячної батареї при різних рівнях освітленості

В результаті інтерполяції було отримано формулу, що визначає функції ВАХ сонячної батареї:

$$f(u, K) = K_0 + K_1 e^u + K_2 u^2$$

де  $u$  - напруга СБ;

$K_0 - K_2$  коефіцієнти інтерполяції.

Також було підібрано коефіцієнти для кожного з перелічених випадків рівней освітленості  $Im_1 - Im_4$ , які представлені на рисунку 3.15.

$$K_{Im1} = \begin{pmatrix} 124.699 \\ -4.623 \times 10^{-5} \\ -0.363 \end{pmatrix} \quad K_{Im3} = \begin{pmatrix} 75.297 \\ -5.99 \times 10^{-5} \\ -0.224 \end{pmatrix}$$

$$K_{Im2} = \begin{pmatrix} 102.505 \\ -5.371 \times 10^{-5} \\ -0.329 \end{pmatrix} \quad K_{Im4} = \begin{pmatrix} 44.926 \\ -4.832 \times 10^{-5} \\ -0.147 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.15 - інтерполяційні коефіцієнти ВАХ СБ при різній освітленості

Наприклад, в разі освітленості  $Im_1$  отримуємо формулу:

$$I = 124,699 - 4,623 \cdot 10^{-5} e^u U - 0,363 \cdot U^2$$

З цього можна зробити висновок, що сонячна батарея втрачає 20-25% потужності, при розташуванні її за склом, тому що воно буде відбивати частину сонячного випромінювання. При більшому куті між площиною СБ та сонячним випромінюванням, відповідно, також зменшується виробляємої електроенергії.

Далі проінтерполюємо і відобразимо графік: залежність потужності СБ від опору навантаження  $P(R)$ , що представлено на рисунку нижче 3.16.



Для спрощення задачі розрахунку кривих  $P(R)$  скористаємося швидким і ефективним методом інтерполяції функцій, застосувавши інтерполяцію сплайнами.

У разі яскравого сонячного світла в випадку  $Im_1$ , навантаження дорівнює 110,4 Ом та результат показує найбільшу потужність, але для проведення основного експерименту і для подальшої експлуатації пристрою встановимо навантаження в 230 Ом. При такому навантаженні, трекер буде видавати необхідну кількість при генерації електроенергії при хмарних умовах, а також це допоможе краще реагувати в приміщеннях при штучному освітленні.

З отриманих залежностей (найбільш цікавою являється розрахована залежність потужності сонячної батареї, залежно від опору) спостерігаємо, що вони демонструють нам, як в залежності від навантаження, робоча точка сонячної батареї можна змістити в область мінімальної або нульової генерації. І тому, узгодження сонячної батареї з навантаженням є дуже важливим.

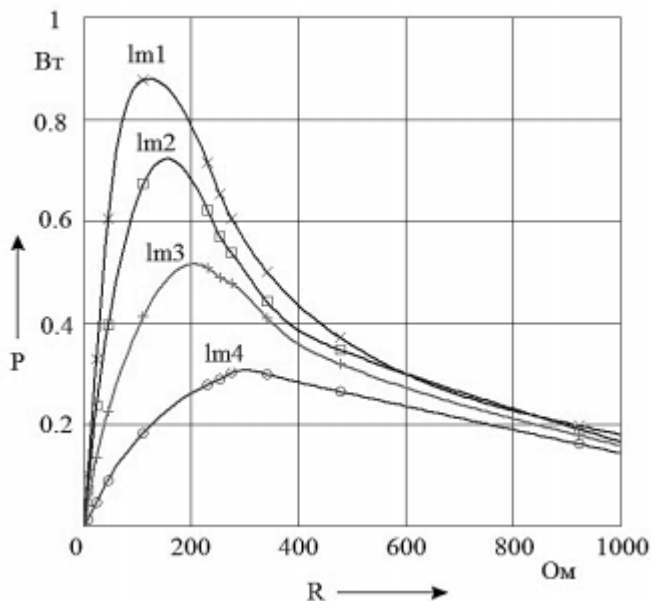


Рисунок 3.16 - Графік залежності потужності СБ від опору навантаження  $P(R)$

### 3.11 Основний експеримент

Сутьність експерименту полягає в порівнянні вироблення електроенергії в умовах стаціонарної установки сонячної батареї та при використанні

двоосьового трекера для сонячної батареї з горизонтальною і вертикальною осями обертання.

