

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра приладобудування

МАЛЬКО ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ

МОДЕЛЬ СОНЯЧНОГО ПОЗИЦІОНЕРА

Спеціальність 151 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:
Мешко Роман Олексійович
викладач

Ужгород – 2025

Ресстрація _____

(номер)

« ____ » _____ 2025 р. _____ Людмила ХАБІБУЛІНА

(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Ігор ЧИЧУРА

(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

(підпис)

(Ім'я, Прізвище)

_____ (науковий ступінь, вчене звання)

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра приладобудування
Спеціальність 151 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри
_____ (Ігор ЧИЧУРА)

«___» _____ 2025р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ**

Малько Василь Васильович

1. Тема кваліфікаційної роботи “Модель сонячного позиціонера” затверджена на засіданні кафедри приладобудування затверджені Розпорядженням по ІТФ № _____ від “___” _____ 20__ року № ____.
2. Строк подання здобувачем завершеної кваліфікаційної роботи: 12 червня 2025 р.
3. Аналізуються існуючі технічні рішення сонячних трекерів. Розглядаються пристрої, що входять до складу сучасних систем позиціонування: контролери, сенсорні модулі на фоторезисторах, привідні механізми на сервоприводах. Основні параметри та характеристики системи встановлюються у процесі розробки.
4. Зміст пояснювальної записки
Вступ, аналіз існуючих технічних рішень, розробка електричної принципової схеми, розробка програмного забезпечення системи позиціонування.
5. Перелік графічного матеріалу
Електрична принципова схема
6. Консультації розділів роботи

Розділ	Прізвище та ініціали консультанта	Завдання видав		Завдання прийняв	
		Підпис	Дата	Підпис	Дата

6. Дата видачі завдання: “___” лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Найменування етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	До 3/03/25	
2	Пошук на аналіз об'єктів дослідження	До 17/03/25	
3	Вибір елементів соняного позиціонера	До 12/04/25	
4	Розробка структурної та принципової схеми	До 30/04/25	
5	Розробка алгоритму та програмного забезпечення	До 12/05/25	
6	Оформлення текстової частини	До 10/06/25	

Здобувач освіти

(підпис)

Василь МАЛЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Роман МЕШКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

Вступ	6
1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ	4
1.1 Актуальність проблеми сонячного позиціонування	5
1.2 Область застосування: побут, агро-, промисловий сектор	6
1.3 Переваги та недоліки орієнтованих систем	7
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО СЛІДУВАННЯ ...	9
2.1 Класифікація: пасивні та активні трекари	10
2.2 Одновісні та двохвісні системи: особливості конструкції	12
2.3 Порівняльний аналіз типів трекерів	13
2.4 Аналіз готових рішень та обґрунтування власного підходу	15
3 ПРОЄКТУВАННЯ ВЛАСНОЇ СИСТЕМИ	16
3.1 Вибір елементної бази	16
3.2 Архітектура системи позиціонування	19
3.3 Світлочутливий модуль	20
3.4 Електрична схема проєкту	22
3.5 Алгоритм функціонування та код програми	23
Висновки	32
Список використаних джерел	33
Додаток А. Код програми	34

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Сонячний позиціонер Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	Малько В.В.					У	2	40
Перевірив	Мешко Р.О.					УжНУ, ІТФ, 4 курс, денна форма		
Т. контр.								
Н.Контр.	Рябошук М.М							
Затвердив	Чичура І.І.							

ВСТУП

Сонячна енергія є одним із найперспективніших напрямів у сфері відновлюваних джерел енергії. З огляду на зростання попиту на екологічно чисту енергію та необхідність зниження залежності від викопних ресурсів, інтерес до ефективного використання фотомодулів постійно зростає. Одним із важливих напрямів підвищення ефективності сонячних енергетичних систем є застосування технологій стеження за положенням Сонця.

Сонячний позиціонер — це технічне рішення, що забезпечує динамічне орієнтування сонячних панелей під оптимальним кутом до сонячного світла. Завдяки цьому зменшуються втрати енергії через нерівномірне освітлення, а вихідна потужність системи зростає. У даній роботі розглянуто реалізацію активного сонячного трекера, побудованого на базі мікроконтролерної платформи Arduino з використанням фоторезисторів як світлочутливих сенсорів.

Застосування Arduino дозволяє гнучко реалізувати алгоритми стеження, а також спрощує структуру керування системою. Конструкція пристрою передбачає автоматичну зміну положення сонячної панелі відповідно до інтенсивності світла, що фіксується сенсорами. Такий підхід дозволяє покращити загальну ефективність генерації енергії впродовж світлового дня без втручання користувача.

Описана система є доступною для виготовлення, має невисоку вартість і потенційно може бути впроваджена як у побутових умовах, так і в невеликих автономних енергетичних установках.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ

У сучасних умовах стрімкого зростання споживання енергії питання пошуку ефективних, екологічно чистих та відновлюваних джерел набуває все більшої актуальності. Сонячна енергія, як одна з найбільш доступних і безпечних форм відновлюваної енергії, має значний потенціал для широкого застосування як у промисловості, так і в побуті.

Незважаючи на постійне вдосконалення конструкцій сонячних модулів, їх ефективність все ще значною мірою залежить від кута падіння сонячного світла. Статично закріплені панелі мають фіксований кут нахилу, що не дозволяє максимально ефективно використовувати енергію Сонця впродовж дня. Ця проблема особливо відчутна в умовах змінного положення сонця на небосхилі, а також за сезонних змін.

Одним із дієвих рішень цієї задачі є впровадження систем автоматичного стеження за Сонцем — сонячних позиціонерів (або трекерів). Такі системи забезпечують постійне орієнтування фотомодуля під оптимальним кутом до сонячного випромінювання, що дозволяє підвищити ефективність перетворення енергії на 20–40% залежно від реалізації та умов експлуатації.

Обрана тема роботи передбачає дослідження, аналіз та розробку прототипу активного сонячного трекера з використанням доступних електронних компонентів. Зокрема, увага приділяється створенню системи на базі мікроконтролера Arduino, що дозволяє реалізувати автоматичне керування положенням панелі в просторі відповідно до рівня освітленості, зафіксованого світлочутливими елементами.

У роботі також розглянуто існуючі типи трекерів — активні, пасивні, одновісні та двохвісні — з метою аналізу їхньої ефективності, складності реалізації та доцільності використання в конкретних умовах. Це дозволяє обґрунтувати вибір технічного рішення, запропонованого в межах проекту, та його перспективність для подальшого застосування.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

Таким чином, тема бакалаврської роботи є актуальною, науково та практично обґрунтованою, а поставлене завдання — досяжним з використанням сучасних засобів мікроелектроніки, моделювання та програмування.

