

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Володимир ШУТКО  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА  
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «ЕЛЕКТРОНІКА»  
ОПП «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

**Тема: «Система оптимального позиціонування сонячних панелей»**

Виконавець  
студент групи ЕС-501Бз \_\_\_\_\_ Бойко К. М.

Керівник  
д.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Пантеев Р.Л.

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Сініцин Р.Б.

**КИЇВ 2023**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет** аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

**Кафедра** електротехніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей

**Освітньо-кваліфікаційний рівень** бакалавр

**Спеціальність** 171 «Електроніка»

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Володимир ШУТКО  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи студента**

Бойко К. М.

- 1. Тема проекту (роботи):** «Система оптимального позиціонування сонячних панелей»
- 2. Термін виконання проекту (роботи):** з \_\_\_\_\_ 2022 р. до \_\_\_\_\_ 2023 р.
- 3. Вихідні данні до проекту (роботи):** Розробити систему контролю положення сонячних панелей з орієнтуванням на енергоефективні системи.
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**
  1. Аналіз існуючих систем ЕП;
  2. Вимоги до проєктованої системи;
  3. Вибір типу двигуна в залежності від його ха-рактеристик;
  4. Вибір перетворювача та реалізація САК ЕП;
  5. Варіанти реалізації системи повороту блоку СП та залежність генерації СЕС від куту нахилу СП;
  6. Залежність від куту нахилу СП генерації СЕС;

7. Реалізація одновісних та двовісних систем повороту блоку СП;
8. Економічна та технічна обґрунтованість використання СПБСП;
9. Структура пристрою;
- 10 Алгоритм управління та схема плати.

**5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:**

1. Енергетичні характеристики системи при зміні дискретного кроку переміщення;
2. Алгоритм роботи системи повороту СП;
3. Схема системи відслідковування;
4. Вплив різних світлових чинників на виробництво енергії фотоелектричними модулями;
5. Результати досліджень та висновки.

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Система оптимального позиціонування сонячних панелей» за об'ємом складає \_ сторінки, містить \_ таблиць, \_ ілюстрації, використано \_ інформаційних джерел.

Перелік ключових слів: СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ВІДСЛІДКОВУЮЧА СИСТЕМА, КУТ НАХИЛУ, ТРЕКЕР, СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ГЕЛІОТРЕКЕР.

У данній роботі розроблено та описано принцип отримання якомога більшої кількості сонячної енергії за допомогою регулювання положення фотоелектричних панелей.

Було розроблено власну систему задля збільшення і покращення видобутку енергії Сонця, яка автоматично корегує сонячні панелі так, щоб кут між ними та сонячними променями був прямий. Розглянуто основні переваги та недоліки різних існуючих систем стеження за Сонцем. Було розроблено алгоритм роботи відслідковуючого пристрою та спроектовано його подальшу технічну реалізацію.

Об'єктом дослідження є сонячна панель.

Предметом дослідження є позиційний електропривід, який призначений для регулювання положення сонячної панелі.

Метою дипломної роботи є розробка системи автоматизованого управління електроприводом, проектування алгоритму роботи автоматизованої системи корегування положення панелі в залежності від цілей та умов її використання.

Актуальність роботи полягає у тому, що зараз заміна традиційних джерел енергії на відновлювані джерела є дуже важливим, але низька ефективність та вартість таких систем затримують їх поширення. Створення ефективної системи

управління фотоелектричним перетворювачем може спонукати до ширшого використання. Ця робота може бути застосована у різних галузях, таких як сільське господарство та промислове виробництво електроенергії

# ЗМІСТ

Вступ.....	
1. Аналіз існуючих систем ЕП повороту блоку СП .....	
1.1. Аналіз існуючих систем ЕП.....	
1.2. Вимоги до проектованої системи.....	
1.3. Вибір типу двигуна в залежності від його ха-рактеристик.....	
1.4. Вибір перетворювача та реалізація САК ЕП.....	
Висновки до розділу.....	
2. Варіанти реалізації системи повороту блоку СП та залежність генерації СЕС від куту нахилу СП.....	
2.1 Залежність від куту нахилу СП генерації СЕС .....	
2.2 Реалізація одновісних та двовісних систем повороту блоку СП .....	
2.3 Економічна та технічна обгрунтованість використання СПБСП.....	
Висновки до розділу.....	
3. Проектування системи автоматизованого керування ЕП.....	
3.1. Робота системи, вибір геліотрекеру .....	
3.2. Алгоритму відслідковування положення Сонця .....	
3.3. Ефективність роботи системи .....	
Висновки до розділу.....	
4. Реалізація системи автоматизації ЕП повороту СП.....	
4.1 Структура пристрою.....	
4.2. Моделювання системи засобами MATLAB.....	
4.3. Дослідження стійкості цифрової системи.....	
4.4. Алгоритм управління та схема плати.....	
Висновки до розділу.....	
5. Безпека на робочому місці.....	
Висновки до розділу.....	
6. Охорона природи.....	
Висновки до розділу.....	

Висновки.....

Список використаних джерел .....

## ВСТУП

Сучасний світ дедалі більше розвивається в галузі сонячної енергетики. Ця форма енергії відрізняється максимальною простотою використання, доступністю ресурсів, екологічною безпечністю та всеосяжністю. Ці характеристики зумовлюють геліоенергетику як один з найбільш перспективних напрямків у розвитку відновлюваної енергетики.

Найбільш розумним застосуванням сонячних енергетичних установок (СЕУ) є використання їх в регіонах без стаціонарної мережі електроживлення. Заміна дизельних генераторів на СЕУ в таких регіонах допомагає не тільки зменшити енергетичні та екологічні проблеми, але й є вигідною з економічної точки зору.

Використання систем відстеження Сонця допомагає скоротити час окупності системи та знизити вартість виробленої електроенергії.

Хоча фотоелектричні станції (ФЕС) мають очевидні переваги, їх впровадження обмежують висока вартість обладнання та низька ефективність перетворення енергії порівняно з іншими видами енергетичних установок. Це змушує розробників ФЕС шукати нові технічні рішення, такі як сонячні трекери, щоб підвищити ефективність, продуктивність та знизити вартість енергії, яку вони генерують. Використання сонячних трекерів забезпечує підвищення продуктивності ФЕС в середньому на 15-72%, залежно від типу трекера, географічного положення станції, кліматичних умов і пори року. Однак, економічні та технічні обмеження включають додаткові капітальні витрати на придбання та монтаж сонячних трекерів, більш високі витрати на обслуговування через наявність рухомих механічних частин, та необхідність більшої площі для розміщення сонячних батарей порівняно з жорстко закріпленими сонячними панелями. Технічні обмеження визначаються



характеристиками сонячного трекера, такими як робочий діапазон кутів спостереження, максимальне вітрове навантаження та метод стеження за положенням Сонця.

## РОЗДІЛ 1

### Аналіз існуючих систем ЕП повороту блоку СП

#### 1.1. Аналіз існуючих систем ЕП

В Київській області є значні можливості для використання сонячної енергії в індивідуальному споживанні, особливо в сільській місцевості. Розширення застосування сонячних установок не тільки призведе до значної економії енергоресурсів та покращення якості життя, але й зменшить екологічний вплив.

Проте, дослідження використання фотоелектричних модулів (ФМ) в сонячних панелях показали їх низьку економічну ефективність та значні втрати на сучасному енергетичному ринку [1,2]. Щоб покращити це положення, можна зменшити вартість ФМ або підвищити їх ефективність. Перша можливість може бути здійснена, знижуючи вартість виробництва ФМ, або знижуючи вартість матеріалу геліоприймача [3,4].

Для того, щоб підвищити збір сонячної енергії, є декілька варіантів реалізації:

- Використання багат шарових фотоприймачів на гетеропереходах;
- Застосування двосторонніх фотоелектричних перетворювачів у конструкції;
- За допомогою додачі конденсаторів підвищувати фотовідгук;
- Встановлення спеціальних систем відстеження положення Сонця;

Щодо підвищення ефективності збору сонячної енергії, можна використовувати багат шарові фотоприймачі на гетеропереходах, застосовувати двосторонні фотоелектричні перетворювачі, підвищувати фотовідгук за допомогою додавання конденсаторів та встановлювати спеціальні системи стеження за Сонцем. Хоча більшість з цих варіантів не є раціональними з точки зору ціни та енергоефективності, останній з усіх варіантів є найбільш вигідним у данній ситуації [5].

Величина куту падіння сонячних променів на фотоелектричні модулі напряму впливає на потужність отриману від світлоенергетичної установки. Установка стаціонарних ФМ може призвести до втрат потужності до 40-50%, в порівнянні з безперервним орієнтуванням на Сонце [6,7]. Для підтримання прямого кута падіння між фотоелектричними модулями та сонячним промінням впродовж дня застосовують системи стеження. Для цього слід буквально змінити опорну конструкцію і тоді такий спосіб підійде і для вже працюючих СЕС.

## **1.2. Вимоги до проектованої системи**

За допомогою сонячного трекера можна досягти більшої енергоефективності сонячної енергетичної установки. Сонячний трекер - це електромеханічний пристрій, який здійснює слідування за положенням Сонця на небосхилі та повертає сонячну панель у відповідному напрямку для отримання максимальної кількості сонячної енергії. Принцип дії сонячного трекера досить простий - контролер з використанням датчиків визначає оптимальне положення сонячної панелі та приводить її в рух до необхідної сторони.

Система сонячного трекера працює впродовж дня і постійно оновлює

інформацію. Це дозволяє збільшити показник виробленої електричної енергії на 20-30 відсотків. Однак, система не працює ефективно при умові підвищеної хмарності. Трекер позиціонується тільки по одній осі та має мале споживання самої системи.

Схема будови сонячного трекера вельми проста, за допомогою двох фоторезисторів (рис. 1.1) ми можемо визначити положення Сонця.

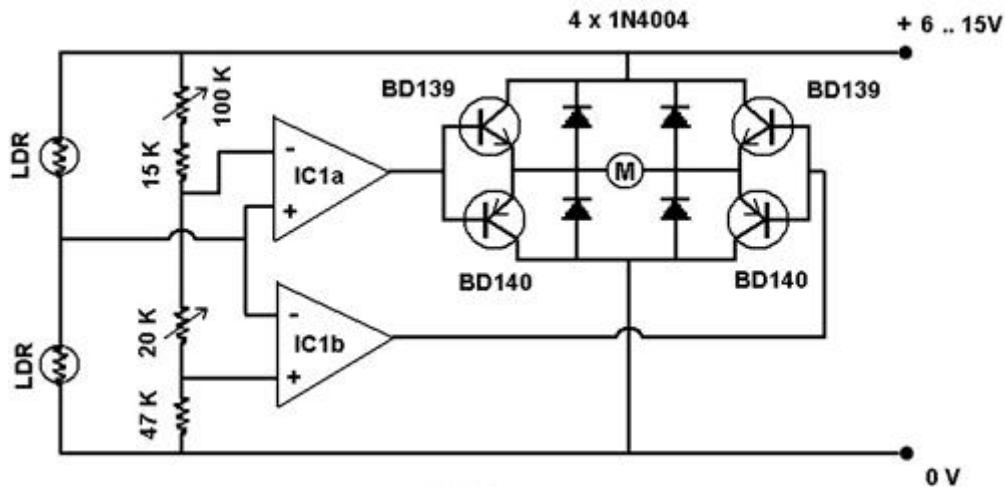


Рис.1.1. Принципова схема сонячного трекера

Схема на основі операційного підсилювача LM1458 (К140УД20), транзисторів BD139 (КТ815Г, КТ961А) та BD140 (КТ814Г,КТ626В), фоторезисторів, діодів 1N4004 (КД243Г), резистори. Підключення двигунів відбувається за схемою Н-моста (H-bridge), що дозволяє комутувати струм до 500 мА при напрузі живлення 6-15В.

Транзистори в схемі працюють в парі діагонально, комутуючи + Ve або -Ve до мотору і змушують його обертатися або вперед, або назад.

Під час зупинки мотору, ще деякий час присутній обертальний момент. Для того, щоб захистити транзистори від надлишкової потужності мотору ми можемо використати 4 діоди.

Поки покази двох датчиків залишаються сталі у реальному часі, операційний підсилювач не буде активний. Однак, коли Сонце змінить своє положення, покази на пристрої будуть різними, що призведе до відправки сигналу для активації двигунів і переміщення системи, поки показники на обох LDR датчиках не будуть знову рівними. Ця система працює цілодобово і постійно оновлює інформацію.

Ця система дозволяє збільшити виробництво електроенергії на 20-30% в порівнянні з традиційними методами. Проте, вона не ефективна при високому рівні хмарності. Позиціонування трекера здійснюється тільки по одній осі, і споживання системи дуже низьке.

Вигляд схеми управління трекером на базі мікроконтролера PIC:

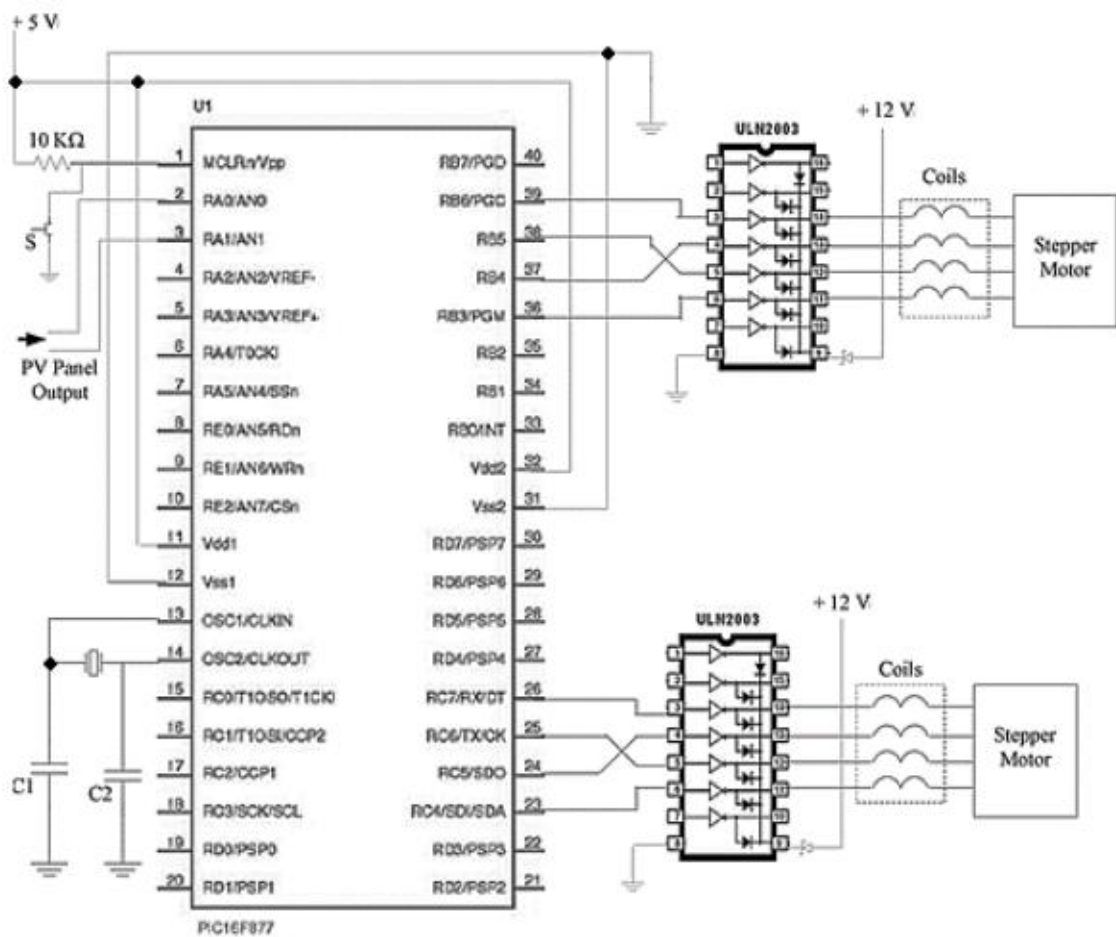


Рис.1.2. Схема управління трекером на базі PIC

Ця система управління трекером не має чутливих датчиків і функціонує за допомогою мікроконтролера. Для визначення позиції трекера використовується сонячна панель, яка підключена до аналогових входів мікроконтролера. Трекер позиціонується тільки по одній осі, а використання крокових двигунів дозволяє контролеру обертати двигуни на певну кількість кроків через деякий часовий інтервал (рис.1.3). Це просте та дешеве рішення, що мінімізує кількість компонентів і покращує надійність системи. Проте слід зазначити, що ця система працює некоректно при підвищеній хмарності.

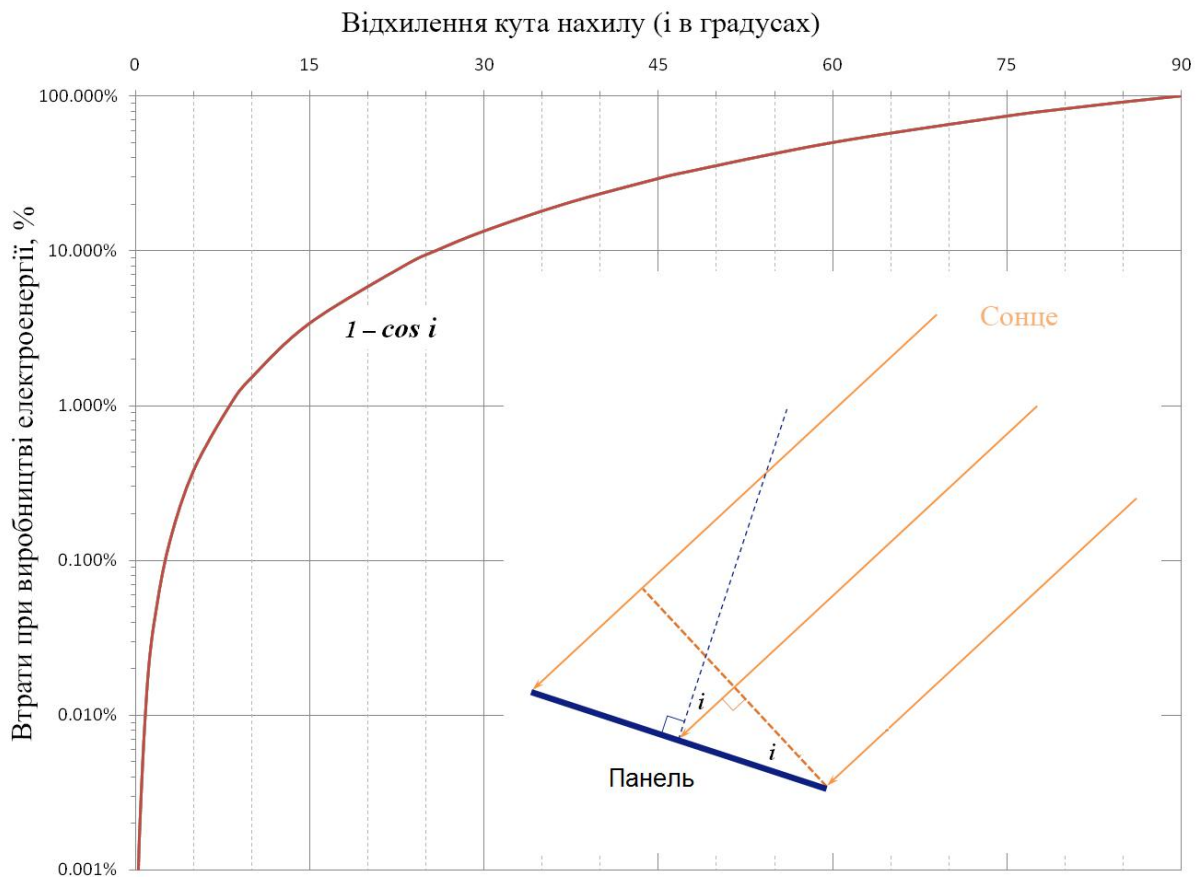


Рис.1.3. Залежність величини втрат електроенергії сонячними панелями від кута нахилу

На графіку залежності можна побачити, як втрати енергії збільшуються з кутом відхилення панелі від оптимального положення. Якщо трекер точно встановлює панель з точністю  $\pm 5^\circ$ , то він забезпечить поглинання більше ніж 99% енергії прямих променів та 100% розсіяного світла. З урахуванням траєкторії Сонця на небосхилі, ефективним кутом повороту панелі буде близько  $150^\circ$ . Стационарна панель, що зафіксована рівно між точками світанку і заходу, втрачатиме близько 70% енергії в ранковий та вечірній час.

Для сонячних батарейснують два основних типи поворотних механізмів: одновісний і двовісний (рис.1.4).



Рис.1.4. Одновісна і двовісна електромеханічна система сонячних батарей

Одновісне стеження панелі означає, що вона повертається від сходу до заходу, щоб зменшити втрати енергії. Проте, потрібно також враховувати міжсезонні зміни положення Сонця між північним та південним напрямками, що становить  $46^\circ$ . Одновісні трекери мають більш просту конструкцію порівняно з двовісними, тому їх вартість значно менша, що пояснює популярність таких систем.

Модулі з двокоординатним стеженням враховують зміни в траєкторії Сонця, щоб забезпечити оптимальну орієнтацію панелі. Системи двокоординатного стеження забезпечують, що Сонце знаходиться під перпендикуляром до батареї, а двигуни та контролери відповідають за

регулювання орієнтації панелі. Блок управління використовує комбінацію алгоритмів переміщення, щоб підтримувати мінімальний кут косинуса впродовж всіх сезонів. За рахунок цих властивостей, двокоординатні системи забезпечують оптимальну продуктивність сонячних панелей.

Трекери для сонячних панелей можуть бути різних налаштувань, мати різні приводні механізми, а також змінювати напрямок руху відносно різних алгоритмів. Незважаючи на безліч відмінностей, в своїй більшості трекиери поділяються на два типи – однокоординатні та двокоординатні [8].