Цей достід проводиться з часу 12:40 (пік Сонця в м. Дніпро), спочатку тільки для горизонтальної осі обертання, а потім, в інший день, для вертикальної (в обох випадках кут нахилу був прийнятий  $53^\circ$ , що є оптимальним кутом). При 5-хвилинному інтервалі знімаються значення напруги на навантаженні. Трекер оретається за допомогою двигуна в напрямку із заходу на схід, фіксуючи значення напруги на півдні (стаціонарна установка СБ) і значення максимуму сонячної освітленості. Та всі отримані дані порівнюються між собою.

І процесі експерименту було знято 83 значень напруги на навантаженні для кожного варіанта установки сонячної батареї протягом дня. Далі перетворимо зняті дані в потужність, та виразим як відношення квадрата вимірюваної напруги до опору навантаження, що відобразимо в таблиці 4.3.

Лінійно проінтерполюємо отримані значення і покажемо графіки залежності потужності від часу.

На рисунку 3.17 показані графіки залежностей потужності від часу при проведенні досліді при горизонтальній вісі обертання, де  $p_1$  - при стаціонарній установці сонячної батареї,  $p_2$  - горизонтальній.

На рисунку 3.18 представлені графіки, які показують залежності потужності так часу, які були зняті при дослідженні роботи з вертикальною віссю обертання, де  $p_1$  - з використанням трекера стаціонарної установки СБ,  $p_2$  - з використанням трекера з вертикальною віссю обертання.

Таблиця 3.9 – ВАХ сонячної батареї за умов  $Im_3, Im_4$ 

Час t, г:хв	Горизонтальна вісь обертання				Вертикальна вісь обертання			
	Стационарна система р2		Використання трекера р1		Стационарна система р2		Використання трекера р1	
	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт	U, В	P, Вт
12:40	14,56	0,946	14,817	0,963	14,180	0,884	14,312	0,900
12:45	14,22	0,903	14,443	0,916	13,453	0,797	13,595	0,813
12:50	14,11	0,890	14,332	0,902	13,504	0,803	13,564	0,810
12:55	13,90	0,864	14,150	0,880	13,696	0,825	13,837	0,842
13:00	13,71	0,840	13,989	0,861	13,534	0,806	13,665	0,822
13:05	13,85	0,857	14,170	0,882	13,696	0,825	13,807	0,838
13:10	13,93	0,868	14,231	0,890	13,645	0,819	13,857	0,844
13:15	13,76	0,846	14,100	0,874	13,615	0,816	13,776	0,835
13:20	13,74	0,844	14,069	0,870	13,797	0,837	13,938	0,854
13:25	13,72	0,842	14,019	0,864	13,696	0,825	13,888	0,848
13:30	13,79	0,850	14,090	0,873	13,595	0,813	13,746	0,831
13:35	13,72	0,842	14,019	0,864	13,271	0,776	13,484	0,801
13:40	13,74	0,844	14,069	0,870	13,635	0,818	13,877	0,846
13:45	13,84	0,856	14,251	0,892	13,696	0,825	13,938	0,854
13:50	13,74	0,844	14,069	0,870	13,746	0,831	13,908	0,850
13:55	13,66	0,835	13,989	0,861	13,504	0,803	13,746	0,831
14:00	13,67	0,836	13,999	0,862	13,665	0,822	13,877	0,846
14:05	13,68	0,837	14,019	0,864	13,615	0,816	13,827	0,840
14:10	13,76	0,846	14,059	0,869	13,746	0,831	13,989	0,861
14:15	13,84	0,856	14,251	0,892	13,716	0,827	13,938	0,854
14:20	13,63	0,831	13,968	0,857	13,544	0,808	13,827	0,840
14:25	13,56	0,823	14,039	0,867	13,665	0,822	13,989	0,861
14:30	13,68	0,837	14,100	0,874	13,665	0,822	13,918	0,851
14:35	13,6	0,827	14,019	0,864	13,756	0,832	13,958	0,856
14:40	13,56	0,823	14,049	0,868	13,564	0,810	13,807	0,838
14:45	13,63	0,831	13,968	0,857	13,665	0,822	13,918	0,851
14:50	13,55	0,822	14,039	0,867	13,675	0,823	13,938	0,854
14:55	13,69	0,838	14,110	0,875	13,675	0,823	13,999	0,862
15:00	13,6	0,827	14,019	0,864	13,534	0,806	13,837	0,842
15:05	13,68	0,837	14,100	0,874	13,514	0,804	13,807	0,838
15:10	13,6	0,827	14,039	0,867	13,342	0,784	13,675	0,823
15:15	13,56	0,823	14,069	0,870	13,625	0,817	13,625	0,817
15:20	13,55	0,822	14,039	0,867	13,140	0,762	13,716	0,827
15:25	13,32	0,795	13,958	0,856	13,211	0,770	13,827	0,840
15:30	13,27	0,789	13,888	0,848	13,160	0,764	13,776	0,835
15:35	13,11	0,771	13,837	0,842	12,999	0,745	13,746	0,831
15:40	12,98	0,755	13,675	0,823	12,847	0,728	13,645	0,819
15:45	13,27	0,789	13,958	0,856	12,888	0,733	13,665	0,822
15:50	13,03	0,762	13,726	0,829	12,706	0,713	13,564	0,810
15:55	12,97	0,754	13,726	0,829	12,595	0,701	13,534	0,806
16:00	12,69	0,723	13,615	0,816	12,635	0,705	13,595	0,813