1.1 Актуальність проблеми сонячного позиціонування

Після повномасштабного вторгнення Росії у 2022 році енергетична система України зазнала серйозних руйнувань і продовжує функціонувати в умовах підвищеного ризику та нестабільності. Внаслідок обстрілів критичної інфраструктури особливо актуальним стало питання створення децентралізованих джерел живлення, здатних забезпечувати електроенергією об'єкти без прив'язки до централізованої мережі. У цьому контексті відновлювані джерела енергії, зокрема сонячна енергетика, відіграють усе важливішу роль.

Встановлення сонячних панелей дає змогу частково або повністю забезпечити потреби в електроенергії для приватних господарств, комунальних об'єктів, польових лабораторій, медичних пунктів тощо. Проте ефективність таких систем значною мірою залежить від правильного орієнтування панелей до Сонця. Статичні конструкції забезпечують максимальну продуктивність лише у певний період доби, тоді як автоматизовані системи стеження (трекери) дозволяють значно збільшити вироблення енергії, особливо в умовах частково обмеженого освітлення.

Особливості Закарпатської області, зокрема Ужгородського району, створюють як сприятливі, так і обмежувальні умови для впровадження сонячної енергетики. З одного боку, в регіоні високий рівень інсоляції — понад 1800–2000 сонячних годин на рік — а кліматичні умови забезпечують стабільну генерацію енергії впродовж усього теплого сезону. З іншого боку, горбистий рельєф, наявність лісистих ділянок та тінєвих зон створюють умови, за яких фіксовані панелі працюють неефективно. У таких випадках саме сонячні позиціонери, здатні адаптуватися до зміни положення Сонця, стають оптимальним рішенням.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1.2 Сфери застосування сонячних позиціонерів

Сонячні трекери, або позиціонери, знаходять застосування в широкому спектрі галузей, де важливо забезпечити максимальну ефективність перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Основною перевагою таких систем є їх здатність адаптувати орієнтацію фотомодулів відповідно до положення Сонця протягом дня, що дозволяє отримувати більше енергії без зміни площі панелі чи її потужності.

Однією з ключових сфер застосування є автономні системи електропостачання. У воєнний час та за умов дефіциту електроенергії саме незалежні джерела живлення дозволяють підтримувати роботу базових інфраструктур — телекомунікацій, медичних закладів, пунктів обігріву, освітлення тощо. Сонячні позиціонери забезпечують значно вищу продуктивність автономних систем, особливо в умовах, коли площа встановлення обмежена.

У сільському господарстві сонячні позиціонери забезпечують живлення для автоматизованих систем зрошення, метеостанцій, датчиків вологості ґрунту та іншої електроніки в полі, де централізоване живлення відсутнє. Надійна робота таких систем протягом усього світлового дня — критично важлива для ефективного агровиробництва.

Крім того, системи трекінгу активно застосовуються в наукових дослідженнях, експериментальних установах, мобільних лабораторіях, туристичних або воєнних умовах, де необхідне надійне автономне джерело енергії. Вони можуть бути використані у польових експедиціях, для заряджання акумуляторів, живлення електроніки, зв'язку тощо.

Таким чином, сонячні позиціонери є універсальними рішеннями, які можуть застосовуватись у багатьох сферах — від побутових до стратегічних. Їх доступність, простота реалізації та енергетична ефективність роблять їх особливо привабливими в умовах України, де енергетична стабільність є критичним фактором безпеки й розвитку.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1.3 Переваги та недоліки орієнтованих систем

Використання сонячних позиціонерів є ефективним способом підвищення продуктивності фотоелектричних систем, хоча, як і будь-яке технічне рішення, воно має як свої переваги, так і певні обмеження.

Однією з основних переваг застосування трекерів є помітне збільшення енерговіддачі сонячних панелей. Завдяки можливості орієнтації фотомодулів відповідно до поточного положення Сонця протягом дня, система забезпечує значно ефективніше використання сонячної енергії порівняно з фіксованими конструкціями. За даними багатьох досліджень, приріст виробленої енергії становить у середньому від 20 до 40 відсотків, залежно від географічного розташування, пори року та умов інсоляції.

Особливо актуальною є ця технологія для регіонів зі складними умовами освітлення, наприклад, у гірських або лісистих зонах Закарпаття, де часткове затінення, рельєфна місцевість та мінливі погодні умови можуть значно знижувати ефективність роботи стаціонарних панелей. Динамічне регулювання кута нахилу дозволяє мінімізувати негативний вплив тіней та забезпечувати більш стабільну генерацію енергії навіть при нерівномірному розподілі сонячного випромінювання протягом дня.

Ще однією перевагою є автономність таких систем. Використання мікроконтролерів, наприклад, на базі Arduino, дозволяє створювати повністю автоматизовані рішення, які не потребують постійного втручання оператора та можуть працювати на віддалених або важкодоступних об'єктах. Це особливо важливо для приватних домогосподарств, автономних господарств, віддалених станцій зв'язку чи промислових об'єктів.

Сонячні трекери також мають велику гнучкість щодо масштабування: їх можна ефективно застосовувати як у невеликих побутових системах, так і на великих промислових фермах. Це дозволяє забезпечити максимально ефективне використання доступних площ, що є актуальним при обмежених земельних ресурсах або при високій вартості землі. Навіть на невеликій площі за допомогою

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

трекерів можна досягти максимальної продуктивності, що знижує потребу в додаткових інвестиціях у додаткові модулі.

Втім, попри всі ці переваги, сонячні позиціонери мають і низку обмежень, які потрібно враховувати під час проектування та експлуатації. Насамперед, варто зазначити, що конструкція трекера складніша, ніж у фіксованих систем. Наявність рухомих механічних елементів, сервоприводів, моторів та електронних блоків керування збільшує кількість потенційних точок відмови, що потребує більшої уваги до обслуговування й періодичного контролю справності системи.

Крім того, стартові витрати на впровадження трекерної системи є вищими у порівнянні з фіксованими установками. Хоча в довгостроковій перспективі додаткове енергогенерування може компенсувати ці витрати, для частини споживачів початкові інвестиції залишаються бар'єром. Варто також враховувати вплив навколишнього середовища на довговічність та точність роботи системи: сильний вітер, опади, обмерзання та забруднення можуть спричинити додаткові навантаження на механіку та призводити до прискореного зносу елементів.

Ще одним важливим аспектом є енергоспоживання самих приводів, особливо в системах із частим переміщенням. Хоча сучасні енергоощадні алгоритми керування мінімізують цей фактор, певна частина виробленої енергії все ж витрачається на забезпечення роботи самої системи позиціонування.

Окрім цього, для досягнення максимальної ефективності трекера необхідна його точна початкова калібровка з урахуванням географічних координат, орієнтації місцевості, сезонних змін положення Сонця та багатьох інших параметрів. Неправильне налаштування системи може звести нанівець її переваги.