Ці електромеханічні пристрої необхідні для орієнтації робочої панелі на Сонце. У даному випадку робочими панелями можуть бути:

- сонячна батарея, яка складена з фотоелектричних панелей;
- фокусуюче енергію сонця дзеркало відбивача;
- на двигуні Стирлінга;
- оптичні пристрої та інше.

Для забезпечення максимальної продуктивності сонячних панелей слід досягнути точної орієнтації робочих панелей на Сонце.

Як правило, оптимальний кут для роботи сонячних панелей повинен бути перпендикулярним до сонячних променів. Це може бути важко досягнути, оскільки сонячні панелі зазвичай розміщують на дахах або на стаціонарних конструкціях, які не можуть відстежувати рух джерела енергії впродовж дня. Як результат, кут нахилу між горизонтальною площиною та сонячною панеллю змінюється впродовж дня, що може знизити ефективність роботи панелей.

Найбільш поширеними наразі є трекиери з віссю обертання на несучому стовпі (tip-tilt dual axis tracker - TTDAT), а також трекиери з опорною площиною (azimuth altitude dual axis tracker - AADAT) з вертикальною головною віссю.



TTDAT трекери мають просту конструкцію і високу гнучкість розміщення, що дозволяє їх використовувати для побудови ФЕС різної потужності, від індивідуальних проектів до великих енергетичних комплексів. У ААДАТ трекерах використовується велике кільце як опорна конструкція, яке може бути встановлене на ролики або на велику платформу з підшипниками. Це конструктивне рішення забезпечує більш рівномірний розподіл ваги сонячної батареї по всій площині кільця, відмінно від TTDAT систем, що мають одну точку завантаження.

Рух Сонця навколо Землі впливає на положення сонячних панелей на небосхилі та викликає сезонні варіації. Горизонтальне розташування панелей можливе тільки на екваторі, а для інших регіонів рекомендується розташовувати їх під різними кутами нахилу, залежно від сезону. У зимовий період Сонце знаходиться під меншим кутом, ніж влітку або восени, тому панелі розташовують під меншим кутом нахилу. Якщо немає можливості змінювати нахил панелі двічі на рік, то можна обрати середнє положення, яке зазвичай є середнім значенням між оптимальним кутом роботи влітку та зимою.

Для досягнення оптимальної продуктивності сонячних панелей весною та осінню рекомендується нахил панелі рівним широті місцевості. Взимку для досягнення оптимального кута нахилу до рівня місцевості додається близько 15 градусів, а влітку віднімається.

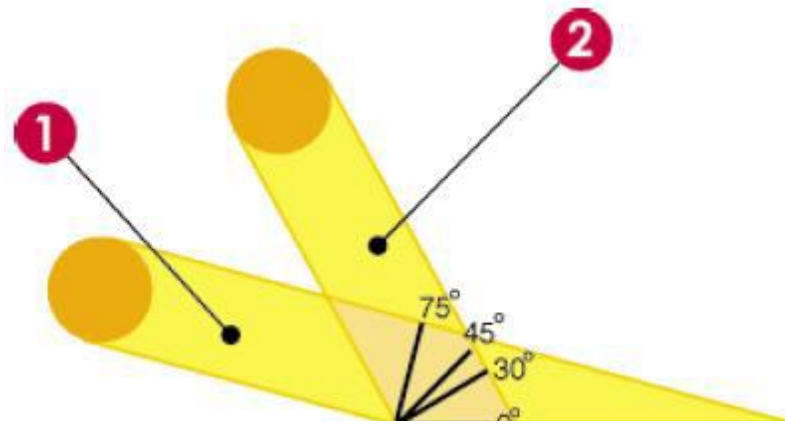


Рис. 1.5. Оптимальний кут нахилу взимку та влітку

1. Сонце взимку.
2. Сонце влітку.

Відхилення від цих значень на 5 градусів майже не впливають на продуктивність сонячних модулів. Для автономних систем, де використовується сонячна енергія, потрібно враховувати графіки навантаження, що залежать від певного місяця. Якщо споживання енергії в певному місяці є високим, рекомендується вибрати оптимальний кут нахилу відповідно до цих показників (рис.1.5). Також потрібно враховувати можливе затемнення, якщо поруч з сонячною панеллю знаходиться стовп, дерево або будинок.

Таблиця.1.1

Втрати внаслідок відбиття ( у відсотках до перпендикулярного напрямку на модуль)

Кут падіння променів сонця, °	Втрати, %
9	1,2
18	4,9
40	19,0
45	29,0

Насправді багато зовнішніх факторів можуть суттєво впливати на ефективність сонячних панелей (табл. 1.1). Сонячне світло, що приходить до нас з космосу, на своєму шляху зазнає заломлення, поглинання атмосферою та розсіювання, тому на поверхню землі потрапляє тільки частина його. Заломлене світло називають дифузною радіацією, або розсіяним світлом, тоді як частина світла, що потрапляє на землю під прямим кутом, є найбільш інтенсивною та отримує назву "пряма радіація" (рис. 1.6).

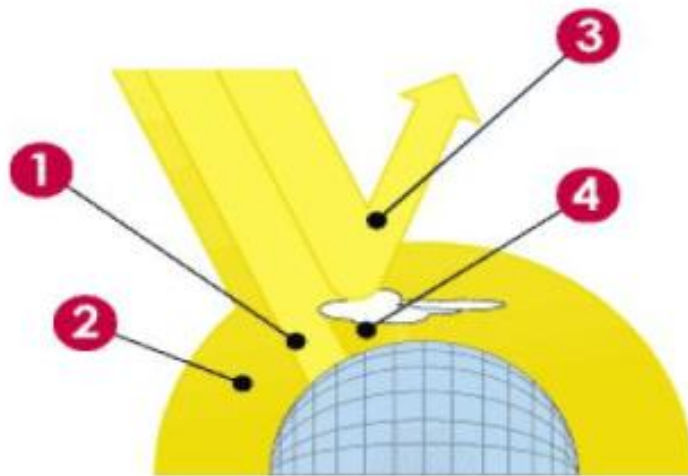


Рис.1.6. Випромінювання поверхності землі:

1. пряме;
2. поглинене;
3. заломлене;
4. непряме.

Модулі сонячних панелей можуть продукувати енергію навіть без прямих сонячних променів, так як дифузна радіація та розсіяне світло також можуть постачати енергію. Проте, найкращі умови для максимальної продуктивності досягаються в ясну погоду з прямим сонячним світлом, яке надходить до панелі перпендикулярно. Відповідно до місцезнаходження на північній півкулі, сонячні панелі повинні бути спрямовані на південь, тоді як на південній півкулі

вони повинні бути спрямовані на північ.

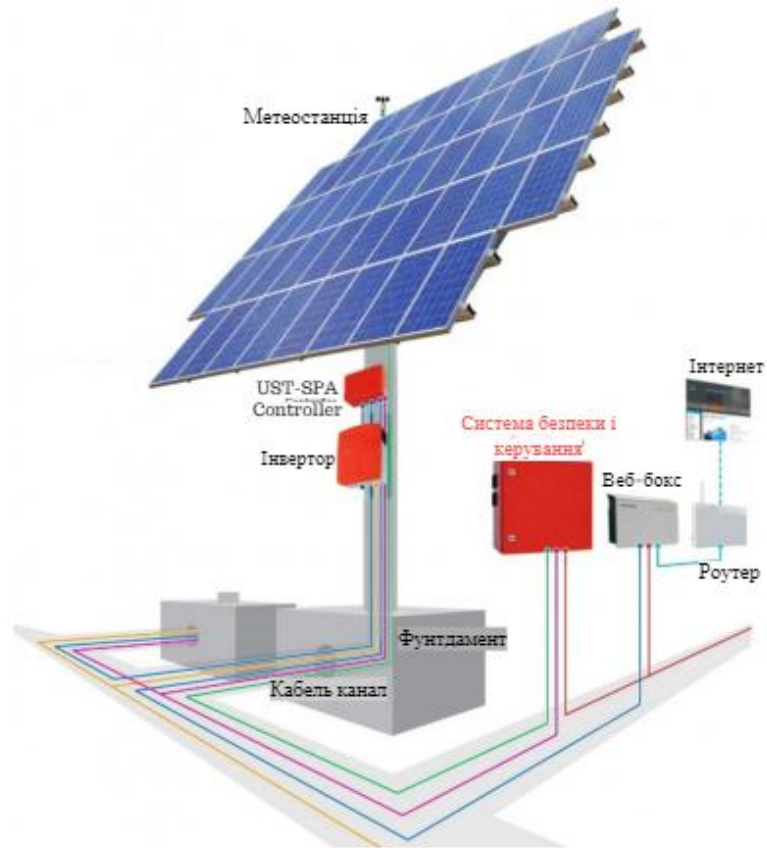


Рис. 1.7. Стандартний склад сонячного трекеру

Складові елементи повної комплектації системи спостереження Сонячної системи включають:

1. Фіксовану основну конструкцію з рухомою частиною, що має одну або дві осі обертання.
2. Системи позиціонування рухомої частини трекера, яка складається з актуаторів та систем керування ними.
3. Системи безпеки та керування, які містять:
  - Захист від удару блискавки;

- Захист від перевантаження;
  - Стабілізатори;
  - Метеостанцію, яка відстежує та зчитує дані про погодні умови та попереджає систему про ймовірність урагану, граду, снігу або інших погодних впливів, які можуть пошкодити сонячну панель. Система керування трекером тоді мінімізує негативний вплив погоди на пристрій, встановлюючи його в безпечне положення.
4. Системи інтерфейсу та керування, які контролюють та налаштовують панелі.
  5. Системи у віддаленому доступі до керування та налаштування панеллю.
  6. Системи навігації, які використовуються для трекерів на автономній основі. Вони визначають географічне положення та висоту на рівні моря. Для стаціонарних систем навігація не є обов'язковою, оскільки основні параметри встановлюються в систему при її початковому встановленні та монтажі.
  7. Інвертор, який перетворює постійну напругу, що виробляється трекером (наприклад, від PV-модулів) на змінну напругу та передає її споживачу або на приймальну станцію. В той же час, інвертор живить трекери.

На практиці часто зустрічають трекери без згаданих вище елементів через економічну доцільність використання певних систем у кожному конкретному випадку. Залежно від типу, призначення, розташування, потужності та інших факторів можуть бути внесені зміни до складових компонентів (рис.1.8).



Рис. 1.8. Класифікація сонячних трекерів

При проектуванні та встановленні системи стеження за Сонцем, важливо враховувати її можливість витримувати сильні вітрові навантаження. Однак збільшення робочої поверхні трекеру може призвести до збільшення парусної поверхні, що необхідно враховувати. Також вага корисного навантаження має вплив на ефективність системи. Під час розробки та встановлення слідкуючої системи, навантаження рівномірно розподіляють на трекер, що може збільшити розміри системи. Проте, надійність є важливим фактором, який необхідно враховувати [9].

Вплив різних світлових чинників на потужність виробництва енергії фотоелектричними модулями

Умови	% від «повного» сонця
Яскраве сонце – панелі розташовані перпендикулярно до променів	100%
Легка хмарність	60-80%
Хмарна погода	20-30%
За віконним склом, один шар, скло і модуль перпендикулярні сонячним променям	91%
За віконним склом, два шари, скло і модуль перпендикулярні сонячним променям	84%
За віконним склом, один шар, скло і модуль під кутом 45° відносно сонячного проміння	64%
Штучне освітлення в нежитловому приміщенні, на поверхні письмового столу	0,4%
Штучне освітлення всередині яскравого приміщення (наприклад супермаркет)	1,3%
Штучне світло всередині житлового приміщення	0,2%

Можна виділити три різні способи орієнтації фотомодулів:

1. Ручне орієнтування на Сонце з допомогою пульта керування, яке забезпечує надійність, але може бути неточним через людський фактор.

2. Пасивне орієнтування за запрограмованим алгоритмом, яке дозволяє панелям зміщуватися протягом дня.
3. Активне орієнтування на максимальний потік сонячної енергії.

Крім того, ручне орієнтування може створювати нові робочі місця, але може бути неточним, тому що точність залежить від роботи оператора, який сам вибирає кут нахилу панелі, час роботи поворотного пристрою та частоту зміни його положення впродовж дня [11].

Всі варіанти пасивного контролю за поворотом сонячної панелі мають одну спільну рису - керування швидкістю руху на основі сталої розрахункової характеристики для даного регіону. Початкові дані для визначення алгоритму руху залишаються постійними: тривалість дня, географічна широта, зміна висоти сонця відносно пори року та протягом дня.

Для забезпечення працездатності пасивної системи стеження необхідно мати метеорологічні дані для кожного місця, де розташована панель, та перерахувати дані про кут і швидкість повороту. Ці обмеження призводять до зміни програми і постійного налаштування її спеціалістами, що призводить до значних витрат на обслуговування та зниження ефективності та автономності роботи.

Системи з автоматичним поворотом сонячної батареї до Сонця є найбільш розповсюдженими та надійними на сьогоднішній день. На відміну від пасивних, вони забезпечують максимальне значення щодо перпендикулярного потоку світла. Обслуговування та кінцева працездатність таких систем значно вища, що робить їх привабливими для споживачів.

**1.3. Вибір типу двигуна в залежності від його ха-рактеристик** Рухома частина системи стеження може змінювати своє положення або за допомогою



ручного приводу, або за допомогою електричного двигуна.

В даному випадку було обрано двигун постійного струму зі змішаним збудженням (ДПС 33). Цей тип двигуна використовується у більшості позиційних систем. Це найпростіший та економічно обґрунтований варіант - позиційна система керування досить проста у використанні та не вимагає великих витрат.

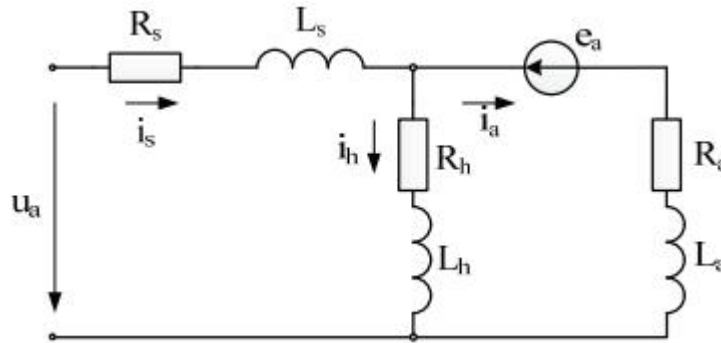


Рис. 1.9. Схема заміщення ДПС 33

$R_s, L_s$  - активний опір та індуктивність обмотки після послідовного збудження;  
 $R_h, L_h$  - активний опір та індуктивність обмотки паралельного збудження;  $R_a, L_a$  - активний опір та індуктивність обмотки якоря,  $i_s, i_h, i_a$  - струми відповідно обмотки послідовного збудження, обмотки паралельного збудження та кола якоря;  $u_a, e_a$  - напруга живлення та електрорушійна сила двигуна [15].

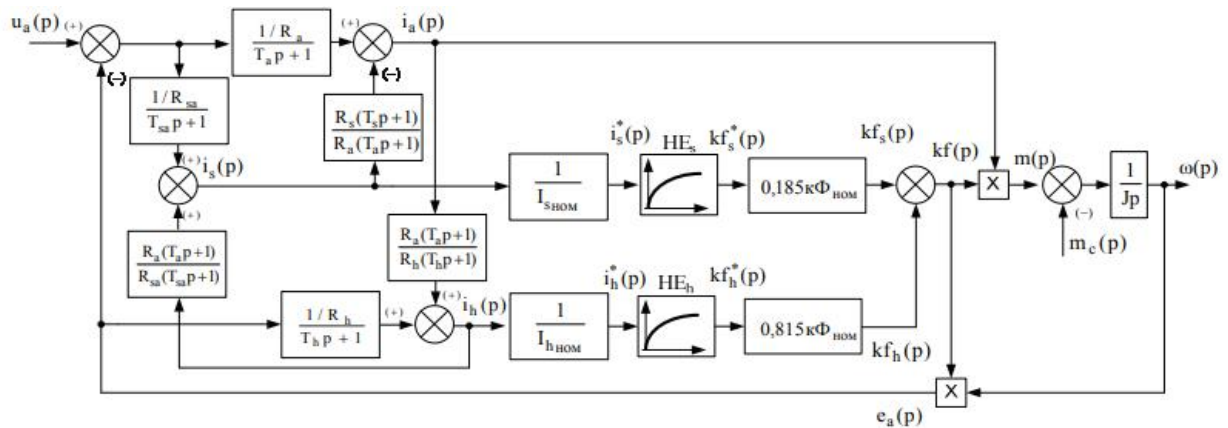


Рис. 1.10. Структурна схема двигуна постійного струму змішаного збудження

Паспортні дані двигуна представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Паспортні дані ДПС 33

Номінальна напруга живлення, В	220
Номінальна швидкість обертання, об/хв	3000
Номінальна потужність, Вт	700
Номінальний струм двигуна, А	4,3
Момент інерції якоря двигуна, кгм <sup>2</sup>	0,0003
Активний опір кола якоря, Ом	3,56
Активний опір додаткових полюсів, Ом	1,06
Активний опір послідовної обмотки збудження, Ом	0,15
Активний опір паралельної обмотки збудження, Ом	695

Трекер має головну мету - встановлювати необхідний кут нахилу робочої поверхні навантаження так, щоб він був рівно  $90^\circ$ . Протягом усього дня сонячне проміння має падати на панелі перпендикулярно.

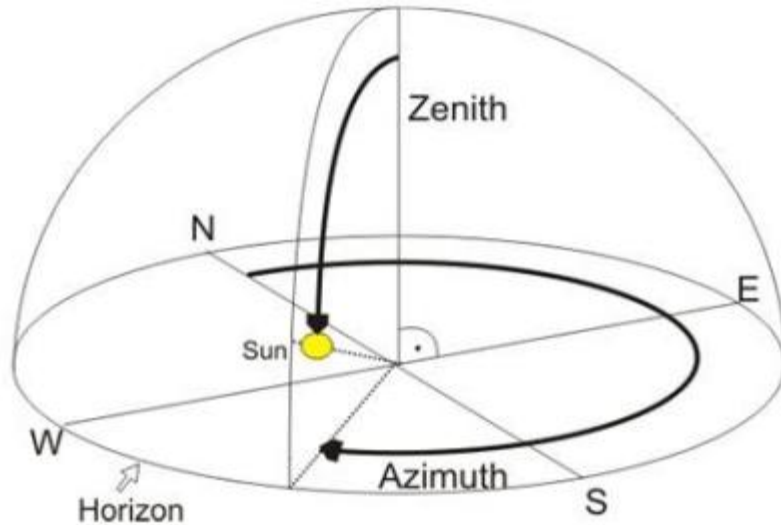


Рис. 1.11. Зеніт та азимут

Існує кілька способів досягнення потрібної орієнтації панелі.

Перший спосіб полягає у досягненні рівномірного потоку світла на всіх фотоелементах. Це досягається за допомогою падіння світла на фотоприймачі, і далі інформація передається на електродвигун. Якщо різниця в інтенсивності світла між елементами, панель починає рухатися в напрямку Сонця, щоб отримати баланс. Прості принципові схеми таких пристроїв є досить доступними та нескладними для використання. Проте, головним недоліком є їх повна непрацездатність в мокру або похмурі дні.

Інший спосіб - ручне переорієнтування системи або введення керуючих сигналів на електродвигун. Цей метод залишається актуальним лише для

сезонного налаштування трекерів, коли необхідно встановити відповідний кут нахилу для панелі на певний період часу (рис.1.11. зенітний кут нахилу Сонця). Однак, цей метод має похибку, оскільки оператор не може постійно перебувати біля трекера для відслідковування точності орієнтації. Цей метод переважно використовується для сезонного налаштування недорогих трекерів.

Блок керування відповідає за правильне розташування сонячної батареї відносно Сонця відповідно до алгоритму стеження. Для цього блок керування використовує різноманітну електронну апаратуру, таку як мікропроцесор, блоки живлення, напівпровідникові перетворювачі, захисні апарати виконавчих механізмів, блоки передачі та перетворення даних і т.д. Основними параметрами системи керування є тип управління та алгоритм стеження, тип та протоколи зовнішнього зв'язку тощо.

На практиці використовують два основних алгоритми для стеження за положенням Сонця: астрономічний та з використанням датчиків світла. Частіше застосовується алгоритм стеження за світловими датчиками через його простоту в технічній реалізації. Цей алгоритм полягає в тому, щоб розмістити сонячну батарею на небосхилі в місці з найбільшою інтенсивністю світла, що визначається за даними фотоприймачів. Однак серйозним недоліком трекерної системи з датчиками світла є їхнє непрацездатність в похмуру погоду, при інтенсивних опадах та забрудненні фотоприймачів.

Для управління рухом сонячного трекера по азимутальним і зенітним кутах можна використовувати пристрій управління, який включає таймер. Актуатори починають працювати відповідно до програми таймера, що може бути добовою або річною. Однак, точність орієнтації не є дуже високою, оскільки позиція Сонця постійно змінюється в залежності від часу, місця сходу і заходу та зенітного кута.

Наприклад, в зимовий період Сонце рухається за горизонтом з великим зенітним кутом, а влітку - з меншим зенітним кутом. Такі системи є корисними для недорогих сонячних панелей або пристроїв особистого використання.

Спосіб управління сонячним трекером, що базується на програмі, яка визначає місцезнаходження Сонця в певний проміжок часу, є найбільш поширеним і ефективним з точки зору вартості та якості. Внутрішній годинник програми дає на панель інформацію про значення азимутального та зенітного кута з урахуванням географічного місцезнаходження трекера (висота над рівнем моря, довгота, широта). Після аналізу отриманої інформації та розрахунків система приводить панель до руху та переналаштовує трекер у необхідне положення. Програма розрахунку положення Сонця на небосхилі називається SPA (Алгоритм сонячної позиції).

Установка трекерів може здійснюватись за допомогою самостійних пристроїв, які встановлюються на початковому етапі монтажу або на захищених комп'ютерах, таких як логічно-програмовані контролери. Для керування групою трекерів достатньо одного комп'ютера, що може зменшити собівартість сонячної електростанції.