16:05	12,92	0,748	13,888	0,848	12,474	0,688	13,615	0,816
16:10	12,65	0,718	13,726	0,829	12,544	0,696	13,696	0,825
16:15	12,61	0,714	13,776	0,835	12,312	0,671	13,595	0,813
16:20	12,21	0,671	13,635	0,818	12,150	0,653	13,585	0,812
16:25	12,21	0,671	13,665	0,822	12,120	0,650	13,696	0,825
16:30	12,61	0,714	14,039	0,867	11,908	0,628	13,615	0,816
16:35	12,04	0,652	13,726	0,829	11,777	0,615	13,645	0,819
16:40	10,93	0,541	13,110	0,758	11,504	0,588	13,595	0,813
16:45	11,97	0,645	13,746	0,831	11,403	0,578	13,635	0,818
16:50	12,02	0,650	13,938	0,854	11,241	0,563	13,635	0,818
16:55	11,96	0,644	13,958	0,856	10,898	0,529	13,484	0,801
17:00	11,42	0,589	13,958	0,856	10,494	0,493	13,433	0,795
17:05	10,22	0,476	13,271	0,776	10,403	0,484	13,484	0,801
17:10	11,07	0,554	14,049	0,868	10,171	0,464	13,645	0,819
17:15	10,91	0,539	13,827	0,840	9,878	0,438	13,534	0,806
17:20	10,6	0,510	13,807	0,838	9,474	0,405	13,514	0,804
17:25	10,44	0,495	13,776	0,835	8,858	0,357	13,403	0,791
17:30	10,19	0,473	13,918	0,851	8,484	0,328	13,453	0,797
17:35	9,82	0,440	13,807	0,838	8,302	0,315	13,403	0,791
17:40	9,58	0,420	13,877	0,846	7,626	0,270	13,352	0,786
17:45	9,13	0,383	13,746	0,831	7,131	0,237	13,261	0,775
17:50	8,9	0,365	13,746	0,831	6,666	0,210	13,110	0,758
17:55	7,89	0,291	13,463	0,798	6,383	0,195	13,130	0,761
18:00	6,09	0,181	13,372	0,788	5,949	0,172	13,140	0,762
18:05	6,54	0,206	13,675	0,823	5,737	0,161	13,029	0,748
18:10	5,94	0,173	13,595	0,813	5,525	0,150	12,979	0,743
18:15	5,76	0,164	13,504	0,803	5,282	0,139	12,766	0,719
18:20	5,31	0,142	13,433	0,795	4,050	0,090	12,595	0,701
18:25	4,48	0,107	13,322	0,782	3,939	0,086	12,393	0,679
18:30	4,03	0,090	13,241	0,773	3,788	0,081	12,221	0,661
18:35	2,63	0,049	12,059	0,644	3,687	0,078	12,019	0,640
18:40	3,08	0,061	13,292	0,779	3,525	0,073	11,696	0,607
18:45	2,56	0,048	12,635	0,705	3,060	0,060	11,514	0,589
18:50	2,47	0,046	12,888	0,733	2,879	0,056	11,191	0,558
18:55	2,31	0,042	12,716	0,714	2,636	0,049	10,676	0,509
19:00	2,1	0,038	12,383	0,678	2,404	0,044	10,231	0,469
19:05	1,86	0,034	11,827	0,620	2,182	0,040	9,696	0,423
19:10	1,63	0,031	11,453	0,583	1,889	0,035	8,908	0,361
19:15	1,31	0,027	9,534	0,410	1,596	0,031	7,817	0,282
19:20	1,21	0,026	9,211	0,384	1,283	0,027	6,323	0,191
19:25	1,05	0,024	8,615	0,338	1,030	0,024	4,888	0,122
19:30	0	0	0	0	0	0	0	0