Таким чином, впровадження сонячних позиціонерів потребує зваженого підходу до оцінки їхньої доцільності, однак при грамотному проектуванні та обслуговуванні вони здатні забезпечити значне підвищення енергоефективності сонячних фотоелектричних установок.

2.1 Класифікація: пасивні та активні трекери

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Системи позиціонування сонячних панелей є ключовими технологіями у підвищенні ефективності роботи фотоелектричних установок. Завдяки зміні положення панелей у просторі, такі системи дозволяють орієнтувати фотомодулі відповідно до положення Сонця протягом дня та року, що забезпечує максимальне використання сонячної енергії та підвищення обсягів генерованої електроенергії. За принципом роботи системи позиціонування поділяються на активні та пасивні.

В межах даного проекту було обрано активну систему позиціонування, яка забезпечує високу точність орієнтації панелей на Сонце завдяки застосуванню керованих приводів. Активні трекери отримують енергію для приводу рухомих елементів із зовнішніх джерел живлення, що дозволяє динамічно змінювати положення панелі для максимізації виробітку електроенергії. Основними видами активних систем є сенсорні та алгоритмічні трекери, кожен з яких має свої особливості роботи та специфіку використання.

Сенсорні активні трекери здійснюють орієнтацію панелі на основі безпосереднього вимірювання інтенсивності сонячного світла. Зазвичай застосовуються кілька світлочутливих елементів, як-от фоторезистори, які встановлюють у хрестоподібній конфігурації. Кожен із фоторезисторів реєструє рівень освітленості з певного напрямку. Коли панель відхиляється від положення оптимального захоплення сонячного світла, фіксується різниця між сигналами з різних фоторезисторів. Контролер аналізує ці дані та подає команду на відповідні приводи, коригуючи положення панелі доти, поки освітлення не стане симетричним. Такий підхід відзначається простотою реалізації, низькою вартістю компонентів та можливістю оперативного реагування на локальні зміни умов освітлення, зокрема на появу часткових затінь. Однак при похмурій погоді, коли світло розсіюється в атмосфері й втрачається чіткий напрямок, точність роботи сенсорної системи помітно знижується.

Алгоритмічні активні трекери функціонують за іншою методикою: замість вимірювання світлового потоку вони розраховують точне положення Сонця на основі астрономічних моделей. В основі таких розрахунків лежать точні математичні алгоритми, зокрема Solar Position Algorithm (SPA), які з урахуванням

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

широти, довготи, дати, часу доби, а також ряду астрономічних параметрів визначають поточне місцеположення Сонця на небосхилі. Мікроконтролер, використовуючи ці дані, керує роботою приводів і забезпечує точну орієнтацію панелі упродовж усього світлового дня. Цей підхід дозволяє досягти високої точності стеження незалежно від погодних умов. Однак для його реалізації необхідні додаткові технічні рішення: система точного часу (наприклад, синхронізація через GPS), більш складне програмне забезпечення, а також попереднє точне калібрування установки.

З конструктивної точки зору активні трекери поділяють на одновісні та двовісні системи. Одновісні трекери дозволяють панелям обертатися навколо однієї осі, зазвичай орієнтованої у напрямку північ–південь. Це дозволяє ефективно відстежувати добовий рух Сонця зі сходу на захід, що забезпечує приріст генерації енергії в межах 20–35% у порівнянні зі стаціонарними панелями. Одновісні системи мають простішу конструкцію, меншу кількість рухомих елементів, вимагають менших витрат на виготовлення та обслуговування. Проте вони не враховують зміну висоти Сонця впродовж року, що дещо знижує їхню ефективність у зимові періоди чи в регіонах із високими амплітудами сезонних змін.

Двовісні трекери, на відміну від одновісних, забезпечують обертання панелі як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах. Це дає змогу постійно підтримувати перпендикулярне положення панелі відносно сонячних променів незалежно від пори року та часу доби. Завдяки цьому двовісні системи демонструють максимальні показники ефективності, забезпечуючи приріст генерації енергії до 30–50%. Однак складна конструкція, більша кількість рухомих з'єднань, потреба в точному координуванні роботи приводів, підвищене енергоспоживання системи та вища вартість ускладнюють їхню широкомасштабну реалізацію, особливо у малих побутових проектах.

Окремий інтерес становлять пасивні системи позиціонування, які діють без застосування електроніки та зовнішніх джерел живлення. Принцип їх роботи ґрунтується на фізичних процесах — зокрема, використовується різниця нагріву спеціальних газових камер, розташованих з обох боків панелі. При нагріванні

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Сонцем одна з камер розширює газ, створюючи тиск, який зсуває центр ваги і спричиняє поворот панелі у напрямку більшої освітленості. Пасивні трекери прості у виготовленні, енергонезалежні та не потребують складного технічного обслуговування, однак вони демонструють меншу точність позиціонування, особливо при змінних погодних умовах чи слабкій інсоляції.

Загалом вибір між активною чи пасивною системою, а також визначення типу активного трекера — сенсорного чи алгоритмічного, одновісного чи двовісного — визначається конкретними умовами проекту: доступним бюджетом, кліматичними особливостями місцевості, географічними координатами, масштабами запланованої електростанції та необхідною точністю стеження. Рационально підібрана система позиціонування здатна значно підвищити енергоефективність сонячної установки і забезпечити оптимальну окупність інвестицій упродовж її експлуатаційного циклу.

2.2 Одновісні та двохвісні системи: особливості конструкції

Системи позиціонування сонячних панелей поділяються на одновісні та двовісні залежно від кількості ступенів свободи, тобто напрямів, у яких панель може змінювати своє положення для оптимальної орієнтації відносно Сонця. Вибір типу трекера значною мірою визначає складність системи, її ефективність, вартість виготовлення та обслуговування, а також доцільність застосування у конкретних кліматичних і географічних умовах.

Одновісні трекери: конструктивні особливості та сфера застосування

Одновісні системи позиціонування забезпечують обертання панелей навколо однієї осі. Найчастіше така вісь орієнтується у напрямку північ-південь, а обертання відбувається у площині схід-захід, що дозволяє відстежувати добовий рух Сонця з моменту його сходу до заходу. За такого підходу максимізується захоплення сонячної радіації протягом дня, особливо у літній період, коли траєкторія Сонця має майже симетричну дугу.

Конструктивно одновісні системи є відносно простими. Їхня механічна частина зазвичай включає опорну раму, центральну несучу вісь,

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

електромеханічний привід (двигун постійного струму, сервомотор або актуатор), редуктор, систему підшипників і амортизаторів. Керування положенням панелі здійснюється за допомогою контролера, який отримує сигнали або з сенсорів, або на основі алгоритмічного розрахунку положення Сонця. Завдяки меншій кількості рухомих вузлів знижується ймовірність механічних відмов, а також спрощується технічне обслуговування системи.