Електроприводи, які використовують різні типи електричних машин, таких як лінійні, крокові та серводвигуни, є найпоширенішим варіантом для сонячних трекерів. Основними характеристиками електроприводу є тип виконавчого пристрою, номінальна потужність, параметри живлення, споживана потужність під час стеження, а також середньодобове або річне споживання електроенергії.

Елементи трансмісії передають механічний рух від приводних двигунів до рухомих елементів системи, яка стежить за сонячною батареєю. Основними характеристиками трансмісії є кутовий діапазон переміщення батареї по

азимуту і нахилу, точність позиціонування, швидкість переміщення або час повороту на один градус.

При виборі ССС моделі необхідно звернути увагу на технічні характеристики, які впливають на стійкість до зовнішніх кліматичних умов. На ринку є безліч моделей сонячних трекерів, які призначені для країн з теплим кліматом (робочий діапазон температур від -10 до +50 °С), і не підходять для використання на більшій частині території нашої країни. Крім того, в районах з суворими кліматичними умовами нецікаво використовувати трекерні системи з пасивним приводом через низьку надійність.

#### **1.4. Вибір перетворювача та реалізація САК ЕП**

Для реалізації системи автоматичного позиціонування сонячної панелі, запропоновано конструктивну схему, що включає в себе: нерухому основу, рухому основу з електромеханічною системою азимутального повернення, дві стійки, та чотири сонячні батареї на залізній рамі, що переміщуються з допомогою електромеханічної системи стеження за кутом. Ескіз конструкції можна побачити на рис. 1.12 [14].  
Рис.1.12. Конструкція системи СП

Основні компоненти сонячної панелі включають раму зі сонячними батареями типу КСМ-190 [15], нерухому та рухому каркаси, два редуктори та два крокових двигуни (КД), датчик положення Сонця та п'ять кінцевих вимикачів. Для поглинання сонячної енергії ми використовуємо сонячні батареї типу КСМ-190 (рис.1.13), які економічні та практичні. Одна сонячна панель має площу 1,26 м<sup>2</sup> та включає 4 батареї. Рама з чотирма сонячними батареями має габарити: вага 102 кг, ширина 3,2 м та висота 1,6 м.



Рис.1.13. Сонячна панель типу КСМ-190

Таблиця 1.4

Характеристики сонячної панелі КСМ-190

Сонячна батарея	КСМ-190
Потужність $P_{max}$ , Вт	190
Напруженість в точці Max Power, В	35,7
Струм в точці Max Power, А	5,4
Напруженість холостого ходу, В	44,7
Струм короткого замикання, А	5,8
Комутаційна напруженість, В	24
Габаритні розміри, мм	1586 x 806 x 35

Маса, кг	16
----------	----

**Висновки до розділу:**

1. Було обґрунтовано вибір системи ЕП повороту блоку СП великої потужності з урахуванням більш широкого спектру факторів, таких як довговічність, стійкість до зносу та інші технічні характеристики;
2. Було проведено детальне дослідження впливу різних факторів на ефективність роботи сонячної панелі з урахуванням різних умов та середовищ;
3. Було розглянуто різні способи орієнтування слідкуючої системи та розкрито принцип їх роботи;
4. Були встановлені та сформульовані детальні вимоги до проектованої системи, щоб забезпечити її максимальну ефективність та стійкість у різних умовах.



## РОЗДІЛ 2

### Варіанти реалізації системи повороту блоку СП та залежність генерації СЕС від куту нахилу СП

#### 2.1. Залежність від куту нахилу СП генерації СЕС

Для досягнення ефективної роботи сонячної панелі необхідно, щоб сонячні промені падали на робочу поверхню під прямим кутом і відбувалося максимально можливе потрапляння протягом дня. Тому необхідно використовувати систему слідкування за Сонцем, яка забезпечує поворот сонячних панелей на перпендикуляр до потоку сонячного світла. Таку систему контролю максимуму освітленості можна налаштувати залежно від положення Сонця на небосхилі протягом дня чи року. За рахунок геометричного співвідношення Сонця та Землі, наша планета описує круговий рух впродовж дня, що зумовлює зміни сезонів, пір року та тривалості світлового дня. Наприклад, наша планета рухається по еліптичній траєкторії, що обумовлює зміну тривалості світлового дня. Крім того, круговий рух планети від сходу до заходу зумовлює рух Сонця на небосхилі.

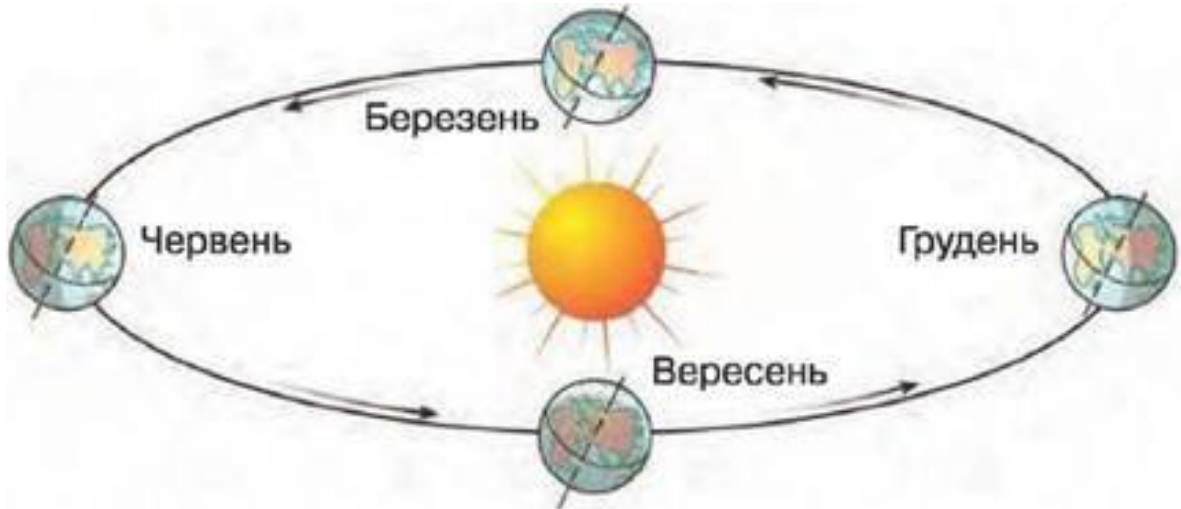


Рис.2.1. Обертання Землі навколо Сонця впродовж року

Для максимальної ефективності сонячних панелей необхідно враховувати як щоденний рух Сонця, так і щорічну прецесію земної осі. Положення Сонця на небосхилі може бути визначено за двома кутами - азимутом та зенітом, які змінюються протягом дня та року. При проектуванні системи контролю за сонячним джерелом необхідно враховувати обидва рухи Сонця, що можуть бути контрольовані за допомогою одновісної чи двовісної систем. Різниця в механізмі контролю визначається типом системи. Так, сонячні панелі виробляють енергію лише впродовж світлового дня, що залежить від місцезнаходження сонячної системи і географічної широти місцевості.

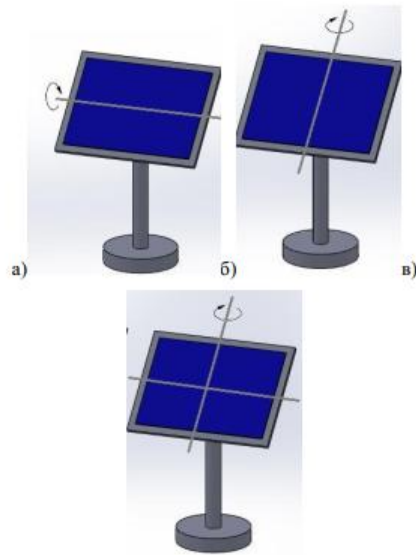


Рис.2.2. Системи контролю:

а – одновісна азимутальна; б – двовісна зенітальна; в – двоосьова.

Системи контролю типу "а" забезпечують рух сонячних панелей лише в одній площині за азимутом або за екліптикою. Однак, з практичної точки зору, системи контролю за екліптикою не є ефективними, оскільки це значення не є важливим протягом дня. Задля збільшення ефективності при одновісному стеженні за екліптикою, другу вісь виставляють паралельно осі Землі [13].

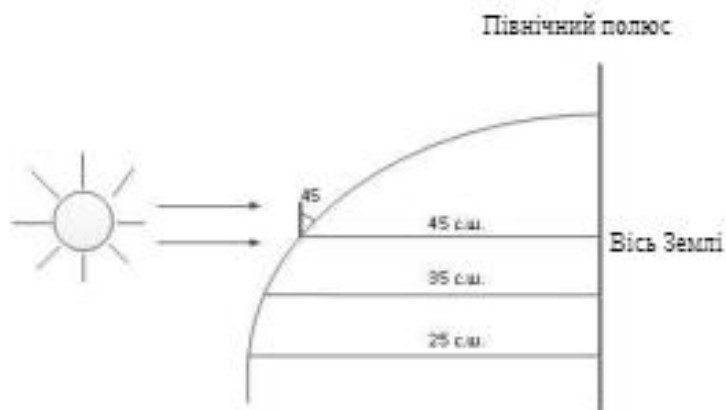


Рис.2.3. Розташування ФМ відносно горизонту

Двовісні системи контролюють рух Сонця в двох площинах, що забезпечує більш точне відстеження траєкторії Сонця впродовж дня (рис.2.3). Такі системи є більш ефективними, проте складніше у конструкції, що впливає на їх вартість. Частіше використовують одновісні системи з другою віссю, що встановлюється паралельно до осі Землі, та проводять міжсезонні корективи кута нахилу панелі для забезпечення більшої енергоефективності.

## **2.2. Реалізація одновісних та двовісних систем повороту блоку СП**

Перш ніж розпочати реалізацію системи відстеження сонця, необхідно врахувати кілька факторів, таких як географічну місцевість, робочу площу, погодні умови та потенційні ризики. На ринку сонячної енергетики існує кілька типів фотоелектричних модулів, серед яких статичні та динамічні системи. Статичні системи характеризуються фіксованим положенням панелей під певним кутом в напрямку на південь (кут встановлюється при початковому монтажі), тоді як динамічні системи, які називають трекерами, можуть автоматично налаштовуватися на положення Сонця на небосхилі впродовж світлового дня.

Рис.2.4 зображує одновісний сонячний трекер, який може використовувати будь-який алгоритм стеження та позиціонуватися в різних напрямках. Варіацією є трекери з горизонтальною (HSAT), вертикальною (VSAT), похилою (TSAT) та полярно-орієнтованою (PSAT) віссю обертання. Одноосьові трекери [8] є особливо розповсюдженими і можуть виграти в потужності порівняно зі звичайними стаціонарними сонячними панелями на 35-55%.

HSAT - це горизонтальна система слідкування за сонцем, яка є найпоширенішим типом конструкції слідкуючого трекеру. Слідкуючий пристрій приводить до руху двигун (привод), що з'єднаний з центральним

двигуном, рухаючи його на схід та захід. Незалежно від способу реалізації, головною ідеєю роботи такого трекаєру є безперервний поворот слідкуючої панелі зі сходу на захід протягом дня.

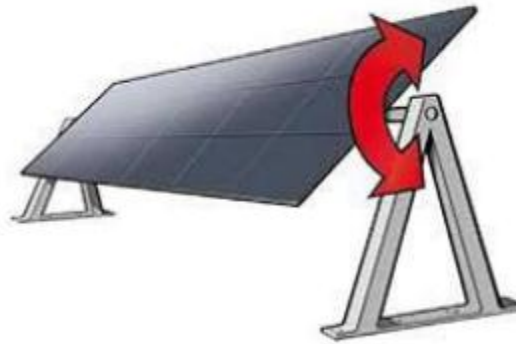


Рис. 2.4. Трекаєру з горизонтально орієнтованою віссю

Протягом цілого року, горизонтальна система слідкування за сонцем надає 17% більше енергії, ніж звичайна стаціонарна сонячна панель. Ця система є досить простою в реалізації та дуже популярною. VSAT - слідкуючі трекаєри з вертикальною віссю обертання відносно землі (рис.2.5).



Рис. 2.5. Трекаєру з вертикально орієнтованою віссю

При встановленні такого трекаєру, важливо мати на увазі можливість затінення від сусідніх панелей, що може призвести до втрати сонячної енергії, а

також про те, що система стеження з вертикальною віссю актуальна в високих широтах. Конструкція VSAT зазвичай орієнтується під кутом до осі обертання, а фотоелементи встановлюються на неї. TSAT - динамічна система стеження за сонцем з однією похилою віссю обертання (рис. 2.6). Вісь обертання у даного типу трекера знаходиться між горизонтальною та вертикальною віссю.

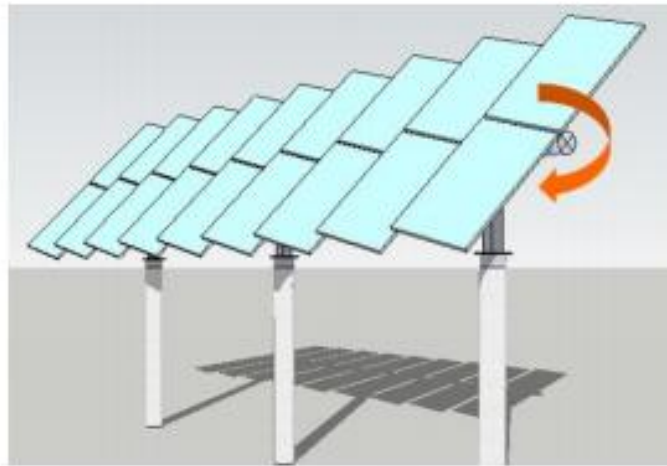


Рис.2.6. Трекер з похилою віссю обертання

Трекер, про який йдеться, має специфічну конструкцію з двома вільними осями, що відрізняється від інших варіантів, що розглядалися раніше. Це система слідкування DAT - Dual axis trackers, що має дві осі обертання, які працюють спільно, але знаходяться окремо одна від одної. Вони є найбільш ефективними і здатні максимально точно підтримувати прямий кут між робочою поверхнею сонячної панелі та променями Сонця. Два типи таких трекерів є дуже поширеними - TTDAT та AADAT.

TTDAT (Tip-tilt dual axis tracker) отримав свою назву через особливість кріплення площини з панелями на краю високого стовпа, який забезпечує

верхню частину панелі рухатись зі сходу на захід навколо верхнього полюса (рис.2.7.)



Рис.2.7. Трекер з двома осями обертання (TTDAT)

Механізм підшипника обертає сонячні панелі з півдня на північ. При встановленні трекерів TTDAT, рекомендується розташовувати їх якнайдалі один від одного, щоб уникнути можливих тіней від низького сонця та втрати сонячної енергії.

AADAT (Azimuth altitude dual axis tracker) - це азимутальна система стеження за сонцем з опорною площиною та двома осями обертання (рис.2.8).



Рис.2.8. Трекер з двома осями обертання і опорною площиною

Система, що стежить за сонцем, може бути встановлена на кільце або опорну конструкцію, де головна вісь є вертикальною. Особливістю таких систем є спосіб, за яким сонячні панелі повертаються.

Система AADAT забезпечує рівномірний розподіл маси конструкції на кільцеву опорну площину, що дозволяє уникнути перевантажень та забезпечує більшу стійкість до погодних умов порівняно з TTDAT. Така система може вмістити більше сонячних панелей та забезпечує більше виробництво енергії.

Дані з таблиці 2.1. надають інформацію про ефективність роботи сонячних станцій різних типів для території Києва з використанням 10 кВт фотоелектричної системи, кутовим розташуванням систем  $34^\circ$  та витратами енергії 24,3% [11].

Таблиця 2.1.

Кількість kWh вироблених кожного місяця для ФЕС з різним кріпленням



<b>Місяць</b>	<b>Статична ФЕС</b>	<b>Одноосьова ФЕС</b>	<b>Двовісна ФЕС</b>
Січень	262	297	306
Лютий	417	494	501
Березень	847	1080	1090
Квітень	1010	1350	1370
Травень	1210	1720	1780
Червень	1160	1620	1670
Липень	1180	1620	1680
Серпень	1090	1480	1520
Вересень	817	1050	1080
Жовтень	591	721	753
Листопад	250	281	297
Грудень	195	218	243
<b>Всього за рік</b>	<b>9029</b>	<b>11931</b>	<b>12290</b>

Провівши аналіз даних з табл. 2.1. та даних на графіку рис.2.9, очевидно що значно ефективнішими є осьові системи стеження за Сонцем. В даному випадку різниця між стаціонарними ФЕС склала 36,1%.

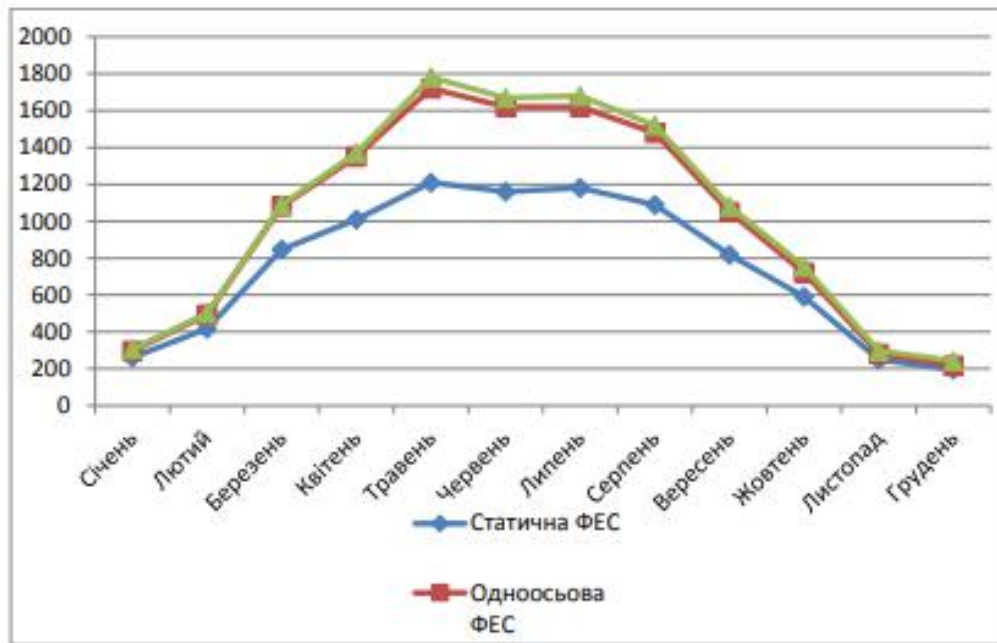


Рис.2.9. Графік отриманої енергії від ФЕС з різним кріпленням

### 2.3. Економічна та технічна обґрунтованість використання СПБСП

Для визначення потужності, яку генерують сонячні панелі, спочатку необхідно розрахувати кількість сонячної радіації, яка потрапляє на їх поверхню протягом дня. Цей потік сонячної радіації залежить від кута нахилу поверхні приймача і може бути розрахований з формули:

$$S_{r_{пр}} = S_{r_{\max}} \cdot K_{AT} \cdot \cos \beta \quad 2.1$$

$S_{r_{\max}}$  - це величина, яка характеризує кількість радіації, яка потрапляє від Сонця на поверхню Землі. Вона є постійною, а саме дорівнює  $1325 \text{Вт/м}^2$ . В подальшому при розрахунках, врахуємо деяку частину енергії, щяка відбивається атмосферою назад і прийmemo це значення в межах 30-35%, отже  $S_{r_{\max}} = 925 \text{Вт} / \text{м}^2$ .

$\beta$  - це кут падіння сонячних променів.

$K_{AT}$  - коефіцієнт поправки на повітряну масу, яку необхідно пройти сонячному промінню.

$$K_{AT} = 1.1254 - \frac{0,1366}{\sinh c} \quad (2.2)$$

(2.3)

$$\cos \beta = \sinh c \cdot \cos \alpha + \cosh c \cdot \sin \alpha$$

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

$hc$  - кут, що визначає висоту Сонця над горизонтом в конкретно визначений час.



Рис.2.10. Схематичне зображення прецесії земної осі

Відхилення осі Землі до площини екліптики від перпендикуляру дорівнює  $23^{\circ}27'$ , тому будь яка географічна точка півроку нахилена до Сонця, а інші півроку від Сонця (рис.2.10).

У залежності від пори року та географічної широти висота Сонця може змінюватися, а найкоротший сонячний день настає в день зимового сонцестояння. Для розрахунку висоти сонцестояння необхідно визначити зенітний кут, тобто кут між напрямом сонячних променів та зенітною віссю.

Для визначення виразу висоти сонцестояння для  $h_c$ , необхідно визначити величину зенітного кута:

$$V_z = 90^{\circ} - h_c \quad (2.4)$$

Через те, що ось Землі нахилена на  $23^{\circ}27'$  від площини екліптики, висота Сонця змінюється залежно від пори року та географічної широти. У день літнього сонцестояння висота Сонця досягає свого максимуму, тому що Сонце знаходиться найбільш близько до Землі. Для розрахунку висоти Сонця на потрібний момент, необхідно визначити зенітний кут (рис. 2.11.)