Знайдемо значення площ під кривими щоб розрахувати генерацію енергії за весь день. Візьмемо деякий інтеграл, значення меж якого будуть інтервалом часу дослід, а функціями - знайдені залежності.

Знайдемо кількість виробленої енергії в перший день і порівняємо їх між собою, де  $P_1$  - генерація енергії трекера з горизонтальною віссю повороту,  $P_2$ - генерація в стаціонарній установці СБ:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{12,667}^{19,5} P_1(t)dt}{\int_{12,667}^{19,5} P_2(t)dt} = \frac{5,351 \text{ Вт} * \text{год}}{3,884 \text{ Вт} * \text{год}} = 1,377$$

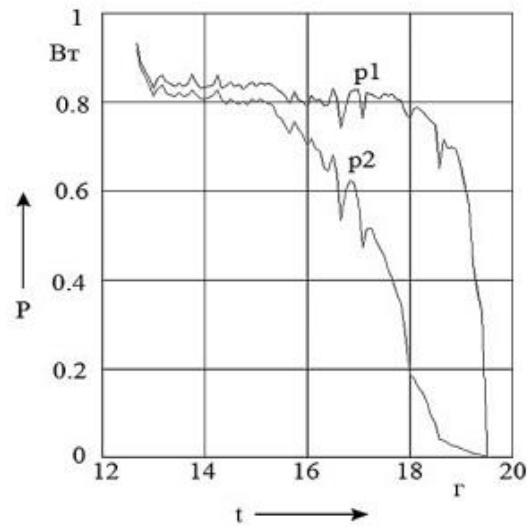


Рисунок 3.17 - Результат з горизонтальною віссю обертання

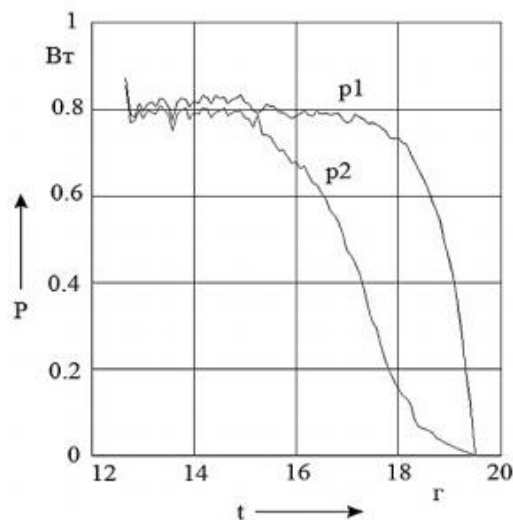


Рисунок 3.18 – Результат з вертикальною віссю обертання

Генерація енергія на другий день потрібно знайти для порівняння з енергією першого дня. Де  $P_1$  – генерація енергії з використанням трекера з вертикальною віссю обертання,  $P_2$  - генерація для стаціонарної установки батареї:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{12,667}^{19,5} P_1(t)dt}{\int_{12,667}^{19,5} P_2(t)dt} = \frac{4,978 \text{ Вт} * \text{год}}{3,550 \text{ Вт} * \text{год}} = 1,402$$

Аналізуючи всі данні, що були отримані з експерименту бачимо, що з точки зору вихідної потужності сонячні панелі розташовані, що керуються трекером, в порівнянні з статичними установками, значно ефективніші. Потужність, що виділяється панелями прямо пропорційна інтенсивності світла, яке падає на їх поверхню. Панелі, які повернені до Сонця на протязі всього дня, отримують найбільшу кількість світла. Панелі з використанням сонячного трекера отримують набагато більше світла. І це означає, що вихідна потужність збільшується, а отже збільшується і ефективність. Було також помічено, що найбільше зростання ефективності, у випадку використання трекера, було вранці та ввечорі, саме в той час, коли стаціонарна, нерухома система майже не отримує світла. В середині дня панелі отримували майже однакову кількість світла, і тому різниця в виробленні потужності була незначною.