Одновісні трекери особливо доцільні у регіонах, де зміна висоти Сонця протягом року є менш значною, наприклад, у низьких широтах або в областях з відносно стабільною сонячною траєкторією. В умовах середніх широт такі системи все одно забезпечують суттєве збільшення генерації — зазвичай приріст становить близько 20–35% у порівнянні з фіксованими установками.

Разом з тим, ключовим обмеженням одновісних трекерів є їхня нездатність адаптуватися до сезонних змін висоти Сонця над горизонтом. У зимовий період, коли Сонце піднімається низько, кут падіння променів суттєво відрізняється від оптимального, що призводить до зниження ефективності роботи системи у холодні місяці.

Двовісні трекери: конструктивна складність та переваги точного стеження

Двовісні системи позиціонування забезпечують можливість змінювати положення панелей у двох площинах — горизонтальній (азимутальній) та вертикальній (альтиметричній). Завдяки цьому панель може постійно залишатися орієнтованою перпендикулярно до сонячних променів не лише впродовж добового циклу, а й упродовж усього року незалежно від зміни висоти Сонця над горизонтом. Це дозволяє досягти максимальної ефективності генерації електроенергії — за оптимальних умов приріст потужності може сягати 30–50% порівняно зі стаціонарними конструкціями.

Конструкція двовісних трекерів значно складніша. До складу системи входять два незалежних приводи для керування кожною віссю обертання, складна механічна рама, система датчиків положення, а також високоточна електронна система керування. Часто застосовуються крокові двигуни, високоточні енкодери, потужні контролери з попередньо закладеними математичними моделями астрономічних розрахунків (наприклад, алгоритм SPA). Для забезпечення

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

стійкості в умовах сильних вітрових навантажень рама має бути підсиленою, із додатковими елементами жорсткості. З урахуванням складності механіки та електроніки, двовісні системи потребують регулярного технічного обслуговування, а також значно вищих інвестицій у виробництво й монтаж.

Особливо ефективними двовісні трекери є у високих широтах, де висота Сонця змінюється дуже суттєво протягом року, а також у регіонах із тривалими зимами, де підтримання оптимального кута нахилу дозволяє значно покращити загальний річний баланс енерговиробництва. Крім того, вони доцільні у проектах, де площа встановлення є обмеженою, але ставиться завдання досягти максимальної генерації з одиниці площі.

Втім, крім високої вартості та конструктивної складності, недоліками двовісних систем є й підвищені енергетичні витрати на приведення у дію системи впродовж експлуатації, більший знос деталей через часті рухи, а також чутливість до зовнішніх впливів — сильний вітер, сніг, обмерзання можуть створювати додаткові навантаження на рухомі вузли.

Порівняльна характеристика

Узагальнюючи, можна відзначити, що вибір між одновісними та двовісними системами позиціонування залежить від низки факторів: кліматичних умов, широти розташування об'єкта, бюджету проекту, наявних технологічних можливостей та пріоритетів замовника. Одновісні трекери є більш бюджетним і простим варіантом, що забезпечує помітне підвищення ефективності при помірних витратах. Двовісні ж системи є оптимальними з точки зору максимальної продуктивності, однак вимагають більших витрат на впровадження, обслуговування та контроль.

2.3 Порівняльний аналіз типів трекерів

При виборі оптимальної системи сонячного стеження важливо враховувати не лише базову функціональність, а й цілий комплекс параметрів, які впливають на ефективність роботи установки в реальних умовах. Розглянемо докладніше

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

переваги та обмеження основних типів трекерів — пасивних, активних фотоелектричних та активних астрономічних.

Таблиця 2.1 Порівняння характеристик

Тип трекера	Точність наведення	Складність конструкції	Енергоспоживання	Вартість виготовлення	Надійність
Пасивний	Низька	Низька	Відсутнє	Низька	Середня
Активний фотоелектричний	Середня	Середня	Середнє	Середня	Вища
Активний астрономічний	Висока	Висока	Відносно низьке	Вища	Висока

Пасивні трекери відрізняються найпростішою конструкцією. Їхня робота ґрунтується на фізичних властивостях матеріалів, які змінюють свій стан під дією сонячного випромінювання. Наприклад, часто застосовують дві порожні камери, заповнені газом або рідиною, які нагріваються з різною інтенсивністю залежно від положення Сонця. Різниця в тиску спричиняє переміщення механізму в бік більшого нагріву. Головна перевага таких систем полягає у відсутності необхідності в електроживленні та складних електронних вузлах. Це робить їх дешевими, простими в обслуговуванні й надійними в умовах віддалених об'єктів, де доступ до електрики обмежений. Однак ці переваги супроводжуються низкою серйозних обмежень. Насамперед — це невисока точність наведення, оскільки робота системи залежить від прямих сонячних променів, і в умовах хмарності, туману або сильного вітру її ефективність різко знижується. Пасивна система не реагує на зміну висоти Сонця протягом року, що знижує загальну ефективність енергозбору, особливо в регіонах з вираженою сезонною зміною сонячної траєкторії.

Активні фотоелектричні трекери є більш досконалим і гнучким рішенням. Вони використовують світлочутливі датчики (фоторезистори, фотодіоди), що реагують на різницю освітленості з різних боків панелі. Система постійно аналізує сигнали сенсорів і коригує положення панелі в реальному часі. Такий підхід дозволяє досягти значно вищої точності наведення, оскільки навіть невелике відхилення від оптимальної орієнтації одразу фіксується та

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

виправляється. Це особливо важливо в умовах, коли кожен додатковий відсоток зібраної енергії має економічне значення. Водночас подібні системи мають свої слабкі сторони. Вони потребують постійного електроживлення, а також регулярного технічного обслуговування: забруднення або обледеніння сенсорів можуть призвести до помилкових сигналів, а часті дрібні рухи механізмів прискорюють їх зношування. Крім того, в умовах розсіяного освітлення, наприклад при хмарності, система може реагувати некоректно, іноді здійснюючи зайві рухи.

Активні астрономічні треки є найсучаснішим варіантом із представлених систем. Їх принцип роботи базується на попередньо розрахованих положеннях Сонця згідно із заданими географічними координатами, часом доби та календарною датою. Всі обчислення проводяться програмно, що дозволяє системі заздалегідь знати, в якому саме положенні має перебувати панель у будь-який момент часу. Такий підхід практично усуває проблему хибних сигналів під час хмарності чи при розсіяному освітленні, оскільки система не орієнтується на інтенсивність світла, а працює за заздалегідь визначеним астрономічним алгоритмом. Результатом є висока точність наведення, стабільна робота упродовж усього року, а також менше механічне зношування, оскільки коригування положення панелей відбувається поступово, без зайвих дрібних рухів. Недоліком таких систем є їхня технологічна складність: необхідність точного годинника, високої надійності програмного забезпечення, а також дорожчих компонентів керування. Вартість впровадження астрономічних трекерів вища, однак вона компенсується їх стабільною роботою в широкому діапазоні погодних умов і довготривалою експлуатацією без потреби частого обслуговування.