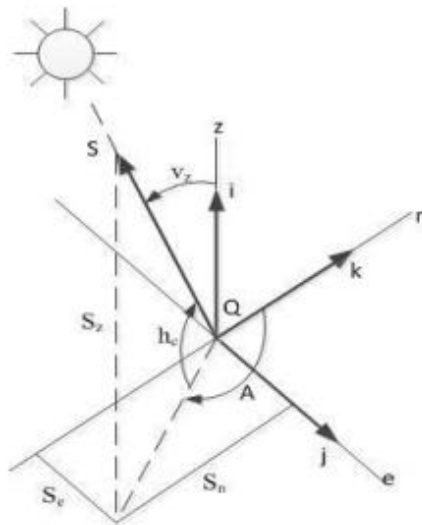


Рис. 2.11. Сонячний кут відносно спостерігача

У векторному вигляді  $S$  можна записати у вигляді:

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (2.5)$$

де  $i, j$  та  $k$  – одиничні вектори вздовж Зеніту ( $z$ ), Заходу ( $e$ ) та Північню ( $n$ ).  
 $S$  може бути записана, зважаючи на сонячний азимут та висоту у вигляді:

$$\begin{aligned} S_z &= \sin(h_c) \\ S_e &= \cos(h_c) \sin(A) \\ S_n &= \cos(h_c) \cos(A) \end{aligned} \quad (2.6)$$

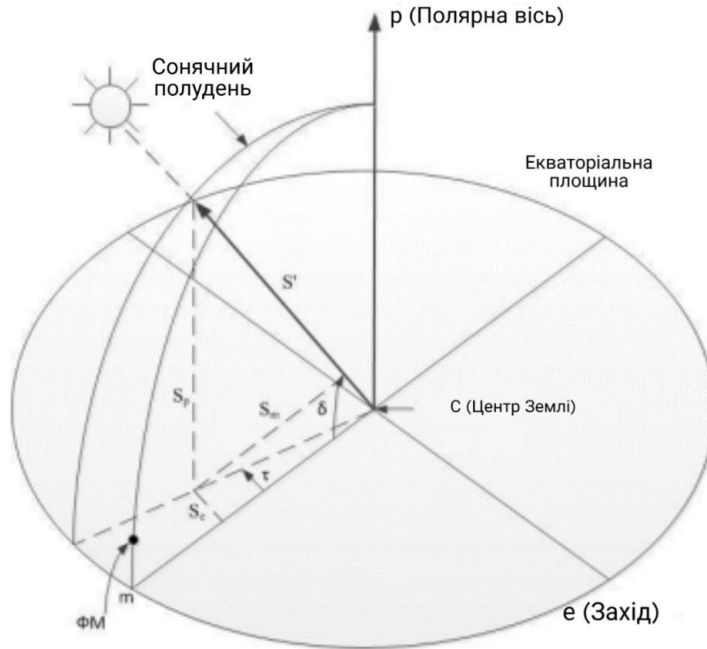


Рис. 2.12. Геометрія сонячного кута

На Рис. 2.12 зображено як вісь  $m$  перетинає центр Землі, і також можна зрозуміти, як місцевий меридіан перетинається з екваторіальною площиною. Вісь  $e$  знаходиться в екваторіальній площині та перпендикулярна відносно осі  $m$ . Вісь  $p$  є нормаллю екваторіальної площини, що проходить через Північний полюс. За допомогою часового кута та кута нахилу Сонця можна визначити новий сонячний вектор  $S'$ .

$$S' = S_m' i + S_e' j + S_n' k \tag{2.7}$$

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

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

Виконавши математичні підстановки отримаємо:

$$\begin{cases} \sin(h_c) = \sin(\delta)\sin(\theta) + \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\theta) \\ \cos(h_c)\sin(A) = -\cos(\delta)\sin(\tau) \\ \cos(h_c)\cos(A) = \sin(\delta)\cos(\theta) - \cos(\theta)\cos(\tau)\sin(\theta) \end{cases} \quad (2.8)$$

З системи рівнянь 2.8 виразимо  $h_c$ :

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta)\sin(\theta) + \cos(\delta)\cos(\tau)\cos(\theta)) \quad (2.9)$$

Висота сонцестояння залежить від кута нахилу Сонця, часового кута та географічної широти місцевості. Після визначення всіх цих значень, можна обчислити прямий потік сонячного світла на сонячну панель з урахуванням впливу одновісної та двовісної системи керування. Якщо використовувати двовісну систему керування, що слідкує за Сонцем, поверхня сонячних панелей буде направлена прямо на джерело енергії, тому кут між нормаллю поверхні та сонячними променями буде нульовим. Таким чином, можна визначити значення кута з точністю до впливу системи керування:

$$Sr = Sr_{\max} \cdot K_{am} \quad (2.10)$$

Для вирахування потужності сонячної енергії, що надходить на нерухому поверхню сонячної панелі, можливо за формулою:

$$Sr = Sr_{\max} \cdot K_{am} \cdot \cos(\theta - h_c) \cdot \cos(90 - \tau) \quad (2.11)$$

Зазначені значення та формули демонструють, як ефективність сонячної панелі залежить від різних систем контролю та позиціонування. Щоб визначити,

наскільки доцільно використовувати двовісну систему контролю, потрібно порівняти її потужність з потужністю стаціонарних фотоелементів. Для цього потрібно з'ясувати залежність вихідної потужності сонячної системи від потужності сонячного випромінювання, що надходить на її робочу поверхню. Це можна зробити, помноживши коефіцієнт корисної дії сонячної панелі на сонячне випромінювання, що падає на її робочу поверхню.

$$P_{СП} = Sr_{np} \cdot ККД \cdot S_{СП} \quad (2.12)$$

де  $P_{СП}$  - потужність сонячної панелі;  $ККД$  - коефіцієнт корисної дії фотоелементів;  $S_{СП}$  - площа сонячної панелі.

Формули та значення 2.1-2.12 утворюють математичну модель функціонування сонячної панелі протягом дня. Ця модель може бути використана для подальшого моделювання та розрахунку системи автоматичного позиціонування. Ця інформація буде корисною при попередньому розрахунку потужності, яку можна виробити, та при визначенні кількості необхідних сонячних панелей. Рисунок демонструє ефективність різних систем орієнтування в місті Київ. 2.13.



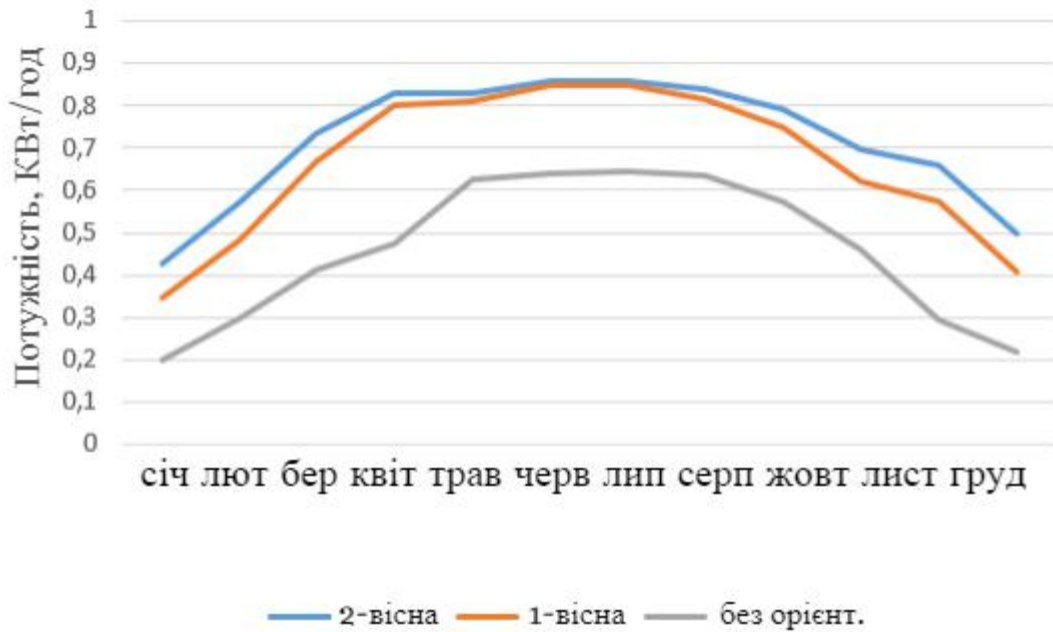


Рис. 2.13. Графік максимальної потужності на 1м<sup>2</sup> в залежності від дати

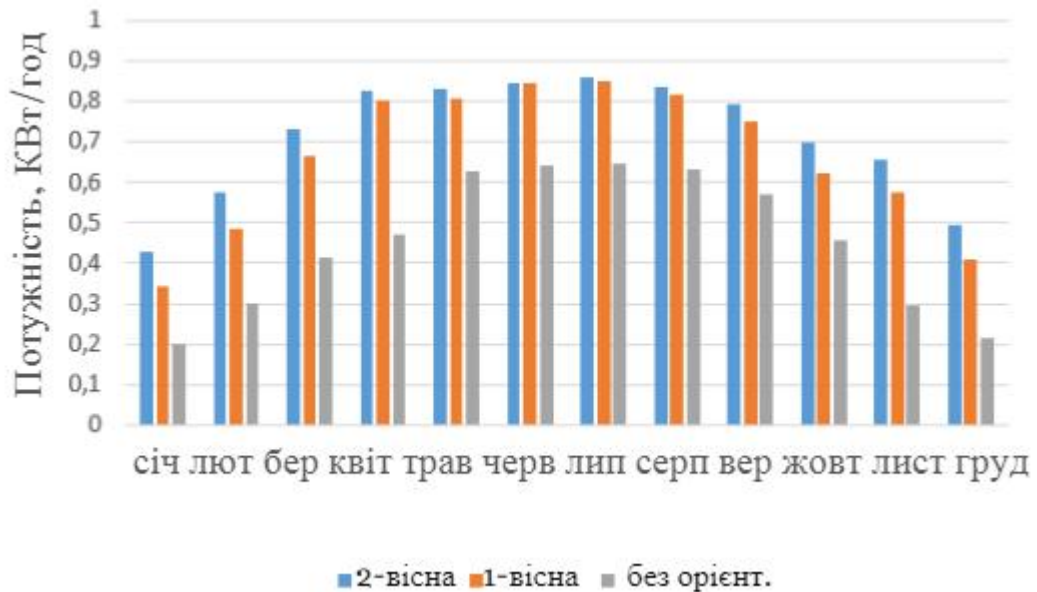


Рис. 2.14. Гістограма максимальної потужності на 1м<sup>2</sup> в залежності від дати

За допомогою графіків, представлених на них, можна зробити висновок, що двовісні системи орієнтування сонячних панелей найбільш ефективні взимку. Різниця між одновісною та двовісною системами влітку практично

непомітна, але з жовтня по березень двовісна система має значну перевагу в порівнянні з одновісною та стаціонарною системами, і може забезпечити приріст потужності до 30% та 60% відповідно.

За рік приріст потужності від одновісної системи складає близько 51% в порівнянні зі стаціонарною, тоді як двовісна має перевагу у близько 63%. З економічної точки зору, встановлення двовісної системи коштує близько однієї чверті вартості системи без орієнтування (близько 8000 грн/32800 грн) і витрати на її обслуговування зведені до мінімуму.

Вигода від її використання значно переважає всі витрати, оскільки приріст потужності в 63% швидко компенсує початкові витрати на збір, монтаж та встановлення такої системи.

### **Висновки до розділу:**

У цьому розділі ми провели дослідження залежності роботи сонячної панелі від кута її нахилу та розглянули варіанти реалізації системи повороту блоку СП. За результатами аналізу був обраний найбільш оптимальний варіант. Ми також дослідили економічну та технічну доцільність використання двовісної системи позиціонування СП, яка виявилась найбільш ефективною. З цієї причини ми рекомендуємо використовувати двовісну систему позиціонування для отримання максимальної потужності сонячних панелей.

## РОЗДІЛ 3

### Проектування системи автоматизованого керування ЕП

#### 3.1. Робота системи, вибір геліотрекеру

Метою розробки системи стеження за сонячним промінням є забезпечення самодостатнього живлення та ефективної роботи всіх компонентів без залучення зовнішніх джерел енергії. Система працює виключно за допомогою сонячної енергії, утворюючи замкнену систему. Для досягнення максимальної ефективності, сонячні панелі повинні бути розташовані перпендикулярно до сонячного проміння. Для цього використовується геліотрекер, що дозволяє відслідковувати рух Сонця. У даній системі було обрано трекер АЕDR-8300-1К2, оскільки він є простим у використанні та доступним за ціною (рис.3.1).

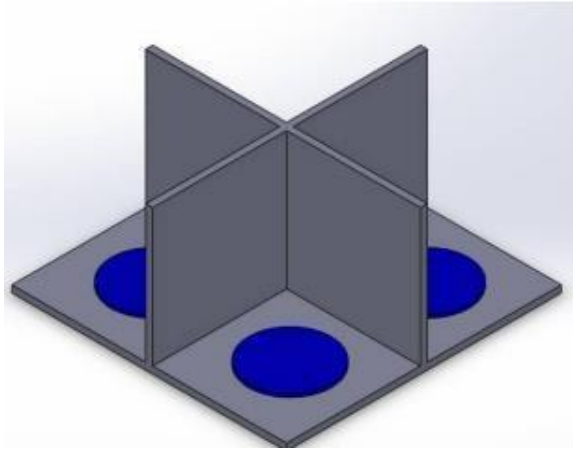


Рис.3.1 Геліотрекер

Цей важливий компонент сонячної системи складається з фотоприймача та двигунів з редукторами, які виконують роль контролера та виконавчого механізму для повороту сонячних панелей. Фотоприймач складається з чотирьох фотодатчиків, розміщених на невеликій платі, розташованих хрестоподібно з перегородками між ними. Фотодатчики визначають положення панелі та її орієнтацію на Сонце. Якщо різниця між освітленістю фотоелементів досягає певного порогу, система запускається та панелі повертаються до Сонця. Алгоритм роботи трекера містить 9 команд, які залежать від інтенсивності освітлення фотоприймача. У таблицях 3.1 та 3.2 наведені всі можливі варіанти освітлення чотирьох фотодатчиків.

Таблиця 3.1

Можливі варіанти освітлення датчиків для двокоординатної системи слідкування за Сонцем

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
Переміщення	Сонце вище та західніше	Сонце вище та східніше	Сонце вище	Сонце західніше	Сонце нижче та східніше
Вертикальний рух	Вгору	Вгору	Вгору	Стояти	Вниз
Горизонтальний рух	На захід	На схід	Стояти	На захід	На схід

Таблиця 3.2

Варіанти освітлення датчиків для двокоординатної системи слідкування за Сонцем:

Датчик А	0	0	0	1
Датчик В	1	0	0	1
Датчик С	1	1	0	1
Датчик D	0	1	1	1
Переміщення	Сонце східніше	Сонце нижче	Сонце нижче та західніше	Точно на Сонце
Вертикальний рух	Стояти	Вниз	Вниз	Стояти
Горизонтальний рух	На схід	Стояти	На захід	Стояти

В таблицях 3.1. та 3.2. прийняті наступні позначення: 1 – датчик освітлений; 0 – датчик в затінку.

### 3.2. Алгоритму відслідковування положення Сонця

Для ефективного використання слідкуючої системи сонячної панелі необхідно розробити нелінійний алгоритм стеження, врахувати можливість покращення статичної точності переміщення та використовувати обрані компоненти: контролер стеження за Сонцем (32-розрядний з вбудованим 16-розрядним аналого-цифровим перетворювачем), двокоординатний датчик положення Сонця на небосхилі та двокоординатний електромеханічний двигун у конструкції СБ.

Для забезпечення максимальної точності слідкування за Сонцем на небосхилі можна використовувати метод Безперервно-дискретного стеження, який передбачає переміщення сонячної панелі на потрібний кут з подальшою зупинкою двигуна. Для успішної реалізації цього методу необхідно забезпечити:

- високу точність слідування за джерелом енергії, що можна досягти зменшенням кроку переміщення в електромеханічному виконавчому механізмі;
- зменшення енергетичних витрат в електромеханічному виконавчому механізмі при стеженні шляхом збільшення дискретного кроку переміщення;
- врахування того, що при зменшенні інтенсивності освітлення продуктивність сонячних батарей значно зменшується і налаштування точності стеження системи не призводить до значного збільшення отриманої енергії..

Відповідно до цих умов виникає протиріччя між задачею та методами її вирішення: якщо точність слідування за Сонцем збільшується, то електромеханічний механізм споживає більше енергії, а якщо крок переміщення збільшується, то точність слідування погіршується. Отже, проектувальник повинен знайти оптимальне рішення, яке враховує обидві умови. На підставі вище сказаного можна стверджувати, що чим вища інтенсивність сонячного світла, тим менший крок переміщення потрібен виконавчому механізму. Наприклад, при максимальному потоці світла на сонячні панелі можна зробити крок переміщення в 1 градус, а при зниженні освітленості в 5 разів – збільшити крок до трьох градусів. Залежність дискретного кроку переміщення механізму від інтенсивності освітлення представлена на рис. 3.2.

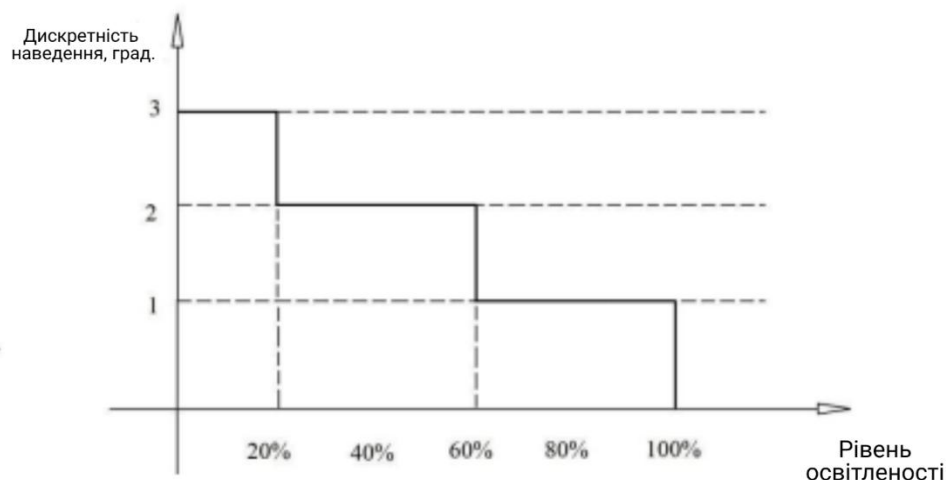


Рис.3.2. Графік зміни дискретного кроку переміщення

Позначимо струми в датчику сонячного положення як  $I_{\phi 1}$  та  $I_{\phi 3}$ , де перший струм протікає в одній грані фотоелемента, а другий - в протилежній. Також використовується позначення  $I_{\phi 2}$  для струму в тилевій частині та  $I_{\phi 4}$  для струму в верхній грані усіченої піраміди. Контролер обробляє струми ДПС та визначає їх середнє значення для уникнення помилок, що можуть виникнути при випадковому затемненні сонячної панелі. Цей процес здійснюється шістдесят разів на хвилину. До фотоелементів датчика підключено аналогове фільтрування на операційних підсилювачах. Формула дозволяє розрахувати значення струму в протилежних гранях фотоелементів:

$$I_{cp1} = \frac{I_{\phi 1} + I_{\phi 3}}{2} \quad 3.1$$

$$I_{cp2} = \frac{I_{\phi 2} + I_{\phi 4}}{2} \quad 3.2$$

Це можливо зобразити середнє значення освітленості у поточний момент часу, що відображається як середнє значення двох струмів, що відносяться до



відносних одиниць (у порівнянні з максимальним струмом фотоелементу ДПС, отриманим при найвищому значенні освітленості), за допомогою даної формули:

$$E_1 = \frac{I_{cp1} + I_{cp2}}{2I_{\max}} \quad 3.3$$

де  $I_{\max}$  - максимальне значення струму фотоелементу ДПС.

Таблиця 3.1 містить дані про енергетичні параметри системи при зміні розміру кроку переміщення [21]. Ця інформація свідчить про те, що зменшення розміру кроку переміщення призводить до збільшення електричної енергії, яка витрачається.

Таблиця 3.3

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)	Питома потужність (Вт)	Питома енергія (Вт/год)
1	3000	3000	3000	0,9	1	1,4	29,4	0,092
2	3000	3000	3000	1,3	1	1,4	29,4	0,0637
3	3000	3000	3000	1,67	1	1,4	29,4	0,049

В таблиці 3.3 вказані експерименти з різною величиною кроків:

- №1 дискретний крок переміщення два градуси;
- №2 збільшено дискретний крок до трьох градусів;
- №3 - крок переміщення збільшено до п'яти градусів.

Алгоритм стеження за Сонцем за допомогою датчика положення має наступні принципи:

- Якщо струми в протилежних гранях фотодатчика рівні, то зміна положення Сонця не потрібна.
- Якщо значення струмів відрізняється, необхідно коригувати положення панелі з датчиком, поки струми не стануть рівними.
- Якщо струми в протилежних фотоелементах співпадають, то положення датчика Сонця на небосхилі відоме або він знаходиться в затінку, і зміна положення рами не потрібна.
- Якщо струм максимальний, то потрібно повернути раму в бік Сонця. Максимальний струм свідчить про те, що Сонце знаходиться зі зворотної сторони рами (відбувається на наступний день після сходу Сонця).

Алгоритм стеження, що було описано вище, можна роз'яснити таким чином: якщо використовувати формули (3.1) та (3.2) для розрахунку середнього значення струмів, то відносна похибка положення за азимутом буде розраховуватися таким способом:

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\phi 1} - I_{\phi 3}}{1} \quad (3.8)$$

Якщо  $\Delta I_1 > 0$  йде відставання дійсної траєкторії і необхідно робити переміщення (стеження за Сонцем) при виконанні такої умови:

$$\Delta I_1 > K_{zn} \quad (3.9)$$

Під час цього процесу відбувається переміщення по азимуту для досягнення заданої траєкторії позиціонування на певному куті. Якщо , то здійснюється випередження реальної траєкторії по азимуту, і раму з СБ переміщувати не потрібно.

Якщо:

$$\Delta I_1 \leq K_{3H} \quad (3.10)$$

то рама сонячної панелі буде наведена із заданою точністю на Сонце.

Якщо:

$$I_{\phi 1} \leq I_{\phi 3} \leq I_{\phi 5} \quad (3.11)$$

то переміщення немає і рама знаходиться у тіньку.

Якщо:

$$\begin{cases} I_{\phi 5} > I_{\phi 1} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 2} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 3} \\ I_{\phi 5} > I_{\phi 4} \end{cases} \quad (3.11)$$

то можемо судити про те, що потрібно зробити повний розворот рами в початкове положення, так як Сонце світить з іншої сторони.