Основною метою даного проекту було підвищення ефективності при використанні сонячних панелей. Розроблена автоматична система стеження за Сонцем, і, завдяки проведеному моделюванню і розрахункам, можна сказати, що система свою задачу вирішує.

З проведених розрахунків ми бачимо, що використання сонячного трекера дає приріст у виробленні енергії до 40%. Цікаво те, що приріст вироблення енергії практично не залежить від того, яку вісь обертання ми обрали.

## **Висновок**

1. Запропонована і обґрунтована конструкція двухосної системи орієнтування, всіх її складових частин і параметрів.
2. Розраховані моменти інерції конструкції від власної ваги і від вітрового навантаження. Запропоновано варіанти для забезпечення безпечної роботи конструкції.
3. Наведено та обґрунтовано вибір геліотрекера.
4. Розроблено алгоритм роботи пристрою стеження з урахуванням коефіцієнта нечутливості для максимально енергоефективної роботи.
5. Наведено розрахунок фотоелементів і вузлів зв'язку, а також обрана і розрахована плата управління.

## РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Завдання економічного розрахунку

В дипломній роботі було поставлено завдання - запропонувати і обґрунтувати конструкцію найбільш оптимальної системи орієнтування з сонячними панелями, яка найбільше економічно доцільна. Крім технологічного розрахунку в даному питанні дуже важливою частиною є економічний розрахунок, так як основним завданням являється проектування ефективної електромеханічної установки що буде реалізовувати свої потужності, з метою отримання прибутку і якщо конструкція економічно недоцільна, то використовувати її немає сенсу.

Використання двухосной системи орієнтування дає можливість виробляти максимальну кількість електроенергії, та дозволяє повноцінно використовувати максимальну кількість випромінювання сонця, що значно збільшує ефективність роботи сонячних панелей. Обладнання для всієї конструкції потрібно вибирати виходячи з технічної та економічної доцільності, необхідно розрахувати: мікроконтролер, фотодатчик та вузли зв'язку, запропонувати алгоритм роботи установки, запропонувати заходи з техніки безпеки та довгострокової роботі установки.

В даній роботі нам необхідно розрахувати та спроектувати систему орієнтування на прикладі чотирьох сонячних панелей, що вимагає відносно невеликої кількості різного обладнання. В процесі роботи не було розроблено чіткого програмного алгоритму роботи, тому передбачається враховувати роботу програміста по розробці алгоритму та створення програмного коду, так само як і не були обрані кабелі. Тому в економічному розрахунку взяті усереднені ціни на відповідні види кабелів і деяких інших речей, що, взагалі, практично не впливає на результати розрахунків.

В економічній частині нам, в першу чергу, необхідно розрахувати вартість роботи самої конструкції установки з огляду на ціну кожного елемента, вартість робочої сили для обслуговування системи.



## 4.2 Розрахунок вартості конструювання двухосної системи орієнтування сонячних панелей

Для створення установки залучаються співробітники підприємства, тому розрахунок проводиться з їх стандартної заробітної плати, за часом, що витрачається на роботу. Окремо беремо до уваги вартість монтажу конструкції за ринковою ціною, через складність власної оцінки трудомісткості такої процедури.

За формулою можемо розрахувати загальні витрати:

$$Z = (M + O) + Z_0 + Z_d + \text{ЄСВ} + N$$

Розрахунок витрат (3) проводиться на підставі планової калькуляції і включає наступні елементи:

- $M+O$  - основні матеріали, необхідні для виробництва стенду та спецобладнання;
- $Z_0$  - основна заробітня плата;
- $Z_d$  - додаткова заробітня плата;
- ЄСВ - єдиний соціальний внесок;
- $N$  - накладні витрати.

В таблиці 4.1 представлена вартість основного обладнання та матеріалів, використаних при проведенні робіт з виготовлення установки.

Таблиця 4.1 Список матеріалів і обладнання для будівництва конструкції

№ п/п	Назва	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1	Кроковий двигун КД – 5Д	2	1250	2500
2	Драйвер KND BD3H	1	100	2500
3	Кабелі	8	15*8	720
4	Геліотрекер AEDR-8300-1K2	1	270	270
5	Мікроконтролер PIC16F887-1/PT	2	105	210
6	Резистор C2- 29B-0,125	2	50	100
7	Сонячні панелі KSM 180	4	6000	24000
8	Стальна конструкція	1	2500	2500
Загалом				32,800

За доставку врахуємо витрати на перевезення вантажу від відділення пошти в розмірі 500 грн.