З огляду на кліматичні особливості Закарпатської області, де можуть бути тривалі періоди хмарності, часті опади, значні сезонні зміни кута піднесення Сонця, найбільш доцільним є використання саме активних астрономічних трекерів. Вони забезпечують найвищу стабільність виробітку енергії впродовж року, знижують потребу у втручанні оператора та дозволяють максимально ефективно використовувати потенціал сонячної енергетики навіть у несприятливих погодних умовах. Водночас, для реалізації невеликих навчальних,

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

експериментальних або бюджетних проєктів активні фотоелектричні трекери залишаються актуальними завдяки простоті налаштування, доступній вартості та гарній демонстраційній наочності роботи.

2.4 Аналіз готових рішень та обґрунтування власного підходу

На сучасному ринку представлений широкий спектр рішень у сфері сонячного стеження, починаючи від найпростіших аматорських пристроїв до високотехнологічних промислових комплексів. Кожен із цих варіантів має свої характерні особливості, переваги та обмеження, які визначають доцільність їх застосування в конкретних умовах. Проведемо детальний аналіз основних типів готових рішень з огляду на можливість використання в побутових, аграрних і малих підприємницьких системах.

Готові комерційні рішення

Однією з найбільш розвинених категорій є промислові трекери, які пропонують провідні світові виробники, зокрема компанії NEXTracker, Array Technologies та інші. Такі системи зазвичай представлені як одновісними, так і двохвісними моделями, що дозволяє максимально точно відслідковувати рух Сонця протягом доби та року. Вони розраховані на значні навантаження, підтримують великі площі сонячних панелей, а також забезпечують інтеграцію з централізованими системами моніторингу і віддаленого керування, що дозволяє оперативно контролювати ефективність роботи установки.

Основною перевагою таких рішень є висока надійність, перевірена експлуатацією в різних кліматичних умовах, довготривалий ресурс роботи та ефективна адаптація до змінних погодних умов. Завдяки продуманим конструктивним рішенням вони забезпечують стабільно високий рівень генерації електроенергії при мінімальних втратах, викликаних відхиленням панелей від оптимального положення.

Разом з тим, подібні системи мають і суттєві недоліки, які ускладнюють їх застосування в малому бізнесі чи приватному секторі. Насамперед — це висока вартість обладнання та монтажних робіт. До того ж, габаритність конструкцій

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

потребує великих майданчиків для встановлення, що часто є недосяжним у приватних чи фермерських господарствах. Монтаж і обслуговування таких систем потребують кваліфікованого персоналу, а модернізація чи адаптація до нестандартних завдань є складною й затратною.

Аматорські рішення

Окрему групу складають аматорські системи, що збираються ентузіастами на основі доступних мікроконтролерів — зокрема, популярних платформ Arduino чи ESP32. Такі комплекти часто комплектуються фотоелектричними датчиками, сервоприводами малого розміру (типу SG90 або MG996R) та простими електронними модулями керування. Їхня головна перевага — доступна вартість, простота складання, широкі можливості для навчання й експериментів, а також гнучкість у зміні конфігурації та програмних алгоритмів.

Однак такі системи мають і обмеження, які стримують їх широке практичне застосування в довготривалих проектах. Насамперед це невисока точність наведення в умовах змінної хмарності та розсіяного світла, оскільки фотоелектричні датчики часто реагують на локальні неоднорідності освітлення (наприклад, хмари, тіні від дерев чи будівель), що може викликати некоректне позиціонування. Крім того, аматорські приводи мають обмежений механічний ресурс, а відсутність повноцінних систем захисту іноді призводить до передчасних відмов обладнання.

Обґрунтування власного підходу

У рамках даної дипломної роботи запропоновано власний варіант активного трекера з використанням фоторезистивних сенсорів, мікроконтролера та оптимізованої системи керування. Основною особливістю розробленої системи є поєднання простоти апаратної частини з покращеними алгоритмами обробки даних, що дозволяють ефективно працювати навіть при частковій хмарності.

Принцип роботи системи базується на постійному скануванні положення Сонця шляхом порівняння показників освітленості з декількох фоторезистивних датчиків, розташованих під різними кутами до горизонту. При цьому реалізовано додаткові програмні фільтри, які згладжують короткочасні коливання показників через появу хмар чи незначних затінь, дозволяючи уникнути зайвих

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

помилкових рухів. Завдяки цьому система утримує панелі у положенні максимальної яскравості без частих коливань, що суттєво знижує знос приводів та покращує надійність конструкції.

Крім того, застосування нескладних сервоприводів у поєднанні з доступними мікроконтролерними платформами дозволяє зберегти невисоку загальну вартість проекту, що є критично важливим для побутового застосування чи малих підприємств, зокрема в аграрному секторі. Простота складання та обслуговування робить систему зручною в експлуатації навіть для користувачів без глибоких технічних знань.

Таким чином, запропонована конструкція поєднує в собі переваги активного стеження з відносною простотою реалізації, забезпечуючи високий рівень енергоефективності за умов невеликих фінансових витрат. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати сонячні треки в домашніх господарствах, на невеликих фермах чи для малих бізнес-проектів, де особливо важливо досягати оптимального співвідношення між вартістю системи та її продуктивністю.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

3 ПРОЄКТУВАННЯ ВЛАСНОЇ СИСТЕМИ

У сучасних умовах розвитку альтернативної енергетики проектування систем сонячного стеження набуває особливої актуальності, оскільки дає змогу значно підвищити ефективність використання сонячних панелей та забезпечити стабільний і передбачуваний рівень генерації електроенергії протягом усього року. Від правильного підбору апаратної бази, оптимальної конструкції та ефективного програмного забезпечення безпосередньо залежить загальний ККД системи, її надійність, строк служби, простота експлуатації та економічна доцільність впровадження.

У цьому розділі детально розглядається процес створення власної системи активного сонячного стеження, розробленої в межах даної дипломної роботи. Основна увага приділяється поєднанню доступних, недорогих комплектуючих із застосуванням ефективних алгоритмів керування для досягнення високої точності наведення при збереженні загальної простоти системи. Такий підхід дозволяє отримати конкурентоспроможне рішення, яке можна використовувати як у побутових умовах, так і в малому фермерському господарстві чи в навчальних цілях.

Першочерговим завданням при проектуванні стало створення системи, здатної працювати в умовах змінної освітленості, характерної для Закарпатського регіону, де нерідко спостерігається чергування сонячних та хмарних днів, а також часті тумани та опади. Це потребувало особливої уваги до точності роботи сенсорної частини, стабільності живлення та продуманості алгоритмів керування сервоприводами, які виконують позиціонування.