Рама з СБ повертається по азимуту з найвищою можливою швидкістю ШД. Коли досягається бажане положення (коли помилка стає меншою за 0,5 градуса), рама повільно гальмує та зупиняється. Розрахунок похибки положення за кутом виконується таким способом:

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 4}}{I_{CP2}} \quad (3.13)$$

Коли відносна похибка  $\Delta I_2$  буде більшою за задану величину похибки, здійснюється переміщення рами, що визначається як зона нечутливості  $K_{3H}$ .

За виконання умови:

$$\Delta I_2 \geq K_{3H} \quad (3.14)$$

раму з СБ потрібно переміщувати вгору, а при цьому відбувається формування алгоритму переміщення на даний кут.

За виконання умови:

$$\Delta I_2 \leq K_{3H} \quad (3.15)$$

раму з СБ потрібно переміщувати вниз.

За виконання умови:

$$-K_{3H} \leq \Delta I_2 \leq K_{3H} \quad (3.15)$$

рама з СБ не переміщується.

Для визначення закінчення перехідного процесу по керуючому впливу можна вибрати величину коефіцієнта зони нечутливості в діапазоні 5-10% зони. Однак, якщо переміщення становить 1 градус і коефіцієнт зони нечутливості також становить 5-10%, необхідно забезпечити чутливість датчика положення Сонця в 0,05-0,1 градуса, що може бути складно реалізовано в датчиках. Щоб уникнути перерегулювання по положенню при спостереженні та забезпечити можливість реалізації ДПС, значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{3H}$  повинно бути не більше 25% від заданої величини переміщення. Оскільки переміщення відбувається дискретно на 1-3 градуси за обома координатами, значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{3H}$  має змінюватися залежно від заданої величини переміщення, що в свою чергу залежить від поточного

освітлення. У таблиці 3.2. наведено зміну значення коефіцієнта зони нечутливості  $K_{зн}$ , розрахованого за формулою:

$$K_{зн} = \begin{cases} 0,25^\circ \text{ при } E = (100 - 60)\% \text{ від } E_{\max} \\ 0,5^\circ \text{ при } E = (60 - 20)\% \text{ від } E_{\max} \\ 0,75^\circ \text{ при } E = (20 - 0)\% \text{ від } E_{\max} \end{cases} \quad (3.16)$$

Де:

$E$  - значення поточної освітленості

$E_{\max}$  - значення максимальної освітленості.

Таблиця 3.4

Зміна значення коефіцієнта зони нечутливості

Дискретність заданого переміщення в режимі слідування за Сонцем, градус	1	2	3
Точність переміщення, %	25	25	25
Величина поточної освітленості від максимальної, %	100-60	60-20	20-0
Значення коефіцієнту зони нечутливості, градус	0,25	0,5	0,75

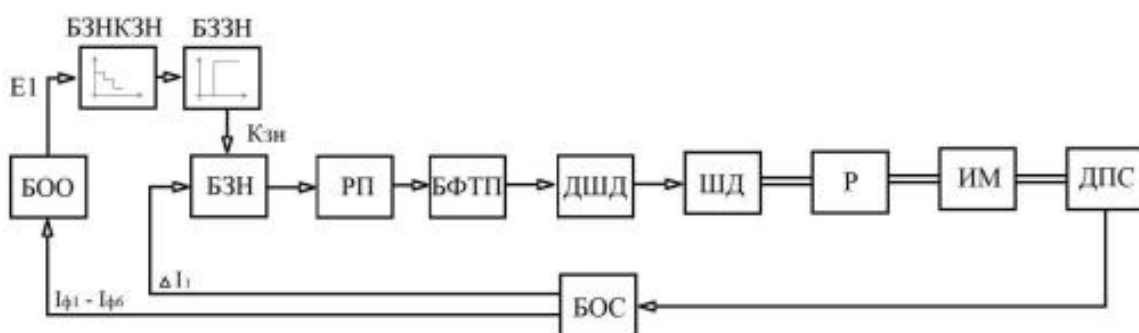


Рис. 3.3. Функціональна схема системи слідкування з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості

Представимо регулятори положення, як елементи релейного типу, які мають змінну величину зони нечутливості:

$$U_{\text{вых рп}} = \begin{cases} U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{вх}} < -K_{\text{НЗ}} \\ 0 & \text{при } -K_{\text{НЗ}} < U_{\text{вх}} < K_{\text{НЗ}} \\ +U_{\text{max}} & \text{при } U_{\text{вх}} > K_{\text{НЗ}} \end{cases} \quad (3.18)$$

$K_{\text{НЗ}}$  - величина зони нечутливості релейного елемента;

$U_{\text{max}}$  - величина вхідного сигналу;

$U_{\text{вых рп}}$  - вихідний сигнал.

На рис.3.4. показана характеристика сигналу.

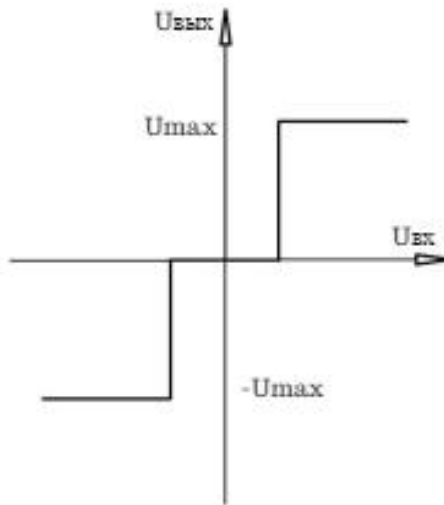


Рис. 3.4. Характеристика регулятора положення

В залежності від значень зони нечутливості (табл. 3.4.) можна визначити характеристику блоку, а також величину поточного освітлення  $E_1$ , що визначається за формулою 3.19. Можемо представити це значення як зовнішній збурюючий чинник такою формулою:

$$K_{нз} = K_2 * E_1 \quad (3.19)$$

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

Так як присутня незначна різниця при переміщенні рами с СБ між часом завершення розрахункової траєкторії і закінченням режиму переміщення на заданий кут і режимі позиціонування, запропоновано алгоритм корекції траєкторії (рис.3.5.).

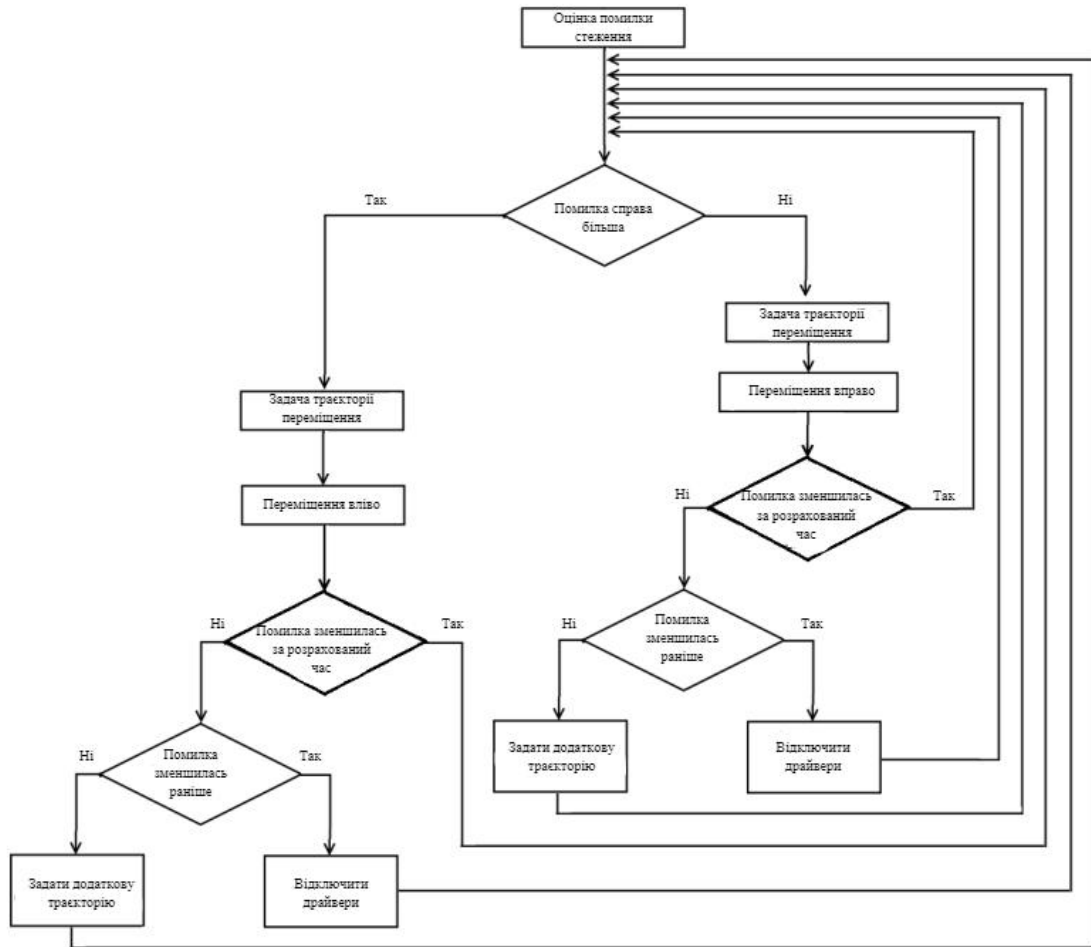


Рис.3.5. Алгоритм корекції траєкторії стеження

Цей алгоритм неперервно відстежує помилки в переміщенні СБ в режимі реального часу і порівнює їх з зоною нечутливості. Драйвери вимикаються, якщо значення помилки вже менше за величину зони нечутливості, навіть якщо процес позиціонування ще не завершився. Якщо значення помилки вище за величину зони нечутливості, додаткове завдання на корекцію може бути включене у загальний алгоритм. Це може включати додаткову коректуючу траєкторію до 0,5 градусів за положенням, яку можна формувати декілька разів в мікроциклі стеження до повної компенсації помилки за положенням.



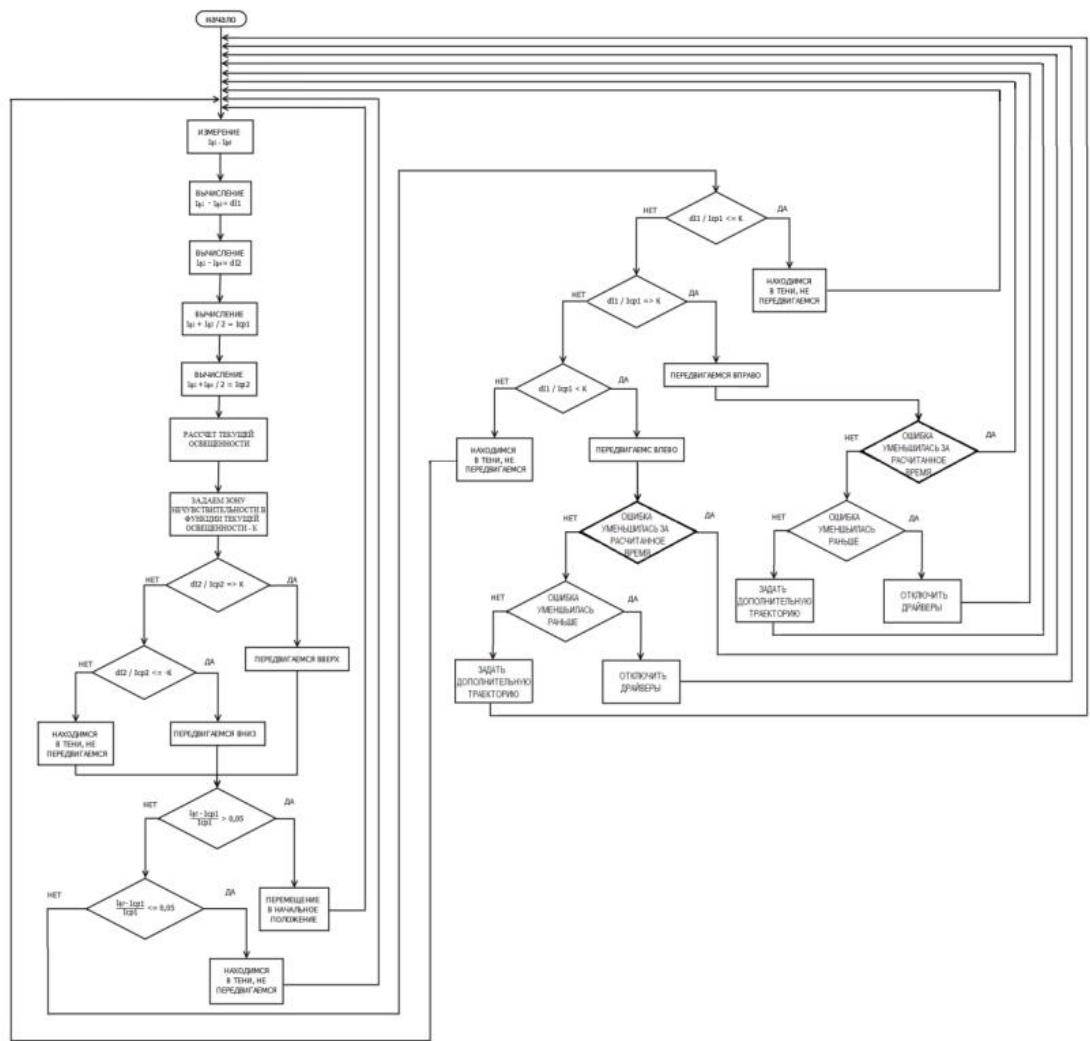


Рис. 3.6. Загальний алгоритм стеження за Сонцем

Для алгоритму стеження за Сонцем за запропонованою структурною схемою (рис. 3.6) необхідно використовувати релейний елемент зі змінною зоною нечутливості в прямому каналі. У системі співвідношення сигнал/шум погіршується при низькій інтенсивності освітлення датчиків та сонячної батареї. Шум включає в себе фонову засвіченість, відображення світла від сторонніх предметів, що знаходяться поруч, шуми та похибки від довгого кабелю. При зменшенні середньої освітленості  $E_1$  збільшення зони нечутливості, зокрема коефіцієнту зони нечутливості, призводить до поліпшення фільтрації системи та

зменшення похибки стеження за Сонцем. Це дозволило розробити алгоритм стеження за Сонцем з використанням датчика положення Сонця з нелінійною характеристикою блоку зони нечутливості (змінною у функції освітленості) для визначення необхідного режиму переміщення.

### **3.3. Ефективність роботи системи**

Розроблена система повинна виконувати вимоги економічної та технічної доцільності її функціонування, крім того, має бути автономною. Система повинна працювати в режимі реального часу та вимірювати поточне значення Зенітного кута та Азимуту за допомогою спеціального пристрою. Отримані значення порівнюються з поточним розташуванням Сонця на небосхилі у конкретний час залежно від року, місяця, дня та години. Після цього система орієнтує сонячну панель на точне перпендикулярне потрапляння сонячних променів на елементи приймання енергії та виводить координати на дисплей.

Для правильної роботи сонячного трекера необхідно забезпечити опитування датчиків освітлення, тому що інтенсивність освітлення впливає на рух і орієнтацію сонячної панелі. Поточні значення порівнюються зі збереженими значеннями в пам'яті трекера, і серводвигуни використовуються для розташування сонячної панелі, щоб утворювався прямий кут між панеллю і променями. Крім того, є можливість налаштування координат вручну та повернення СП у вихідне положення після заходу Сонця. Робота трекера складається з ініціалізації системи, циклічного опитування датчиків, отримання інформації з фотоприймача, запису даних, обробки та аналізу інформації з фотодатчиків, обчислення Азимутального та Зенітного кутів, порівняння поточних даних зі збереженими даними в пам'яті, та переналаштування СП на Сонце в разі виявлення різниці між поточними даними та даними з пам'яті.

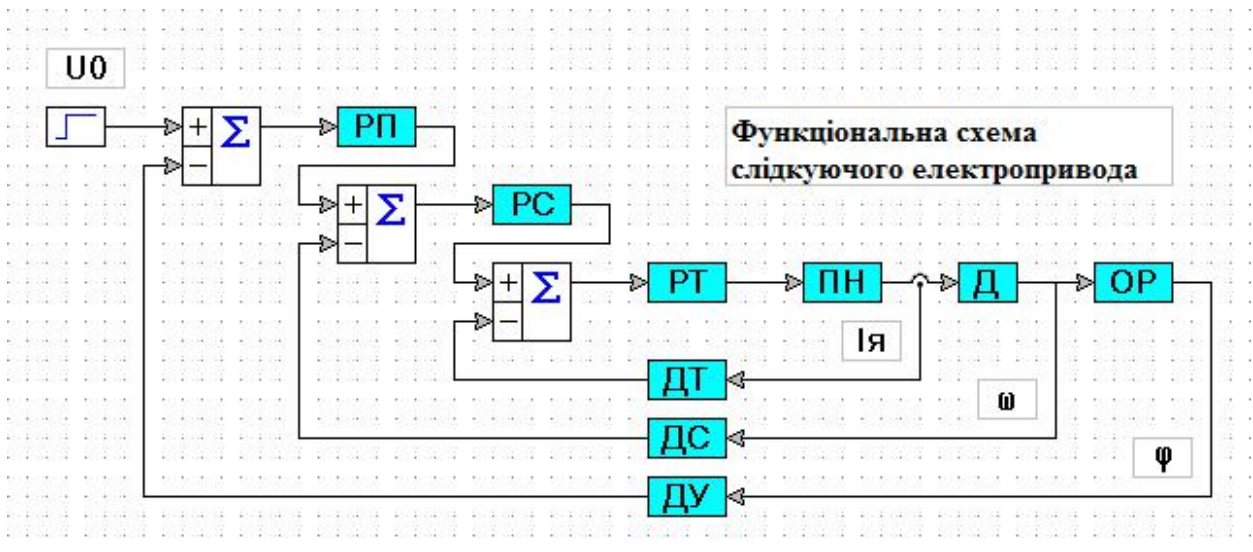


Рис.3.7. Функціональна схема слідкуючого ЕП

У електроприводі, що відслідковує рух, існують два режими: позиціонування та стеження. В режимі позиціонування електропривод повинен перемістити робочий орган з одного положення в інше протягом визначеного часу. Траєкторія руху не завжди має значення, але іноді вимагається відсутність перерегулювання. У режимі позиціонування, точність підтримки робочого органу в заданому положенні при наявності зовнішніх збурень є жорсткою вимогою. У режимі стеження, електропривод повинен рухатися відповідно до змінного керуючого впливу з похибкою, що не перевищує заданих значень. Загальна якість електроприводу оцінюється за точністю позиціонування або стеження, запасом стійкості і стійкістю до різних чинників. У сонячних електростанціях застосовують обидва режими. Якщо використовується кроковий актуатор, найбільш доцільним є використання першого режиму. Якщо потрібно безперервне стеження за траєкторією руху Сонця, то потрібен другий режим.

### Висновки до розділу:

1. Були проаналізовані теоретичні засади системи слідкування за Сонцем на основі отриманого матеріалу.
2. Створено алгоритм для роботи системи слідкування.
3. Проведено розрахунки та розроблено функціональну схему електропривода.

## РОЗДІЛ 4

### Реалізація системи автоматизації ЕП повороту СП

#### 4.1. Структура пристрою

Представимо структурну схему пристрою автоматичного управління одним з приводів, а саме приводом вертикального обертання, на рис. 4.1.

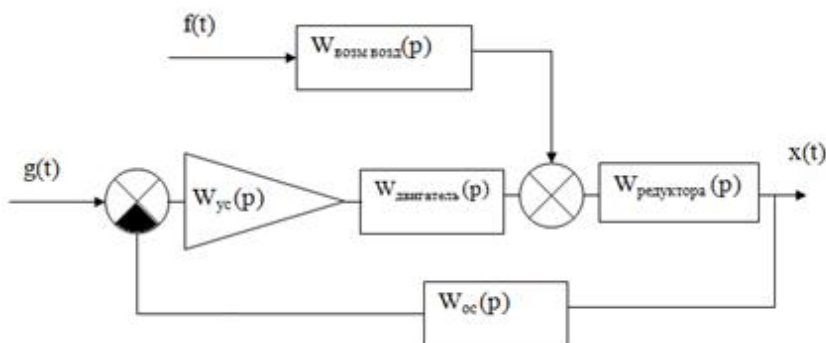


Рис.4.1. Структурна схема системи автоматичного управління приводом вертикального обертання

$W_{ус}(p)$  – передатна ф-ція підсилювача;

$W_{двигуна}(p)$  – передатна ф-ція двигуна;

$W_{редуктора(p)}$  - передатна ф-ція редуктора;

$W_{ос(p)}$  – передатна ф-ція зворотнього зв'язку;

$W_{возм\ возд(p)}$  – передатна ф-ція збурюючого впливу;

Вибір електродвигуна здійснюємо на підставі енергетичного розрахунку.

Моменти інерції різних частин конструкції були використані для визначення потужності та моменту на валу двигуна. Розрахунки моментів інерції виконувались на основі оцінки напружено-деформованого стану та розрахунку міцності кожної частини конструкції з використанням програми твердотільного моделювання SolidWorks. Для вертикального обертання пристрою був обраний двигун RE 50 Ø 50 мм від компанії Махон, основні параметри якого наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри двигуна

Найменування параметру	Позначення	Значення
Індуктивність якоря	$L_{\text{я}}$	0.0000937 Гн
Момент інерції, приведений до валу	$J$	$58,4 \cdot 10^{-6}$ Н·м <sup>2</sup>
Номінальний струм якоря	$i_{\text{я ном}}$	9.15 А
Номінальна напруга	$U_{\text{ном}}$	24 В
Кількість обертів	$N$	5780 об/хв
Номінальний момент	$M_{\text{ном}}$	0.354 Н·м
Опір в ланцюгу якоря	$r_{\text{я}}$	0.113 Ом

Двигун з двома ступенями свободи потребує двох вихідних диференціальних рівнянь при фіксованому збудженні. Перше рівняння можна отримати, використовуючи другий закон Кірхгофа для ланцюга якоря. Друге рівняння можна отримати, використовуючи закон рівноваги моментів на валу двигуна [31].