Вартість інших робіт рахуємо за вартістю роботи персоналу, що виконує монтаж.

Заробітна плата розраховується для інженера-електронщика за вартістю людина-година в таблиці 4.2.

Заробітна  $Z_0$  плата розраховується за виразом:

$$Z_0 = T_j + C_{\text{год}}$$

де  $C_{\text{год}}$  – вартість години роботи;  $T_j$  – час роботи.

Вартість години роботи розраховується за формулою:

$$C_{\text{год}} = \text{Оклад} / (8 * 22)$$

Для інженера:  $8000 / (8*22) = 45,08$  (грн/год)

Для програміста:  $10000 / (8*22) = 56,81$  (грн/год)

Для слюсаря:  $5000 / (8*22) = 28,4$  (грн/год)

Для вантажника:  $5000 / (8*22) = 28,4$  (грн/год)

Таблиця 4.2 - Розрахунок основної заробітної плати

Назва роботи	Виконавець	Трудоємність (чол-год)	Заробітна плата
Проектування	Інженер	10	451
Монтаж обладнання	Інженер	10	451
Написання програмного коду	Програміст	10	568
Додаткові роботи	Слюсарь	5	142
Вантажні роботи	Вантажник	5	142

Загалом вартість робіт:  $451 + 451 + 568 + 142 + 142 = 1754$  (грн)

Додаткова заробітня плата:

$$Z_d = 0,1 * Z_0 = 0,1 * 1754 = 176 \text{ (грн)}$$

Єдиний соціальний внесок:

$$ЕСВ = 0,22 * (З_д + З_о) = 0,22 * (1754 + 175) = 424 \text{ (грн)}$$

Таким чином, витрати на реалізацію проекту складуть:

$$З_{\text{ВИГ}} = 32800 + 500 + 1754 + 176 + 424 = 35654 \text{ (грн)}$$

### **4.3 Експлуатаційні витрати**

Витрати на експлуатацію складають:

$$C = C_a + C_{\text{т.о.}} + C_{\text{ін}}$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування;

$C_{\text{т.о.}}$  – витрати на технічне обслуговування и технічний ремонт;

$C_{\text{ін}}$  – інші витрати.

### **Розрахунок амортизаційних відрахувань**

Амортизація об'єкта основних засобів розраховуються виходячи з терміну його використання. Строк корисного використання об'єктів основних засобів, для нарахування амортизації береться не менше мінімально допустимого строку, який вказаний в нормативних документах для кожної з груп основних фондів. Мінімально допустимий строк корисного використання сонячних батарей становить 12 років.

Податковим кодексом України дозволено використовувати прямолінійний метод амортизації, при якому річна сума амортизації розраховується як відношення вартості, яка амортизується до терміну корисного використання об'єкта основних фондів.

$$C_a = \frac{C_{\text{виг}}}{T_{\text{п}}}$$

Звідси отримуємо:

$$C_a = 35654 / 12 = 2972 \text{ (грн/рік)}$$

### **Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт обладнання**

Фірми, що виготовляють аналогічне обладнання пропонують гарантійне обслуговування в розмірі 300 грн за сонячну батарею і прикладне обладнання. 4 сонячних батареї обійдуться в 1200 грн/рік.

Так само приймемо витрати в розмірі 100 грн в місяць для обслуговуючого персоналу для перевірки працездатності пристрою і протирання сонячних панелей від пилу.

Тоді маємо:

$$C_{\text{то}} = 1200 \text{ (грн/рік)}$$

Інші витрати (витрати з охорони праці, та інше), та розраховуються в розмірі 4% від фонду заробітної плати:

$$C_{\text{пр}} = 1200 * 0,04 = 48 \text{ (грн/рік)}$$

Всього:

$$C = 2972 + 1200 + 48 = 4220 \text{ (грн/рік)}$$

#### 4.4 Річна економія

Дана установка практично не витрачає електроенергію, її завданням є її виробництво. За даними на грудень 2020 року в Україні Зелений тариф –5,64 грн за кВт до кінця 2024 року.

Використаємо стандартну формулу приблизного розрахунку для сонячної батареї, а після перерахуємо її за коефіцієнтом, який був отриманий в другому розділі.