У межах роботи буде розглянуто принципи роботи основних функціональних блоків системи: блоку світлочутливих сенсорів, які здійснюють фіксацію рівня освітленості в різних напрямках; мікроконтролера Arduino, який виконує обробку даних, прийняття рішень і формування керуючих сигналів; а також сервоприводів, що безпосередньо змінюють положення сонячної панелі відповідно до отриманих команд.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Окрім апаратної частини, значну роль у стабільній роботі системи відіграє програмне забезпечення. Воно забезпечує не лише обробку даних із сенсорів, але й оптимізацію роботи приводів, захист від хибних спрацювань у разі короткочасних змін освітленості, а також адаптацію до різних режимів роботи залежно від погодних умов.

Далі у розділі буде послідовно представлено кожен з етапів проєктування системи, обґрунтовано вибір компонентів, подано структурну та електричну схему з'єднання елементів, описано логіку роботи програмної частини та наведено ключові особливості алгоритмів, що забезпечують точність наведення і стабільність роботи розробленого сонячного позиціонера.

3.1 Вибір елементної бази

На етапі розробки системи активного сонячного позиціонування особливу увагу було приділено вибору апаратної частини, яка забезпечувала б належний рівень функціональності, точності, стабільності та зручності у програмуванні. Основою системи складає мікроконтролерна плата Arduino Nano, яка виступає центральним обчислювальним і керуючим вузлом усієї системи.

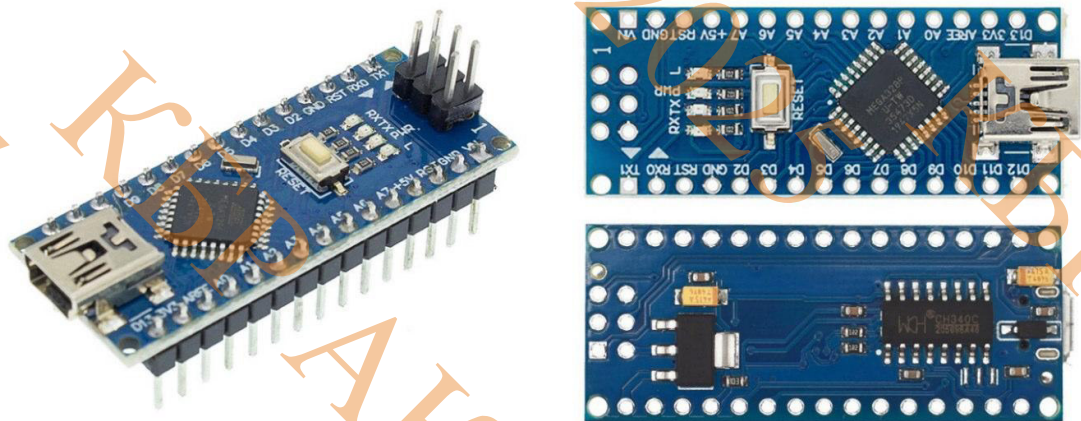


Рисунок 3 – Arduino Nano

Arduino Nano базується на мікроконтролері ATmega328P, що поєднує у собі достатню обчислювальну потужність і низьке енергоспоживання. Плата має

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

компактні розміри — лише 18 x 45 мм, що дає змогу зручно розміщувати її в обмежених просторових умовах конструкції трекера, не ускладнюючи компонування всієї системи. Незважаючи на невеликі габарити, Arduino Nano пропонує широкий набір функціональних можливостей, необхідних для реалізації складних алгоритмів позиціонування.

Система керування сервоприводами вимагає формування широтно-імпульсних сигналів, для чого Arduino Nano надає 14 цифрових входів/виходів, з яких 6 можуть працювати в режимі широтно-імпульсної модуляції (PWM). Завдяки цьому можливо забезпечити точне й плавне керування виконавчими механізмами, що здійснюють зміну положення сонячної панелі у просторі. Для роботи зі світлочутливими датчиками необхідна можливість обробки аналогових сигналів — Arduino Nano містить 8 аналогових входів, які дозволяють здійснювати високоточні вимірювання рівня освітленості з фоторезисторів, розташованих у сенсорному блоці.

Швидкість роботи системи забезпечується тактовою частотою 16 МГц, що дозволяє контролеру оперативно реагувати на зміни вхідних даних та виконувати обчислення в режимі реального часу. Програмна частина розміщується у 32 кілобайтах флеш-пам'яті, що дає змогу створювати розширені алгоритми обробки даних та керування, включаючи захист від помилкових спрацювань при хмарності чи розсіяному освітленні. Для обробки змінних даних під час роботи передбачено 2 кілобайти оперативної пам'яті (SRAM), а для зберігання постійних налаштувань і калібрувань — 1 кілобайт EEPROM-пам'яті.

Arduino Nano підтримує стандартні шини зв'язку, зокрема I2C та SPI, що відкриває широкі можливості для інтеграції додаткових периферійних пристроїв. За потреби до системи можуть бути підключені модулі годинника реального часу, сенсори температури, модулі бездротового зв'язку або метеорологічні станції, що дозволяє розширити функціонал системи в процесі подальшого розвитку проєкту.

Програмування плати здійснюється за допомогою середовища Arduino IDE, яке вирізняється простим та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Велика кількість готових бібліотек, активна спільнота розробників та наявність численних відкритих проєктів значно спрощують створення та налагодження програмного

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

забезпечення навіть для складних завдань керування. Це дозволяє зосередити основну увагу на розробці власної логіки позиціонування без необхідності вирішувати складні низькорівневі технічні питання.

Вибір Arduino Nano як основи системи зумовлений її доступністю, гнучкістю, надійністю та відповідністю усім технічним вимогам, що ставилися перед даним проектом. Такий підхід забезпечує створення стабільної, ефективної та недорогої системи активного стеження за Сонцем, придатної для використання в умовах побутового сектору та малих господарств.



Рисунок 4 – Сервопривід SG90

У системі активного сонячного стеження одним із ключових виконавчих елементів є сервоприводи, які забезпечують точне й стабільне позиціонування сонячної панелі у просторі. Саме завдяки сервоприводам відбувається зміна орієнтації панелі в напрямку максимальної інтенсивності сонячного випромінювання відповідно до команд, що формуються мікроконтролером. Для реалізації рухомої частини конструкції у даній системі було обрано сервоприводи моделі SG90, які широко застосовуються у різноманітних проєктах завдяки своїй простоті, надійності та доступності.

Сервоприводи SG90 є мініатюрними, компактними та легкими, що дозволяє без проблем інтегрувати їх у конструкції обмежених розмірів. Завдяки своїм характеристикам вони особливо підходять для застосування у невеликих системах позиціонування, таких як побутові сонячні трекери, де важлива точність, але немає потреби у великих зусиллях переміщення. Використання сервоприводів замість класичних двигунів або крокових моторів дає змогу

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

спростити конструкцію, оскільки сервопривід має вбудовану систему зворотного зв'язку і самостійно утримує задану позицію без потреби постійного зовнішнього контролю положення.