Роботу приводу описуємо наступним р-ням:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{d}{dt} \cdot i_{\text{я}} + r_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}} = U(t) - C_{\text{е}} \cdot \omega \\ C_{\text{м}} \cdot i_{\text{я}} - M_{\text{н}} = J \frac{d}{dt} \cdot \omega \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\omega_{\text{нх}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad (4.2)$$

$$\omega_{\text{нх}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5780}{60} = 604,97 \text{ с}^{-1}$$

Де:

$$C_e = \frac{U_{ном}}{W_{нх}}$$

$$C_e = \frac{24}{604,97} = 0,039 \quad (4.3)$$

$$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{\lambda\_ном}}$$

$$C_m = \frac{0,354}{9,15} = 0,0386$$

Система р-янь для простору Лапласа:

$$\begin{cases} L_{\lambda} \cdot p \cdot i_{\lambda} + r_{\lambda} \cdot i_{\lambda} = U(t) - C_e \cdot w \\ C_m \cdot i_{\lambda} - M_{\lambda} = J \cdot p \cdot w \end{cases} \quad (4.4)$$

Виразимо з другого р-ня системи (4.4) струм і підставимо в перше:

$$\begin{cases} i_{\lambda} (L_{\lambda} \cdot p + r_{\lambda}) = U(t) - C_e \cdot w \\ i_{\lambda} = \frac{J \cdot p \cdot w + M_{\lambda}}{C_m} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\frac{J \cdot p \cdot w + M_{\lambda}}{C_m} (L_{\lambda} \cdot p + r_{\lambda}) = U(t) - C_e \cdot w$$

При розкритті дужок та отримаємо:

$$\frac{L_{\lambda} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 \cdot w + \frac{L_{\lambda}}{C_m} \cdot p \cdot M + \frac{r_{\lambda} \cdot J}{C_m} \cdot p \cdot w + \frac{r_{\lambda}}{C_m} \cdot M = U(t) - C_e \cdot w \quad (4.6)$$

Перетворимо:

$$w \cdot \left( \frac{L_m \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_m \cdot J}{C_m} \cdot p + C_m \cdot p \right) = E(t) - M \cdot \left( \frac{L_m}{C_m} \cdot p + \frac{r_m}{C_m} \right) \quad (4.7)$$

Звідси знайдемо передатню ф-цію:

$$W_{uc}(p) = \frac{1}{\frac{L_m \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_m \cdot J}{C_m} \cdot p + C_m} \quad (4.8)$$

$$W_{uc}(p) = \frac{1}{\frac{0,0000937 \cdot 58,4 \cdot 10^{-3}}{0,0386} \cdot p^2 + \frac{0,113 \cdot 58,4 \cdot 10^{-3}}{0,0386} \cdot p + 0,039}$$

$$W_{uc}(p) = \frac{1}{0,0000001418 \cdot p^2 + 0,000171 \cdot p + 0,039}$$

Визначаємо передатню ф-цію по збурюючому впливу:

$$W_{збурюючий}(p) = \frac{\frac{L_m}{C_m} \cdot p + \frac{r_m}{C_m}}{\frac{L_m \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_m \cdot J}{C_m} \cdot p + C_m}$$

$$W_{збурюючий}(p) = \frac{\frac{0,0000937}{0,0386} \cdot p + \frac{0,113}{0,0386}}{\frac{0,0000937 \cdot 58,4 \cdot 10^{-3}}{0,0386} \cdot p^2 + \frac{0,113 \cdot 58,4 \cdot 10^{-3}}{0,0386} \cdot p + 0,039} \quad (4.9)$$

$$W_{збурюючий}(p) = \frac{0,002427 \cdot p + 2,927}{0,0000001418 \cdot p^2 + 0,000171 \cdot p + 0,039}$$

Передатна ф-ція підсилювача:  $W_{yc}(p) = 24$

Передатна ф-ція зворотного зв'язку:  $W_{oc}(p) = 1$ .

Передатна ф-ція редуктора  $W_{редуктора}(p) = 0.00345$ .

## 4.2. Моделювання системи засобами MATLAB



Аби отримати графік перехідного процесу системи автоматичного управління, засобами програмного пакету MATLAB проведено її моделювання. Для цього використовуємо середовище моделювання Simulink, розширення програмного продукту [32].

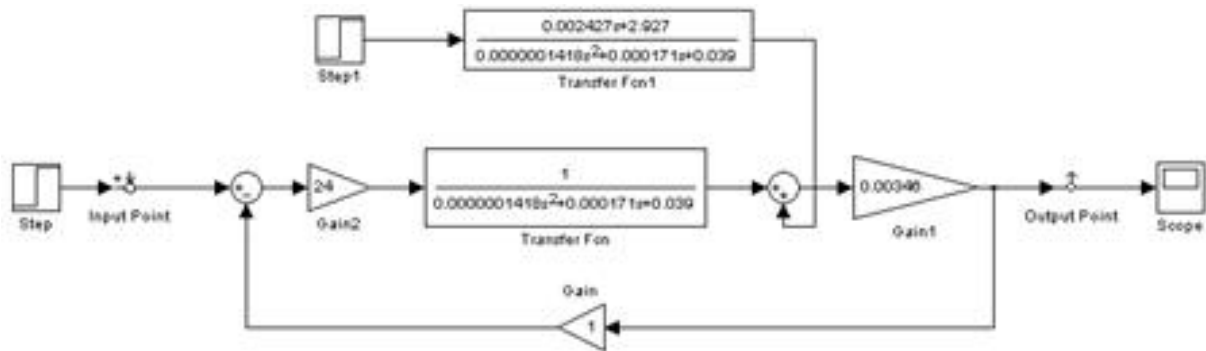


Рис.4.2. Модель системи автоматичного керування

Використовуватиметься одиничний східчастий сигнал для впливу на систему, а графік перехідного процесу буде побудовано за допомогою вбудованих засобів Simulink (рис.4.3).

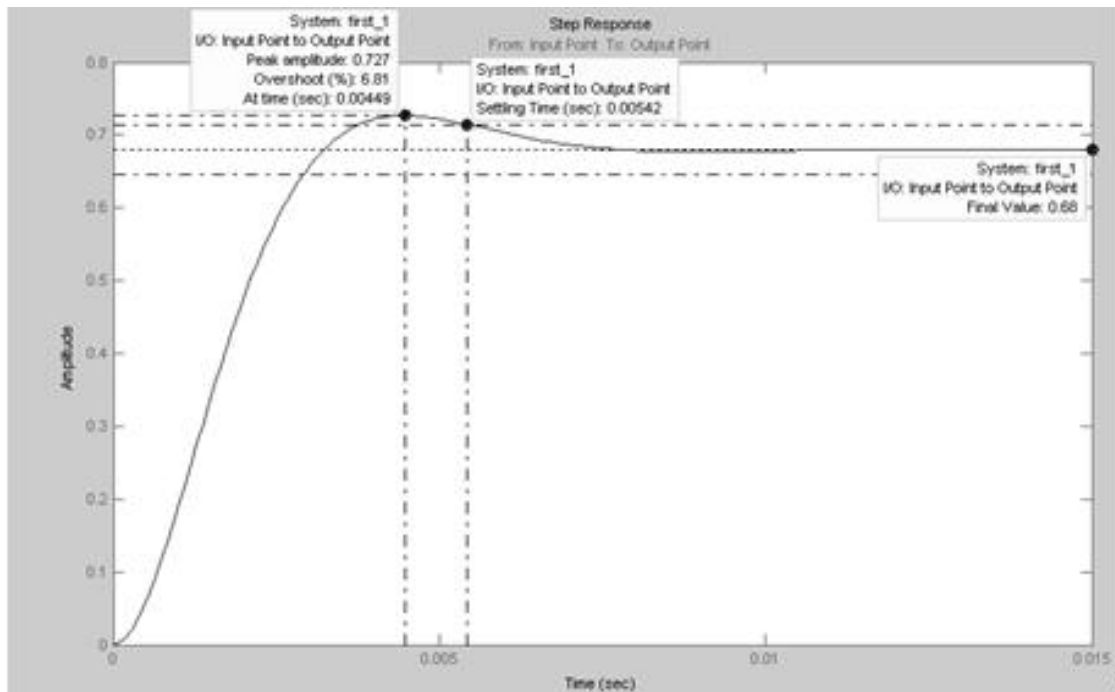


Рис.4.3. Графік перехідного процесу системи

На графіку видно, що можна отримати такі параметри системи автоматичного управління, як наприклад величина статичної помилки (0,0037%), час перехідного процесу (0,00542 с), наявність коливань та коефіцієнт перерегулювання (6,81%). З урахуванням цих даних, можна зробити висновок, що система автоматичного управління не відповідає технічним вимогам щодо величини статичної помилки та часу перехідного процесу і потребує налаштування. Для корегування системи використаємо ПД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) регулятор. Для налаштування ПД регулятора використовуємо вбудовані засоби середовища моделювання Simulink.

Підбір коефіцієнтів здійснюємо за допомогою блоку NCD OutPort. Включаємо його в схему(рис.4.4).

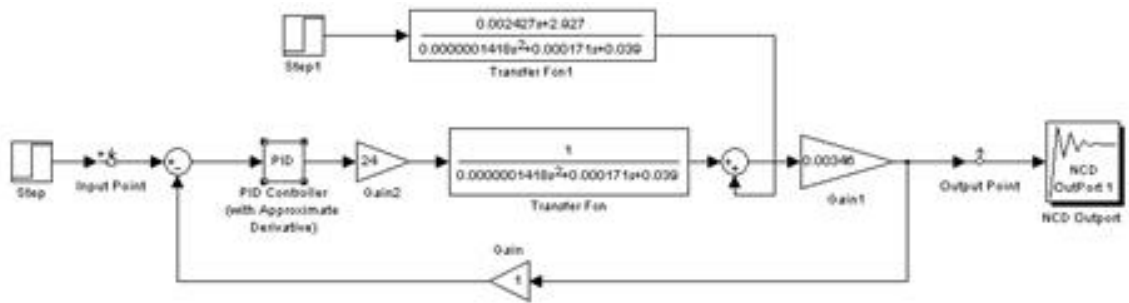


Рис.4.4. Схема для налаштування ПІД-регулятора

Задаємо налаштування блоку NCD OutPort (Рис.4.5 і 4.6) і ПІД регулятора (рис. 4.7).

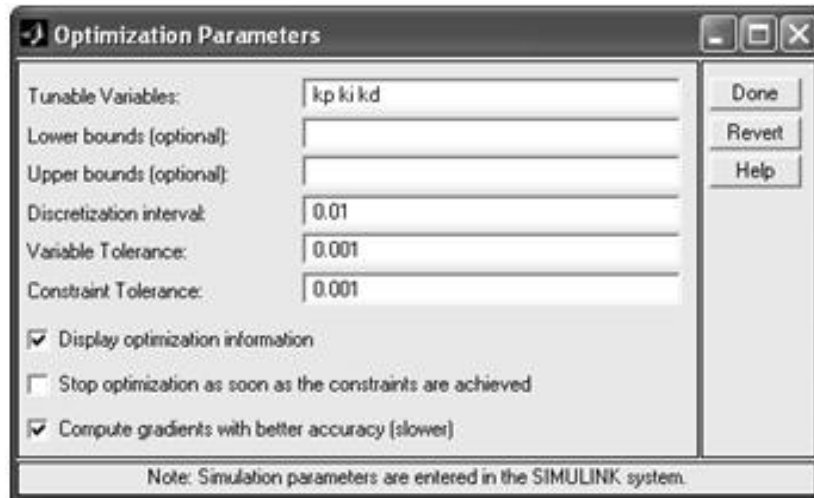


Рис.4.5. Налаштування блоку NCD OutPort

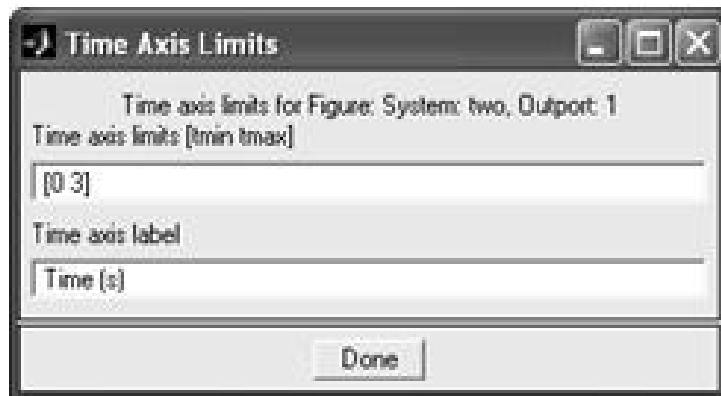


Рис.4.5. Налаштування блоку NCD OutPort

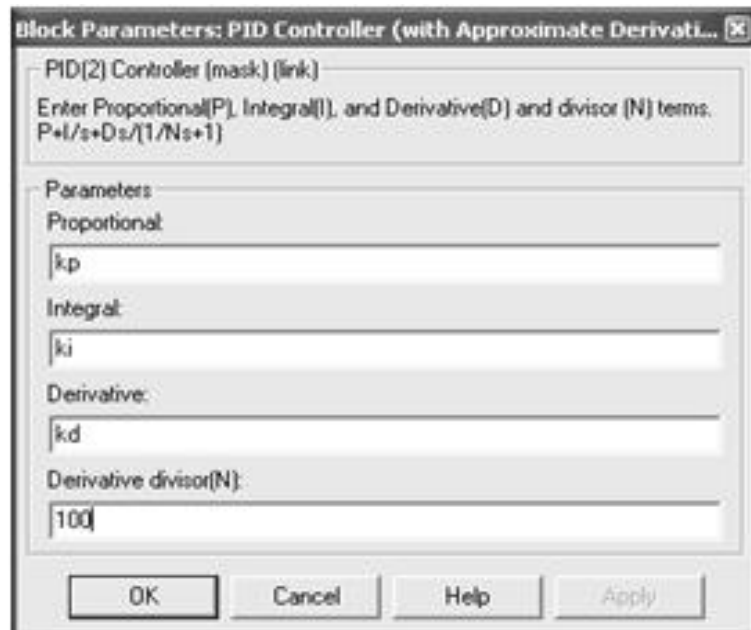


Рис.4.6. параметри ПД регулятора

У блоці NCD OutPort задамо обмеження для графіку перехідного процесу як на рис.4.7.

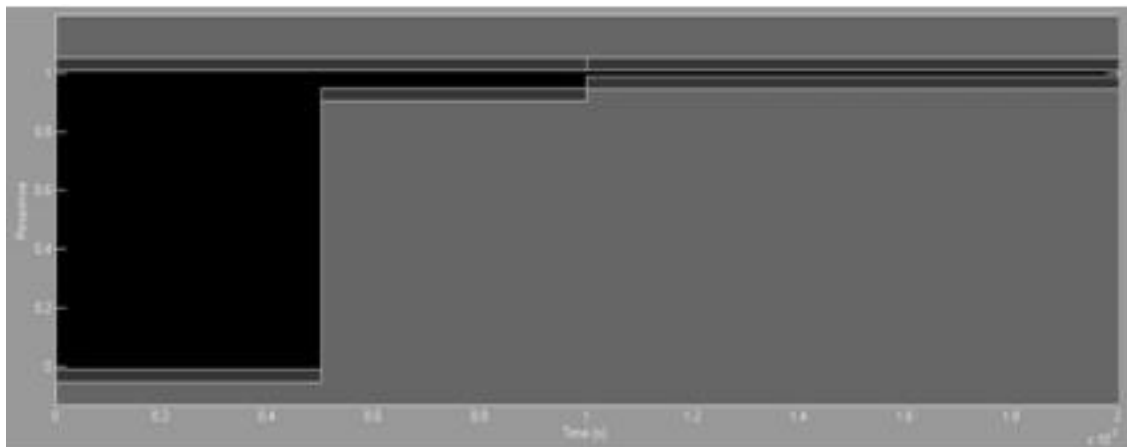


Рис.4.7. налаштування кордонів в блоці

Значення коефіцієнтів, які ми отримуємо за рахунок оптимізації в блоці NCD OutPort:

$$K_p = 0.000001$$

$$K_d = 10, 003$$

$$K_i = 9,00021$$

Перехідна функція задовольняє технічним завданням (рис.4.8).

Отримано такі характеристики:

- 1) Час перехідного процесу - 0.148 с.
- 2) Кількість коливань - 0.
- 3) Стале значення - 1 с<sup>-1</sup>.
- 4) Коефіцієнт перерегулювання - 0.
- 5) Статистична похибка - 0.

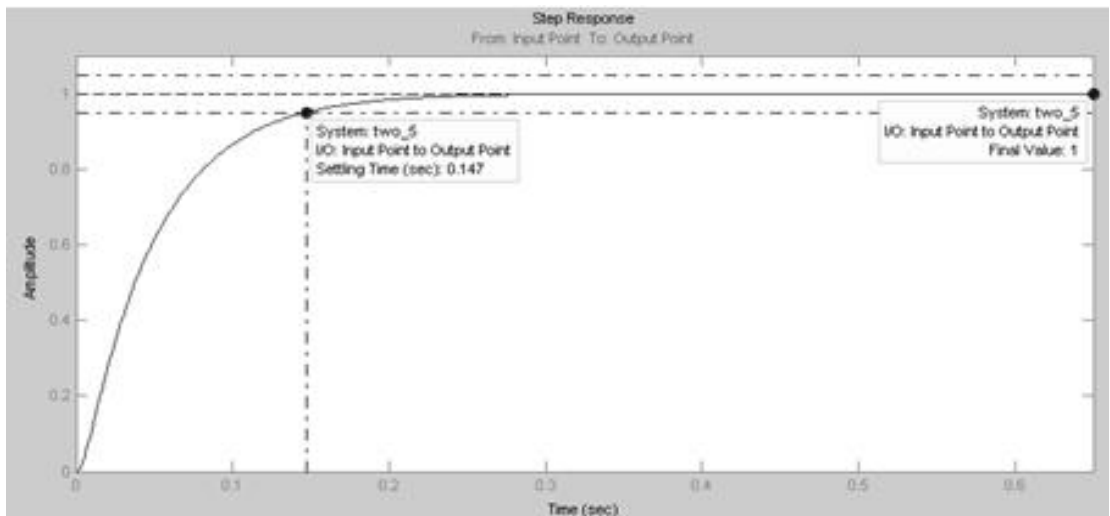


Рис.4.8. Реакція системи на одиничний східчатий вплив

Передатна функція розімкнутої системи:

$$W_{\text{раз}} = W_{\text{ус}}(p) \cdot W_{\text{двигателя}}(p) \cdot W_{\text{редуктора}}(p) \cdot W_{\text{ПИД-регулятора}}(p) \quad (4.10)$$

$$W_{\text{роз}}(p) = u_{yc} \cdot \frac{1}{\frac{L_2 \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_2 \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e} \cdot \frac{1}{u_{ped}} \cdot \frac{K_d \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_i}{p} \quad (4.11)$$

Визначимо передатну функцію замкнутої систем:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{роз}}(p)}{1 + W_{\text{ос}}(p) W_{\text{роз}}(p)} \quad (4.12)$$

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{u_{yc} \cdot \frac{1}{\frac{L_2 \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_2 \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e} \cdot \frac{1}{u_{ped}} \cdot \frac{K_d \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_i}{p}}{1 + u_{yc} \cdot \frac{1}{\frac{L_2 \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{r_2 \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e} \cdot \frac{1}{u_{ped}} \cdot \frac{K_d \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_i}{p}} \quad (4.13)$$

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{u_{yc} \cdot K_d \cdot p^2 + u_{yc} \cdot K_p \cdot p + u_{yc} \cdot K_i}{\frac{L_2 \cdot J}{C_m} \cdot u_{ped} \cdot p^3 + \left( u_{yc} \cdot K_d + u_{ped} \cdot \frac{r_2 \cdot J}{C_m} \right) \cdot p^2 + (u_{yc} \cdot K_p + C_e \cdot u_{ped}) \cdot p + u_{yc} \cdot K_i} \quad (4.14)$$

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{24 \cdot 10 \cdot p^2 + 24 \cdot 0,000001 p + 24 \cdot 9}{\frac{0,000018910^{-6}}{0,0386} \cdot p^3 + \left( 240 + \frac{0,002277610^{-6}}{0,0386} \right) \cdot p^2 + 0,0001589 p + 216} \quad (4.15)$$

Характеристичне р-ня замкнутої системи має такий вигляд:

$$\frac{L_2 \cdot J}{C_m} \cdot u_{ped} \cdot p^3 + \left( u_{yc} \cdot K_d + u_{ped} \cdot \frac{r_2 \cdot J}{C_m} \right) \cdot p^2 + (u_{yc} \cdot K_p + C_e \cdot u_{ped}) \cdot p + u_{yc} \cdot K_i = 0 \quad (4.16)$$

$$\frac{0,0000189 \cdot 10^{-6}}{0,0386} \cdot p^3 + \left( 240 + \frac{0,0022776 \cdot 10^{-6}}{0,0386} \right) \cdot p^2 + 0,0001589 \cdot p + 216 = 0 \quad (4.17)$$

$$0.000000004896 \cdot p^3 + 240.00000005901 \cdot p^2 + 0,0001589 \cdot p + 216 = 0 \quad (4.18)$$

Варто провести z-перетворення передатної ф-ції безперервної системи для дослідження ЦСАУ. Використаємо засоби математичного пакету VisSim (рис.4.9).