Щоб здійснити розрахунок сонячної батареї скористаємося формулою:

$$E = \frac{(I + K_0 * V_{\text{мод}} * K_{\text{вт}})}{U_{\text{вип}}}$$

- де:  $I$  – сонячна енергія, що потрапляє на поверхню Землі в горизонтальній площині. Для Дніпра  $I = 1250 \text{ кВт*год/м}^2 \text{ * рік}$ .
- $K_0$  - поправочний коефіцієнт перерахунку сумарного потоку сонячної енергії з горизонтальній площині на поверхню колектора. Для Дніпра цей коефіцієнт = 1.1.
- $V_{\text{модуля}}$  - номінальна потужність сонячної батареї. Вказується в паспортних даних до модуля.
- $K_{\text{вт}}$  - коефіцієнт, що враховує втрати сонячної батареї при перетворенні і передачі електроенергії. Його прийнято вважати 80-85%. Прийmemo для розрахунку 83.
- $U_{\text{вип}}$  - інтенсивність сонячної радіації, при якій фотоелектричні модулі тестуються, приймаемо 1000 Вт/м<sup>2</sup> (1 кВт / м<sup>2</sup>).

$$E = \frac{1250 * 1,1 * 0,76 * 0,83}{1} = 967,35 \text{ (кВт * год)}$$

За результатами другого розділу двовісна система орієнтування може дати нам в середньому 63 відсотків приросту споживаної енергії в порівнянні з установкою без системи орієнтування.

$$E = 967,35 * 1,63 = 1561,23 \text{ кВт год / рік}$$

І тоді, прибуток за рік маємо:

$$1561,23 * 5,64 = 8806 \text{ (грн/рік)}$$

### **Розрахунок строку окупності**

Розрахунок повного річного доходу:

$$E_{\text{річ повн.}} = E_{\text{год}} - C = 8806 - 4220 = 4586$$

Строк окупності проекту:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{E_{\text{річ.повн.}}} = \frac{35694}{4586} = 7,8 \text{ років}$$

### **Висновки за розділом**

В розділі була розрахована вартість конструювання і установки двухосної системи орієнтування сонячних панелей, яка з урахуванням всіх витрат на обладнання і роботу склала 35694 грн.

Крім цього були розраховані річні доходи з продажу зеленої енергії, витрати на обслуговуючий персонал, а також на ремонт обладнання, термін окупності проекту склав 7,8 років.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трекеры для солнечных электростанций [Electronic resource]. URL: <https://alternative-energy.com.ua/vocabulary/трекеры-для-солнечных-электростанции/>
2. Орієнтація і кут нахилу сонячних колекторів - <http://solarsoul.net/orientaciya-i-ugol-naklona-solnechnyx-kollektorov>
3. Кут нахилу і орієнтація сонячних батарей для максимальної продуктивності - <https://tcip.ru/blog/solar-panels/ugol-naklona-i-orientatsiya-solnechnyh-batarej-dlya-maksimalnoj-proizvoditelnosti.html>
4. Як впливає кут установки сонячних батарей - <https://leader-nrg.com.ua/blog/kak-vliyaet-ugol-ustanovki-solnechnyh-batarej/>
5. Кут нахилу і орієнтація сонячних батарей для максимальної продуктивності - <https://tcip.ru/blog/solar-panels/ugol-naklona-i-orientatsiya-solnechnyh-batarej-dlya-maksimalnoj-proizvoditelnosti.html>
6. Сонячні трекери - <http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032/>
7. Шиняков Ю.А., Шуригін Ю.А., Аркатова О.Е. підвищення енергетичної ефективності автономних фотоелектричних енергетичних установок
8. Попель О.С., Фрід С.Є., Альварес Г.М. До розрахунку надходження сонячної радіації на земну поверхню – геліотехніка
9. Плеханов С.І., Наумов А.В. Оцінка можливостей росту виробництва сонячних елементів на основі CdTe, CIGS і GaAs / Ge в період 2010-2025 р.р.
10. Капля Е. В. Автоматична система орієнтації сонячної батареї в умовах змінної освітленості
11. Аржанов, К.В. Двокоординатна система наведення сонячних батарей на Сонце
12. Сонячна енергетика / В.І. Виссарионов, Г.В. Дерюгіна, В.А. Кузнецова, Н.К. Малінін, 2008. - 276 с.