Принцип роботи сервоприводу базується на порівнянні заданої команди положення, що надходить у вигляді широтно-імпульсного сигналу (PWM), із фактичним положенням осі, яке визначається за допомогою внутрішнього потенціометра. Відхилення між бажаним і фактичним положенням обробляється вбудованою електронікою сервоприводу, яка формує відповідний коригувальний сигнал для моторчика. Завдяки цьому забезпечується точне позиціонування, плавність руху та стабільність утримання заданого кута.

Сервопривід SG90 підтримує стандартне PWM-керування, що дозволяє легко інтегрувати його з контролерами типу Arduino. Керування здійснюється за допомогою трьох проводів: лінії живлення (червоний провід), заземлення (чорний або коричневий) та керуючої лінії сигналу (жовтий або оранжевий). Така структура підключення значно спрощує процес монтажу та налагодження системи, дозволяючи уникнути складної електронної обв'язки.

Основні технічні характеристики сервоприводу SG90 наведено нижче:

Максимальний кут обертання становить 180° (від 0 до 180°), що забезпечує можливість точного охоплення широкого діапазону позицій для орієнтації панелі.

Робоча напруга живлення перебуває у межах $4,8\text{--}6,0\text{ В}$, що цілком сумісно з напругою, яку формує Arduino Nano.

Номінальний крутний момент складає $1,8\text{ кг}\cdot\text{см}$ при $4,8\text{ В}$, чого достатньо для переміщення сонячних панелей невеликої маси.

Час реакції становить $0,1\text{ с}$ на 60° повороту при $4,8\text{ В}$, що забезпечує достатню швидкість корекції положення без зайвих різких рухів.

Розміри корпусу — $22,8 \times 12,6 \times 22,3\text{ мм}$, маса — близько 9 г , що дозволяє легко інтегрувати сервоприводи в легкі та мобільні конструкції.

Особливо важливою перевагою SG90 у контексті даного проекту є поєднання компактних розмірів та невеликої ваги з достатньою силою обертання. Це дозволяє зменшити масу всього механізму обертання, спростити

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

опорні вузли конструкції та знизити навантаження на привідні механізми. Завдяки простоті монтажу та налаштування сервоприводи можуть бути легко замінені або обслуговувані в разі необхідності, що важливо для довготривалої експлуатації системи.

Загалом, використання сервоприводів SG90 у системі активного сонячного стеження дозволяє забезпечити високу точність наведення, стабільність утримання положення панелі, простоту конструкції і надійність у роботі за умов помірних навантажень, характерних для малих побутових та демонстраційних систем.



Рисунок 5 – Фоторезистор PGM5516

Фоторезистори PGM5516 – це датчики освітленості, які змінюють свій опір залежно від кількості світла, що на них потрапляє. Їхня здатність швидко реагувати на зміну рівня освітлення робить їх придатними для застосування в сонячних позиціонерах, де вони забезпечують дані для орієнтування панелей на джерело світла.

Характеристики фоторезисторів PGM5516:

- Опір у темряві: 1 МОм, що забезпечує високу чутливість до слабого освітлення.
- Опір на світлі: від 10 до 20 кОм при високому рівні освітлення (100 люкс), що дозволяє ефективно визначати напрямок світла.
- Робочий діапазон напруг: до 150 В, що дозволяє використовувати їх у різних схемах без потреби в додаткових захисних компонентах.
- Температурний діапазон: -30°C до $+70^{\circ}\text{C}$, що робить їх придатними для використання в умовах зовнішнього середовища, де температура може змінюватися протягом дня та року.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Фоторезистори PGM5516 часто підключаються як дільники напруги, де разом з резистором утворюють просту схему для вимірювання напруги, яка змінюється залежно від рівня освітленості. У нашій системі вони під'єднані до аналогових входів Arduino, що дозволяє вимірювати напругу та визначати, з якого боку на панель падає більше світла. Ця інформація надходить до сервоприводів, які коригують положення панелі, орієнтуючи її на сонце для оптимального збору енергії.

3.2 Архітектура системи позиціонування

У запропонованій системі активного сонячного позиціонування реалізована двохвісна архітектура керування, що дозволяє максимально точно орієнтувати сонячну панель у просторі відповідно до положення Сонця. Така архітектура забезпечує два ступені свободи: обертання панелі в горизонтальній площині (по азимуту) та зміну її нахилу у вертикальній площині (по висоті Сонця над горизонтом). Застосування двох незалежних осей обертання дозволяє ефективно компенсувати не лише добовий рух Сонця зі сходу на захід, але й сезонні зміни кута його підйому, що особливо важливо для підтримання стабільно високої ефективності збору сонячної енергії протягом усього року.

Конструктивно система складається з двох сервоприводів SG90, кожен із яких відповідає за переміщення панелі по своїй осі. Управління обома сервоприводами здійснюється центральним контролером — мікроконтролером Arduino Nano, за допомогою програмної бібліотеки Servo.h, що значно спрощує процес керування, забезпечуючи точну передачу команд у вигляді кутових значень.

Кожен сервопривід працює за принципом замкненого контуру зворотного зв'язку: всередині приводу вбудований потенціометр, що фіксує фактичне положення осі. Надходження керуючого сигналу у вигляді широтно-імпульсної модуляції (PWM) визначає бажаний кут повороту. Відхилення між бажаним і фактичним положенням визначається внутрішньою електронікою сервоприводу, яка, у разі потреби, коригує положення валу до досягнення

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

заданого кута. Таким чином забезпечується висока точність і плавність позиціонування без потреби в зовнішній системі датчиків зворотного зв'язку.

У даній системі використовується стандартний PWM-сигнал з частотою близько 50 Гц, де тривалість керуючого імпульсу змінюється в межах приблизно 1 мс (положення 0°) до 2 мс (положення 180°). Контролер Arduino генерує ці сигнали автоматично за допомогою бібліотеки Servo.h, яка дозволяє розробнику оперувати зручними кутковими значеннями в градусах, спрощуючи програмування.

Горизонтальна вісь обертання (Servo1)

Перший сервопривід, умовно позначений як Servo1, здійснює обертання світлочутливого блоку і, відповідно, сонячної панелі по горизонтальній площині — тобто регулює орієнтацію системи по азимуту (схід-захід). Завдяки цьому панель сліdkує за добовим рухом Сонця, підтримуючи максимальне перпендикулярне положення відносно сонячних променів. Під час зміни освітленості від фоторезисторів контролер аналізує рівновагу світлових потоків і, у разі виявлення відхилення, формує команду на корекцію положення по цій осі.