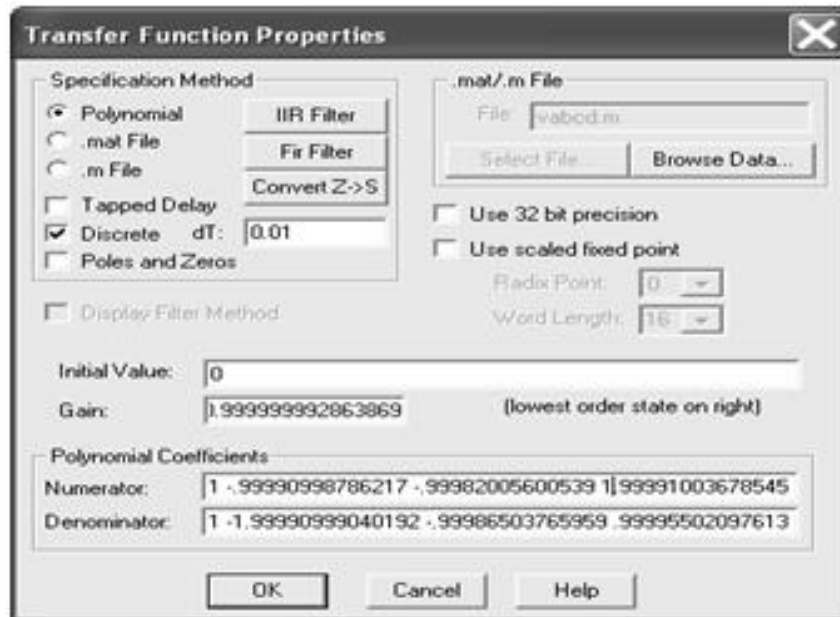


Рис.4.9. перехід в Z-простір засобами VisSim

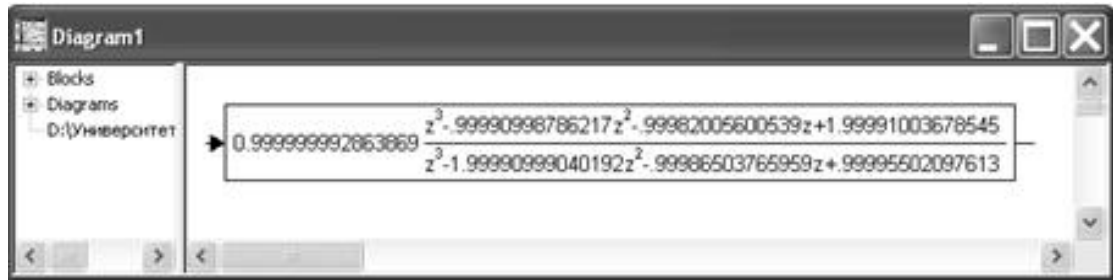


Рис.4.10. дискретна передатна функція, що отримана засобами VisSim

Змоделюємо схему цифрової систем автоматизованого управління у Simulink (рис.4.11).

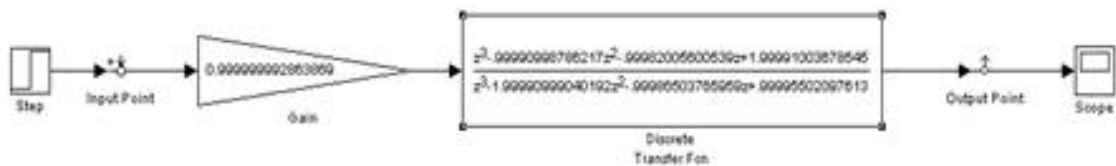


Рис.4.11. Структурна схема ЦСАУ

### 4.3. Дослідження стійкості цифрової системи

Відомо, що безперервна система стійка в тому випадку, коли всі корені її характеристичного рівняння лежать у лівій півплощині. При дослідженні дискретних систем замість  $p$  використовується нова змінна  $z = e^{pT}$ . А конформне перетворення  $z = e^{pT}$  відображає ліву півплощину  $p$  у область, обмежену колом одиничного радіуса на площині  $z$ , а при цьому уявна вісь відбивається у саму таку окружність [30]. Так для того, аби система була стійка, потрібно, аби корені характеристичного рівняння лежали всередині одиничного кола.



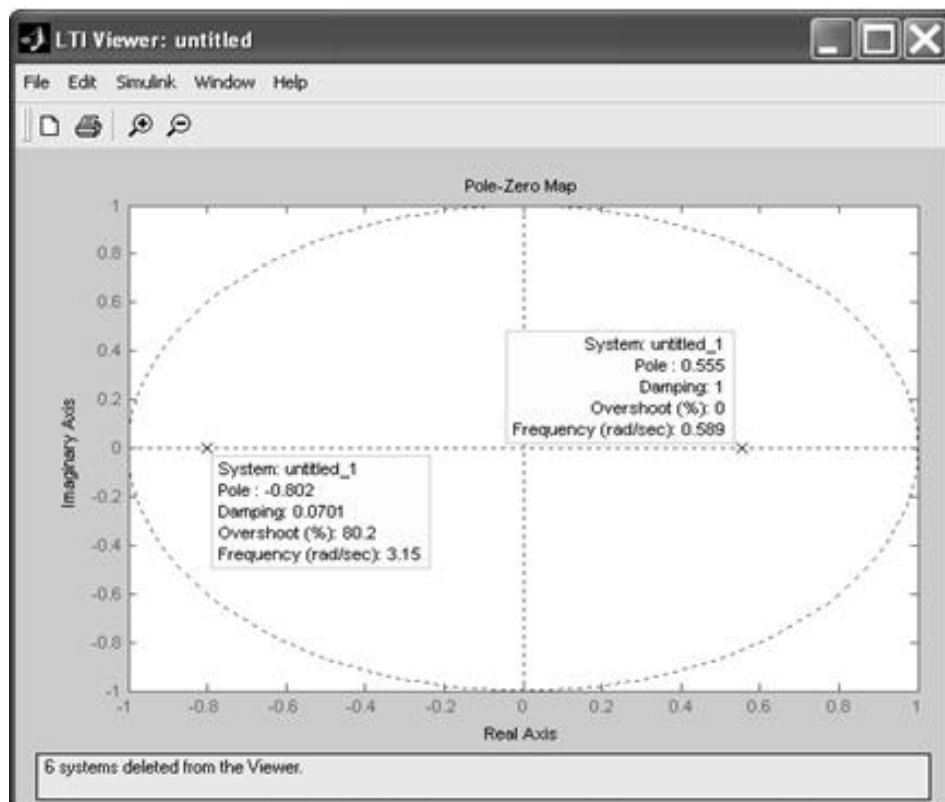


Рис.4.12 Перевірка на стійкість ЦСАУ

Як видно, всі корені характеристичного рівняння лежать всередині одиничного кола, а отже, проектована цифрова система є стійкою.

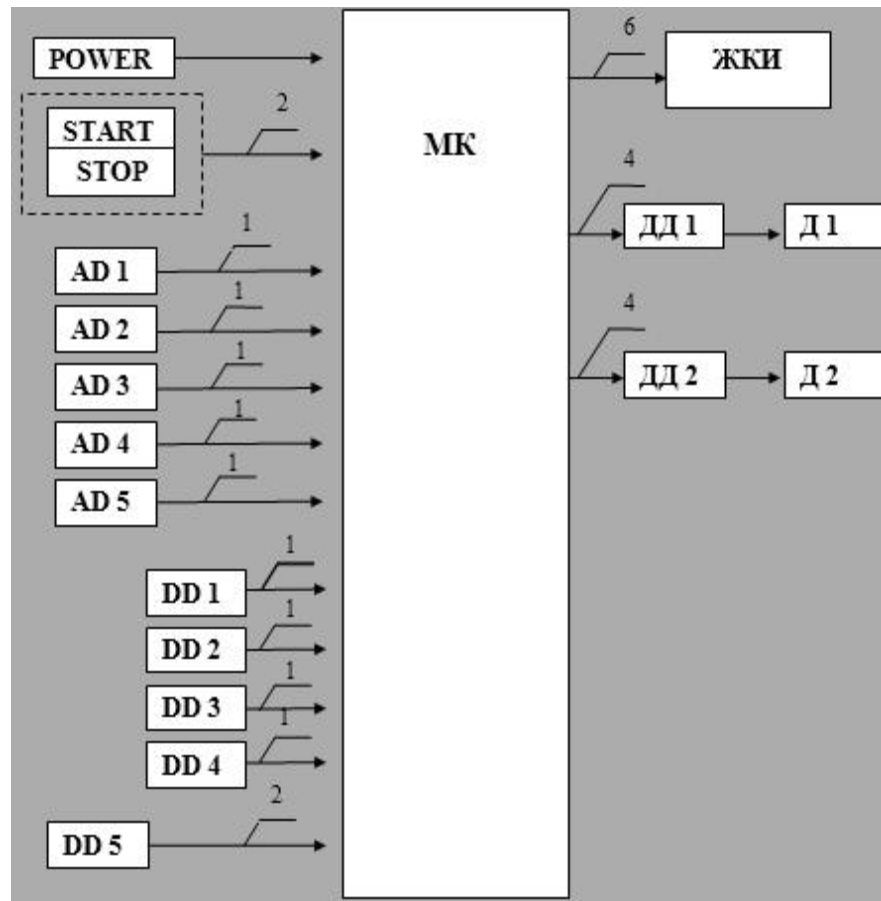


Рис.4.13. представлення функціональної схеми у вигляді блок-схеми

Розглянувши функціональну схему пристрою можна зробити висновок.

Список необхідних компонентів:

- 1) Мікроконтролер;
- 2) Кінцеві датчики;
- 3) Датчики рівня освітленості;
- 4) Драйвери двигунів;
- 5) РКІ - дисплей;

Задля проектованої ЦСАУ розумно використовувати невеликий за розмірами, який не вимагає для роботи додаткових мікросхем оточення,

недорогий мікропроцесор, який має в той же час достатні можливості для вирішення поставленого завдання.

У якості мікроконтролера для цієї САУ обрано мікроконтролер Atmega16 (PDIP) від виробника Atmel. Це КМОП мікроконтролер, який побудований з використанням розширеної архітектури AVR. Виконуючи по одній команді за період тактової частоти, Atmega16 має продуктивність приблизно 16 MIPS на 16 МГц, яка дозволяє розробникам створювати системи, якф оптимальні за швидкістю і споживаної потужності.



Рис.4.14. Мікроконтролер АТmega16 компанії Atmel

У основі ядра AVR лежить RISC архітектура, що об'єднує розвинений набір команд і 32 регістра загального призначення. Усі 32 регістра підключені до арифметико-логічного пристрою, який дає доступ до будь-яких двох регістрів за один машинний цикл. Така архітектура забезпечує вигравш в ефективності коду. У Atmega16 є такі можливості:

- завантажуваної флеш-пам'яті на 16 кБ;
- EEPROM на 16 кБ;
- 32 ліній вводу / виводу загального призначення;
- внутрішні та зовнішні переривання;

- таймери з режимом збігу;
- 32 \* 8 робочих регістри;
- програмований універсальний послідовний порт;
- вбудований аналоговий компаратор;
- трьохканальний ШІМ;
- вбудований генератор;
- 8 - канальний 10 - бітний АЦП;
- сторожовий лічильник.

Atmega16 є потужним мікроконтролером, що дозволяє створювати гнучкі і ефективні пристрої. Напруга, яка потрібна для живлення це 4.5-5.5В, робоча частота 0-16 МГц.

Розводка мікроконтролеру на рис. 4.15.

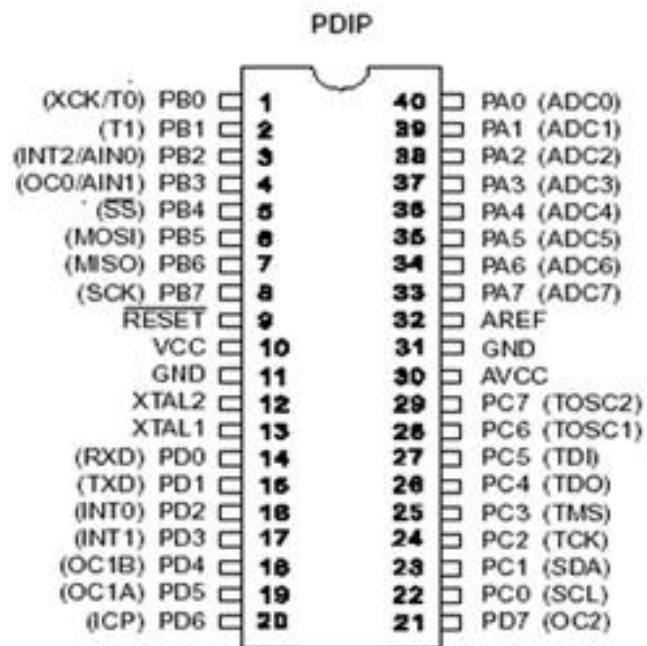


Рис.4.15. Розводка кабелю мікроконтролеру Atmega16

Нижче є опис виводів мікроконтролера Atmega16.

GND - земля

VCC - вивід джерела струму

Порт А - 8-разр. двонаправленого вводу-виводу із внутрішніми резисторами.

Порт В - 8-разр. двонаправленого вводу та виводу з внутрішніми підтягуючим до плюса резисторами.

Порт С - 8-разр. двонаправленого вводу-виводу з внутрішніми підтягуючим до плюса резисторами (вибираються окремо для кожного розряду).

Порт D - 8-разр. двонаправленого вводу-виводу з внутрішніми підтягуючим до плюса резисторами (вибираються окремо для кожного розряду).

RESET - вхід скидання.

XTAL1 - вхід інвертуючого підсилювача генератора і вхід зовнішнього тактового сигналу.

XTAL2 - вихід інвертируючого підсилювача генератора.

AREF - вхід підключення джерела опорного напруги АЦП.

AVCC - харчування аналогових частин мікроконтролера.

Для ефективного керування електроприводами необхідний підсилювач потужності, оскільки рівень струму, що постачається з мікроконтролера, недостатній для роботи приводів, а напруга живлення електроприводів перевищує можливості мікроконтролера. Крім того, електропривод є

індуктивним навантаженням, тому безпосереднє підключення до мікроконтролера може привести до індуктивних викидів.

Для вирішення цих проблем будемо використовувати двонаправлений драйвер двигунів постійного струму MoviPower Lite від компанії Movicom (рис.4.16), який забезпечує робочу напругу від 5,5 до 36 В, робочий струм до 8 А, піковий струм до 30 А, частоту ШІМ до 20 кГц, можливість реверсивного управління, захист від перевантаження по струму і перегріву, а також сплячий режим.

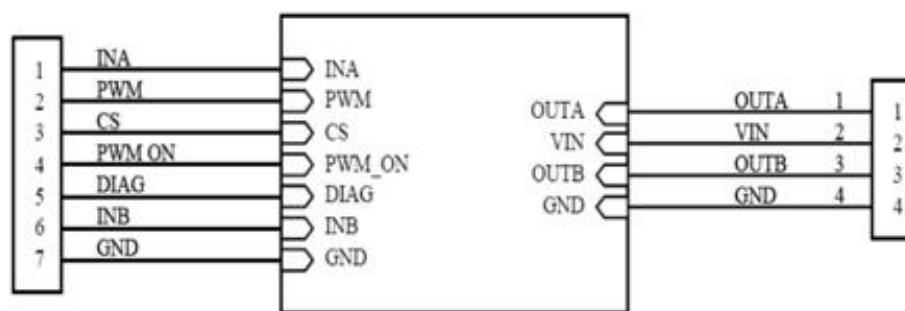


Рис.4.16. Роз'єми підключення драйвера

Таблиця 4.2

Сигнали керування, живлення та вхідні сигнали драйверу

INA	перший вхід керування направленим рухом
PWM	сигнал ШІМ
CS	струмовий сигнал пропорційний струму двигуна
PWM_ON	сигнал ввімкнення драйвера (1 – включений, 0 – сплячий режим пониженого енергоспоживання)
DIAG	сигнал перевантаження (1 – нормально, 0 – перевантаження)
INB	другий вхід керування напрямком руху
GND	мінус живлення

Таблиця 4.3

Таблиця істинності роботи драйверу (В – низький сигнал, Н – високий сигнал)

INA	INB	OUTA	OUTB	Коментар
1	1	В	В	Гальмування, обмотки двигуна закорочені через плюс
1	0	В	Н	Рух по годинниковій стрілці
0	1	Н	В	Рух проти годинникової стрілки
0	0	Н	Н	Гальмування, обмотки двигуна закорочені на мінус

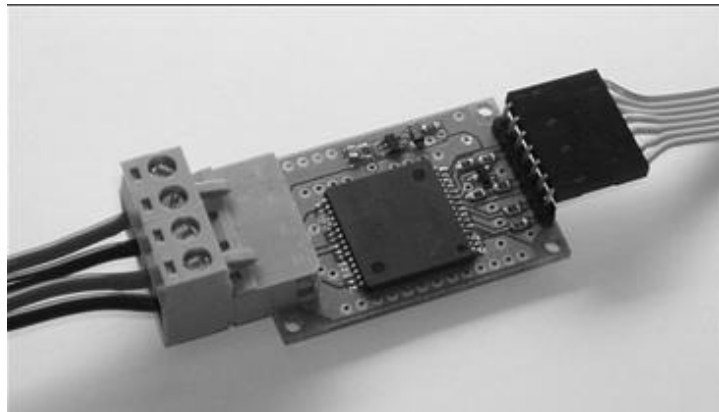


Рис.4.17. Драйвер двигуна постійного струму MovIPower

Ми будемо використовувати датчики APDS-9002/3 від компанії Avago Technologies як датчики рівня освітленості. Ці датчики використовують фотодіод або фототранзистор з максимальною спектральною чутливістю 550 нм, що збігається з максимальним відгуком людського ока. Таким чином, вони

перевершують аналогічні вироби інших типів. На малюнку 44 показано, як залежність чутливості датчиків ALPS та кремнієвих датчиків рівня освітленості змінюється залежно від джерела освітлення, такого як флуоресцентна лампа, лампа розжарювання і галогенні лампи.

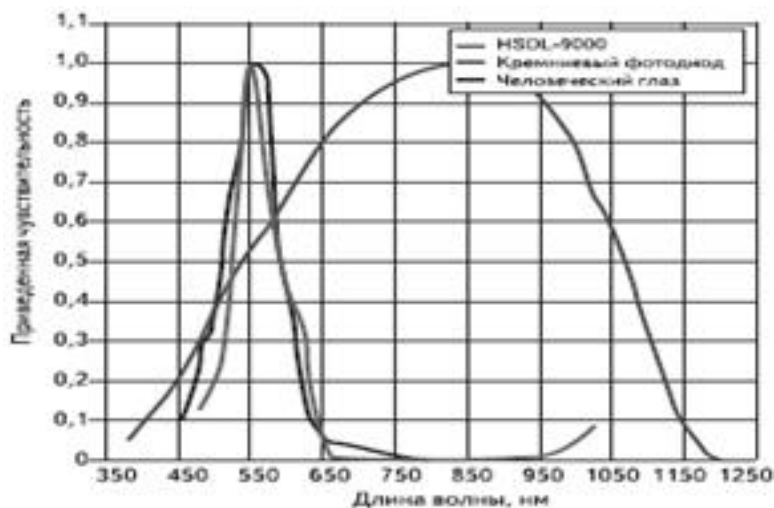


Рис.4.18. Залежність чутливості датчиків від довжини хвилі

Датчик APDS-9002/3 є найбільш оптимальним за параметрами. Він спеціально оптимізований для відповідності кривій видимості людського ока, має аналоговий вихід та добру лінійність фотоструму в широкому діапазоні від 10 лк до 1 клк. Цей датчик має низьку зміну чутливості до різних джерел світла, працює в діапазоні напруг живлення від 2,2 В до 5,4 В, має індустриальний температурний діапазон від -40 до +85 градусів Цельсія та мініатюрний корпус для поверхневого монтажу chipLED (див. рис. 45). Типова схема підключення датчика APDS-9002/3 наведена на малюнку 46. Фотострум цього датчика може змінюватись від 10 до 400 мкА при зміні рівня освітленості до 600 лк.




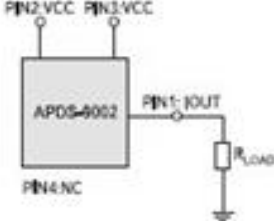
Параметр	APDS-9002 /3
Размер (h×w×d), мм и тип корпуса	APDS-9002: 0,8×2,00×1,25 APDS-9003: 0,55×1,6×1,5 стандартный chipLED
Вид	
Схема	
Тип выходного сигнала	аналоговый
Напряжение питания, В	2,4–5,5
Рабочая температура, °С	–40...+85
Ток	Темновой ток: 160 нА (тип.) Световой ток: 10 мкА до 400 мкА 250 мкА (тип.) при 100 Люкс

Рис.4.19. Характеристики датчиков APDS-9002/3

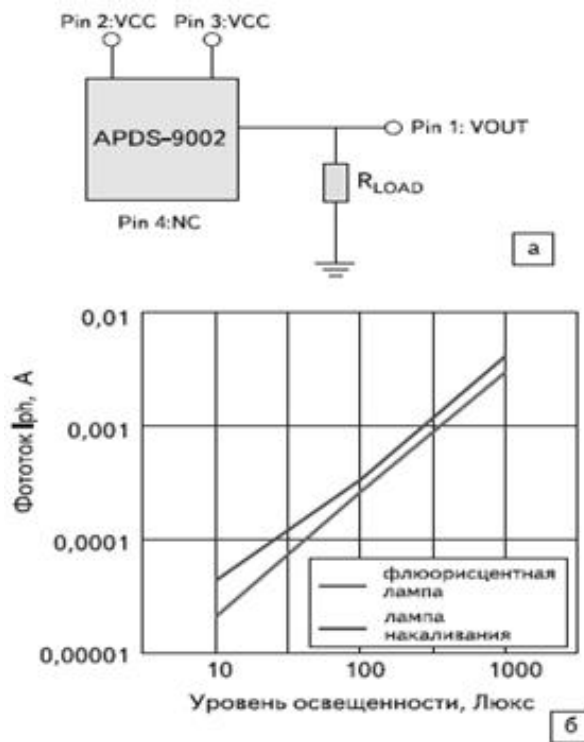


Рис.4.20. Типова схема включення датчику рівня освітленості APDS – 9002/3 і графік залежності фотопотоку від рівня його освітленості

В якості кінцевих датчиків використаємо вимикачі серії Z компанії OMRON (рис.4.21).



Рис.4.20. Кінцевий вимикач в базовому пластмасовому корпусі

Серія Z базових вимикачів з пластмасовим корпусом має такі ж електричні та механічні показники, а також термін служби, як стандартні кінцеві вимикачі, проте з оптимальним співвідношенням ціна-якість для використання в безпечних середовищах та у компоновальних вузлах. Крім того, для контролю кута повороту вала приводу вертикального обертання використовується ЖК-індикатор HD44780U фірми HITACHI з можливістю відображення символів і знаків в режимі 5x8 та 5x10 точок, значною швидкістю шини контролера та двома режимами запису інформації. У даній роботі буде використовуватися 4-розрядний режим з 6 виводами МК, а напруги живлення РКІ та драйвера лежать в діапазоні від 2.7-5.5В. Команди контролера РКІ та призначення виводів наведені в таблицях.

Таблиця 4.4

## Призначення виводів мікросхеми HITACHI - HD44780U

Вивід	Позначення	Призначення
1	GND	Земля
2	Vee	Напруга живлення
3	Contrast	Регулювання контрастності
4	R/S	Команда/Вибір регістру
5	R/W	Зчитування/Запис
6	E	Тактові імпульси
7-14	Data	Данні D0-D7

## Команди контролера HITACHI - HD44780U

R/S	R/W	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Команда	Код команди
	5	14	13	12	11	10	9	8	7	Ввід/вивід даних	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Очищення дисплею	0x01
0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	Переміщення курсору в лівий кут (Home)	0x02 0x03
0	0	0	0	0	0	0	1	ID	S	Направлене переміщення курсору	0x08- 0x0F
0	0	0	0	0	0	1	DE	C	B	Включення/Виключення дисплею, курсору	0x10- 0x1F
0	0	0	0	0	1	Sc	RL	*	*	Зміщення курсору/Здвиг зображення	0x20- 0x3F
0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*	Вибір режиму роботи	0x40- 0x7F
0	0	0	1	A	A	A	A	A	A	Вибір позиції курсору в області символу	0x80- 0xFF
0	1	BF	*	*	*	*	*	*	*	Прапор зайнятості	
1	0	D	D	D	D	D	D	D	D	Записати код символу	
1	1	D	D	D	D	D	D	D	D	Зчитати 5 код символу	

\* - стан бітів байдуже;

#### 4.4. Алгоритм управління та схема плати

Проектуємо керуючу плату з урахуванням обраних компонентів. Її принципова схема представлена на рис.4.21.

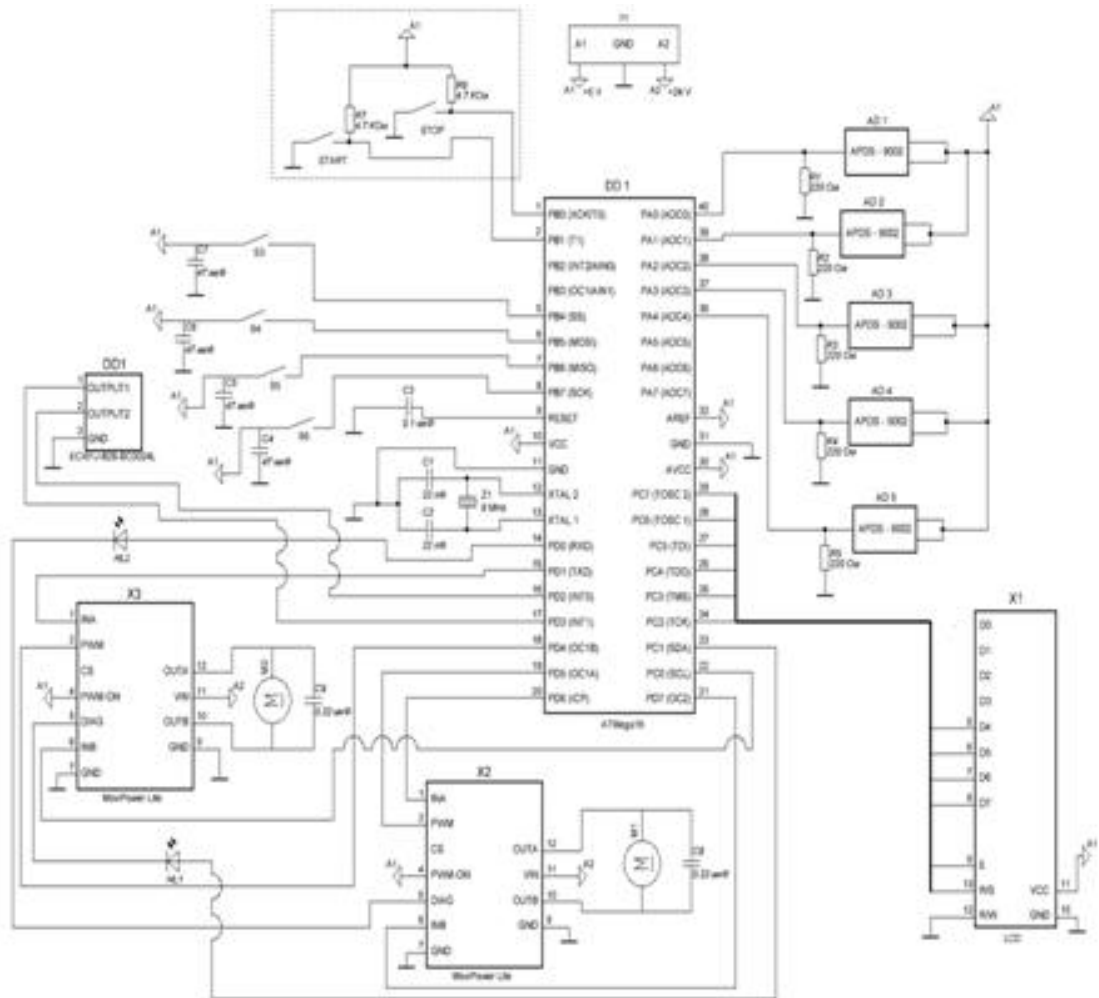


Рис.4.21. Принципова схема керуючої плати

Враховуючи технічні особливості цифрової системи автоматичного управління [31], розробимо алгоритм керуючої програми для неї (показано на рис.4.22).

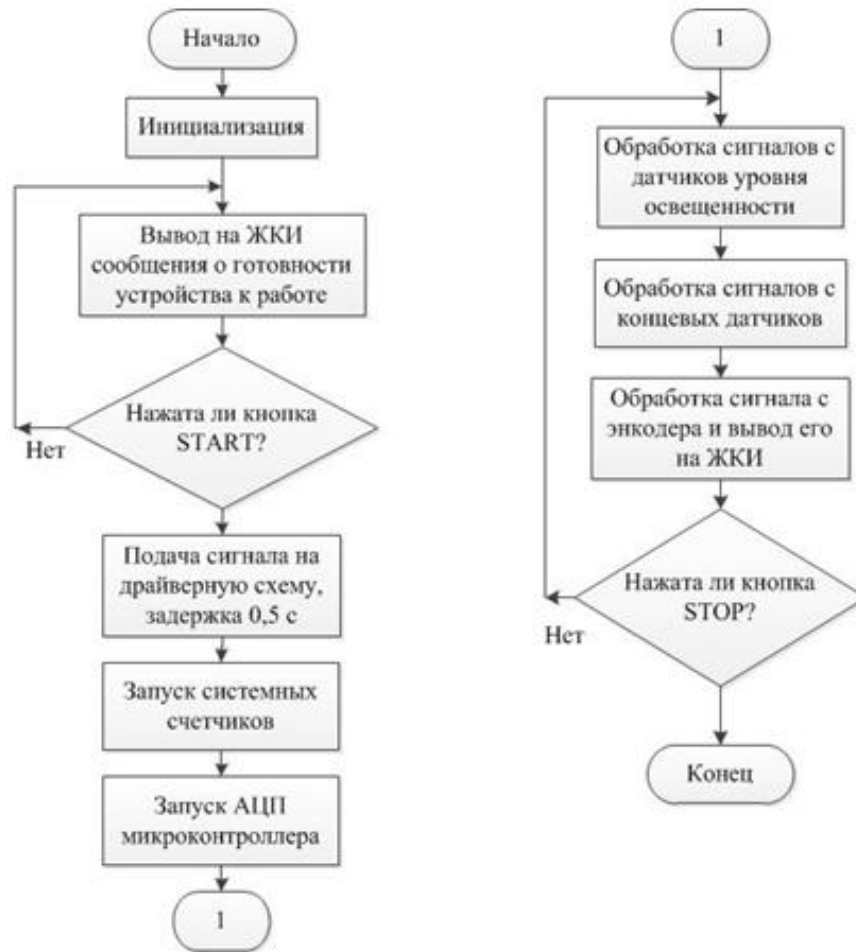


Рис.4.22. Алгоритм функціонування керуючої програми

Розкажемо процедуру обробки даних з датчиків рівня освітленості детальніше. Починаємо з читання сигналу з датчиків, що відповідають за обертання вздовж вертикальної осі (рис.4.23). Якщо показники датчиків рівні, то платформа орієнтована вірно вздовж вертикальної осі і відхилення становить менше  $10^\circ$ . Якщо показники датчиків відрізняються, то різниця в їх показаннях обчислюється, і мікроконтролер відправляє сигнал на привід вертикального обертання, що залежить від знаку різниці. Цей процес повторюється доти, доки різниця між показаннями датчиків не стане нулем. Потім ця процедура повторюється для горизонтальної площини з вертикальної пари датчиків, використовуючи таку ж саму схему (рис.4.24).

Коли різниця в показаннях обох датчиків не стане рівним нулю, процес наведення закінчується.

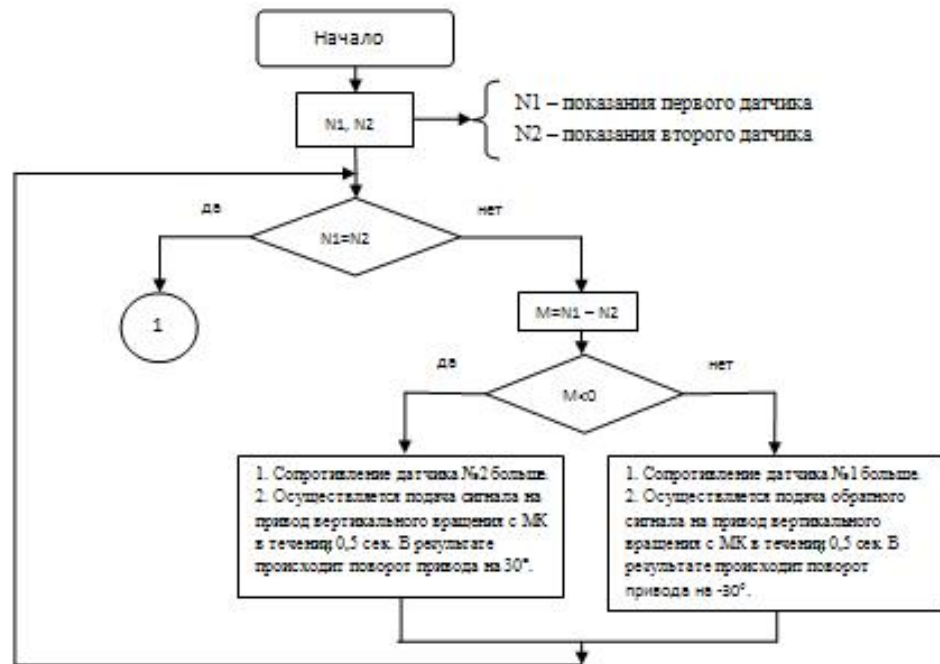


Рис.4.23. Алгоритм наведення пристрою в вертикальній площині

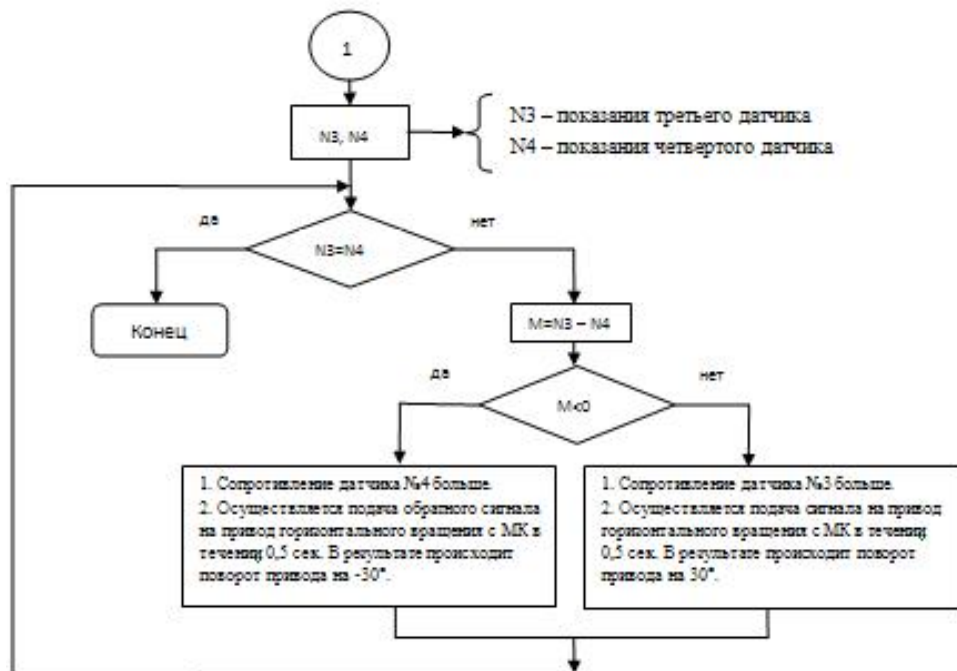


Рис.4.23. Алгоритм наведення пристрою в горизонтальній площині

### **Висновки до розділу:**

1. Була створена структурна схема приладу для відстеження Сонця на небосхилі.
2. Було розроблено модель автоматичного керування за допомогою програмного забезпечення MATLAB.
3. Була проведена оцінка стійкості цифрової системи.

## **ВИСНОВКИ**



У сучасному світі сонячна енергетика знаходить все більше застосування завдяки своїм перевагам, таким як максимальна простота використання, екологічна чистота та широке поширення. Ці чинники роблять її одним з найбільш перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики. У зв'язку з цим була виконана дипломна робота, метою якої було створення системи цифрового автоматичного управління сонячною батареєю. Для досягнення цієї мети було проведено детальний аналіз наявних конструкцій та їх недоліків, що дозволило запропонувати нову конструкцію сонячної установки та побудувати її функціональну схему.

Крім того, в рамках дослідження були проведені дослідження характеристик безперервної та дискретної систем управління, що були виконані з метою забезпечення стійкості дискретної системи. Для реалізації даної системи управління були відібрані необхідні компоненти, розроблена принципова схема та побудовані алгоритми управління.

Розроблена система автоматичного управління сонячною батареєю має великий потенціал для ефективного використання сонячної енергії та зменшення негативного впливу на довкілля.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

AADAT - Азимутально-висотні двоосеві трекери

DAT - Двоосеві трекери

HSAT - Горизонтальні одноосеві трекери

I2C - Інтерфейс зв'язку між інтегральними схемами

PSAT - Полярні одноосеві трекери

SAT - Одноосеві трекери

TTDAT - Двоосеві трекери зі зміщенням за кутом нахилу

TSAT - Наклонені одноосеві трекери  
VSAT - Вертикальні одноосеві трекери  
WHSAT - Горизонтальні одноосеві трекери на стіні  
АЦП - аналогово-цифровий перетворювач  
ІЕЕЕ - інститут інженерів з електротехніки та електроніки  
ККД - коефіцієнт корисної дії  
МК - мікроконтролер  
ОП - операційний підсилювач  
СЕС - сонячна електростанція  
СПБСП - система позиціонування блоку сонячних панелей  
САК - система автоматичного керування  
ЕП - електропривід  
ФЕМ - фотоелектричні модулі  
ФЕС - фотоелектрична станція

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Подольчук, Ю. В., Ящук, С. О., Селезньов, Ю. О., & Бреусенко, Н. Є. (2018). Визначення оптимального кута нахилу сонячних батарей на основі даних метеорологічних спостережень. Вісник НТУУ "КПІ". Енергетика: економіка, технології, екологія, (17), 18-26.
2. Микитюк, О. В. (2017). Дослідження впливу кута нахилу сонячних панелей на ефективність їх роботи. Енергетика та теплотехніка, (3), 44-49.

3. Максименко, Є. В. (2018). Визначення оптимальних кутів нахилу та орієнтації сонячних панелей в умовах України. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки, (2 (80)), 41-47.
4. Калиновський, О. О., Коваленко, О. М., & Рак, В. І. (2019). Визначення оптимального кута нахилу сонячних батарей методом розв'язання оптимізаційної задачі. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Фізика, (49), 20-27.
5. Бойко І. В. Мікропроцесори та мікроконтролери/ В. І. Бойко та ін. – К.: Вищашк., 2004. – 399 с.
6. Zhang, J., Zhao, J., & Xu, J. (2017). Optimal tilt angles for photovoltaic modules in Kunming, China. *Renewable Energy*, 109, 394-402.
7. Hasan, M. H., & Sopian, K. (2019). An optimal tilt angle for photovoltaic modules in Johor, Malaysia. *Energy Procedia*, 158, 5573-5579.
8. Prasad, A., & Tiwari, G. N. (2019). Optimal tilt angle of solar panels for maximum power generation in different regions of India. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(6), 063301.
9. Zhai, Y., Jiang, Y., Hu, X., & Zhang, S. (2020). A novel approach for determining optimal tilt angles of photovoltaic panels based on solar elevation angles. *Energy Conversion and Management*, 209, 112624.
10. Liu, Y., Li, J., & Wang, C. (2017). Determination of the optimal tilt angle for photovoltaic panels in Tibet, China. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(6), 064302.
11. Мороз, І. І., & Татарчук, В. П. (2019). Оптимізація позиціонування сонячних батарей на основі географічної інформації. Науковий вісник Львівського національного університету імені Івана Франка. Серія: Фізична, (56), 74-82.

12. Ліщинський, О. В., Коваленко, О. М., & Коваль, Є. М. (2019). Визначення оптимального кута нахилу сонячних батарей з використанням методів обробки даних дистанційного зондування Землі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (291), 147-153.
13. Гайдук, В. М., Лобода, О. О., & Печорін, В. П. (2018). Визначення ефективності роботи сонячних батарей за допомогою математичної моделі. Вісник Черкаського університету. Технічні науки, (5), 46-51.
14. Воробйов, О. І., Саган, В. М., & Власенко, С. В. (2021). Дослідження впливу орієнтації та нахилу сонячних батарей на ефективність їх роботи. Електронні технології та системи управління, (4(48)), 133-139.
15. Варченко, І. М., & Ігнатюк, А. А. (2017). Дослідження ефективності роботи сонячних батарей за різної орієнтації та нахилу. Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Електроенергетика та електромеханіка, (68), 94-100.
16. Huang, Y., Chen, S., & Song, Z. (2018). An optimal tilt angle for photovoltaic arrays based on solar radiation and panel temperature. Journal of Cleaner Production, 197, 1133-1143.
17. Su, X., Zhao, Y., Xue, X., & Zhu, Z. (2020). Optimal design of photovoltaic array inclination angle based on hybrid ant colony optimization algorithm. Renewable Energy, 150, 682-691.
18. Lee, S., Lee, J., & Kim, S. (2017). Optimal tilt angle of solar panels for a maximum annual yield in different latitudes and seasons in Korea. Applied Energy, 185, 872-882.
19. Al-Ajmi, K. (2019). Optimum tilt angle and azimuth angle for solar panels in Kuwait. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 11(5), 053301.

- 20.Мазур, Ю. С. (2019). Оптимізація кута нахилу сонячних батарей в умовах України. *Технічна електродинаміка*, (3), 24-27.
- 21.Alam, M. J., & Islam, M. T. (2017). Optimal tilt angle and orientation for solar collectors in Bangladesh. *Energy Procedia*, 105, 3247-3252.
- 22.Кондратюк, М. І., Губчак, Ю. В., & Малиш, Є. О. (2018). Моделювання процесів роботи сонячних батарей при різній орієнтації та нахилі. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Електроніка та телекомунікації*, (1), 68-72.
- 23.Shen, S., Wu, J., & Xie, J. (2019). Optimal inclination angles and orientations of photovoltaic modules for energy efficiency in China. *Energy Conversion and Management*, 180, 635-646.
- 24.Ільченко, В. М., & Кожушко, С. В. (2018). Моделювання роботи сонячних батарей на основі даних метеостанцій. *Наукові записки Інституту електродинаміки НАН України*, (4), 47-54.
- 25.Zhang, X., Chen, Z., & Li, X. (2020). A novel approach to determining the optimal tilt angle of photovoltaic panels based on the relationship between incident angle and solar radiation. *Energy Conversion and Management*, 211, 112783.
- 26.Li, Y., Li, B., Li, Y., & Li, S. (2018). An optimal tilt angle determination method for a photovoltaic panel based on genetic algorithm. *Energy*, 143, 986-994.
- 27.Гарбар, О. В., Манін, А. Г., & Петрів, В. М. (2017). Оптимізація позиціонування сонячних батарей з урахуванням геометрії об'єкта. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи*, (864), 48-53.

28. Філюк, І. І., & Карась, А. А. (2017). Аналіз позиціонування сонячних батарей з урахуванням хмарності. Електротехніка і електромеханіка, (2), 38-42.
29. Fang, G., & Wen, Y. (2020). Optimal tilt angle and azimuth angle for photovoltaic modules in Wuhan, China. *Renewable Energy*, 148, 1207-1216.
30. Zhang, Y., Lin, K., Zhu, Z., & Yuan, W. (2018). An intelligent optimization method for the optimal tilt angle of solar panels based on improved particle swarm optimization. *Energy Conversion and Management*, 171, 1632-1642.
31. Niu, Y., Yang, Z., Zhang, L., & Wang, M. (2019). Optimal inclination angle and orientation for photovoltaic panels using particle swarm optimization algorithm in Chengdu, China. *Energy Conversion and Management*, 198, 111797.
32. Al-Alawi, S. M., & Abdullatif, A. (2019). Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic panels in Oman. *Energy Procedia*, 158, 5566-5572.
33. Saad, A., Nofal, M., & El-Gohary, M. (2017). Optimal inclination angles and orientations for photovoltaic modules in Egypt. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(1), 013307.