Вертикальна вісь обертання (Servo2)

Другий сервопривід, Servo2, відповідає за вертикальний нахил сонячної панелі, тобто регулює її положення відносно висоти Сонця на небі. Це дозволяє компенсувати сезонні зміни кута підйому Сонця протягом року, а також враховувати зміну висоти Сонця впродовж дня. Завдяки незалежному керуванню цією віссю забезпечується максимальна орієнтація поверхні панелі під оптимальним кутом до сонячного світла, що мінімізує втрати енергії через некоректний нахил.

Ініціалізація системи та початкова позиція

Для забезпечення коректної роботи обидва сервоприводи перед початком активної роботи системи встановлюються у базову позицію — 90° . Це положення обрано як нейтральну, відцентровану точку, з якої система починає відслідковувати зміни положення Сонця. Така початкова установка дозволяє забезпечити рівновіддалений робочий діапазон руху в обидві сторони для

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

кожної осі, що полегшує розрахунок максимально допустимих кутів відхилень у програмній частині системи.

Переваги двохвісної архітектури

Реалізація двох незалежних ступенів свободи дає змогу досягти значного приросту ефективності роботи сонячної установки. За даними практичних досліджень, двохвісні системи можуть збільшити загальний обсяг виробленої енергії на 25–35% порівняно з фіксованими конструкціями, особливо у регіонах із високою сезонною варіативністю положення Сонця. Крім того, порівняно з одноосьовими системами, додаткова вертикальна вісь дозволяє підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів незалежно від пори року, що є особливо важливим для ефективної роботи в умовах Закарпаття з характерною зміною висоти Сонця влітку та взимку.

Застосування сервоприводів SG90 із незалежним керуванням для кожної осі дозволило також максимально спростити механічну конструкцію приводного вузла системи. Завдяки наявності вбудованої зворотної реакції положення відпала потреба у встановленні зовнішніх датчиків положення, складних синхронізаторів чи редукторних механізмів, що значно зменшило вартість та спростило технічне обслуговування системи. Легка вага сервоприводів дозволила знизити навантаження на опорні елементи конструкції, забезпечивши надійну роботу навіть у компактних легких макетах.

Загалом запропонована архітектура системи позиціонування демонструє оптимальне поєднання простоти конструкції, високої точності керування та стабільності роботи при мінімальних витратах на виготовлення, що робить її доцільною для побутових, навчальних та демонстраційних застосувань.

3.3 Світлочутливий модуль

Ключовим елементом системи активного стеження за Сонцем є **світлочутливий модуль**, що відповідає за визначення фактичного положення джерела світла на небосхилі. Саме цей модуль формує інформаційний сигнал для мікроконтролера, на основі якого система приймає рішення про необхідність зміни положення сонячної панелі. У запропонованій системі позиціонування для реалізації функції визначення напрямку сонячного

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

випромінювання застосовано просту та ефективну конструкцію на основі фоторезисторів.

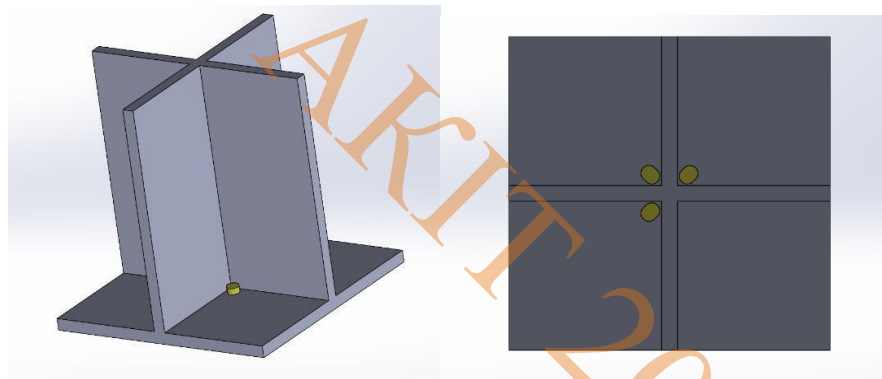


Рисунок 6 – Світлочутливий модуль

Світлочутливий модуль складається із трьох фоторезисторів, розміщених на хрестоподібній платформі таким чином, що кожен із них орієнтований у певному напрямку відносно центральної осі системи. Така геометрія розміщення сенсорів дозволяє фіксувати навіть незначні зміни положення Сонця завдяки різниці в інтенсивності освітлення, що падає на кожен із детекторів. У міру переміщення Сонця на небі змінюється кут падіння променів, що призводить до нерівномірного освітлення різних фоторезисторів. Виявлена різниця фіксується контролером, що дозволяє системі з високою точністю визначити напрямок відхилення від оптимального положення.

Фоторезистори, які застосовуються в даній конструкції, мають високу чутливість до видимого спектру світла, що забезпечує стабільну роботу системи в умовах природного освітлення. Залежно від інтенсивності світла їхній опір змінюється в широкому діапазоні, перетворюючи зміну освітленості на зміну електричної напруги в сигнальних колах. Отримані аналогові сигнали надходять на аналогові входи контролера Arduino, де оцифровуються за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (ADC).

Обробка сигналів здійснюється за допомогою програмних алгоритмів контролера, які порівнюють значення освітленості між парами фоторезисторів для кожної осі обертання окремо — горизонтальної (азимутальної) та

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

вертикальної (висотної). Відповідно до отриманих результатів система формує команди корекції положення для обох сервоприводів, орієнтуючи панель таким чином, щоб рівень освітленості на усіх сенсорах вирівнювався. Це означає досягнення максимально перпендикулярного положення панелі до сонячного променя, що відповідає оптимальній роботі системи.

Конструкція світлочутливого модуля є надзвичайно простою в реалізації. Вона не потребує складних калібрувань чи точного налаштування оптики. Завдяки хрестоподібному розташуванню сенсорів та роздільним перегородкам між ними забезпечується чіткий розподіл світлових потоків на кожен із фоторезисторів, що підвищує чутливість модуля до зміщення положення джерела світла навіть при незначних змінах його напрямку.

Серед основних переваг використання такої конструкції слід відзначити її високу точність при мінімальній вартості компонентів. Доступність фоторезисторів і простота їх підключення забезпечують економічність проекту, а тривалий термін служби сенсорів сприяє надійності та довговічності роботи системи в умовах реальної експлуатації. Простота конструкції також дозволяє легко відновити працездатність модуля у разі виходу з ладу окремих елементів, що важливо для побутових та демонстраційних систем.

Таким чином, запропонований світлочутливий модуль відіграє ключову роль у побудові системи активного стеження за Сонцем. Він забезпечує ефективне й оперативне визначення положення джерела випромінювання, формуючи основу для точного позиціонування сонячної панелі й підвищення ефективності перетворення сонячної енергії впродовж усього світлового дня.

3.4 Електрична схема проєкту

Схема включає в себе:

- Схема перетворює 12v – 5v;
- 2 сервоприводи SG90;
- 3 фоторезистори PGM5516;
- 3 резистори по 10к Ом кожен;

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- Зовнішнє джерело живлення 5V;

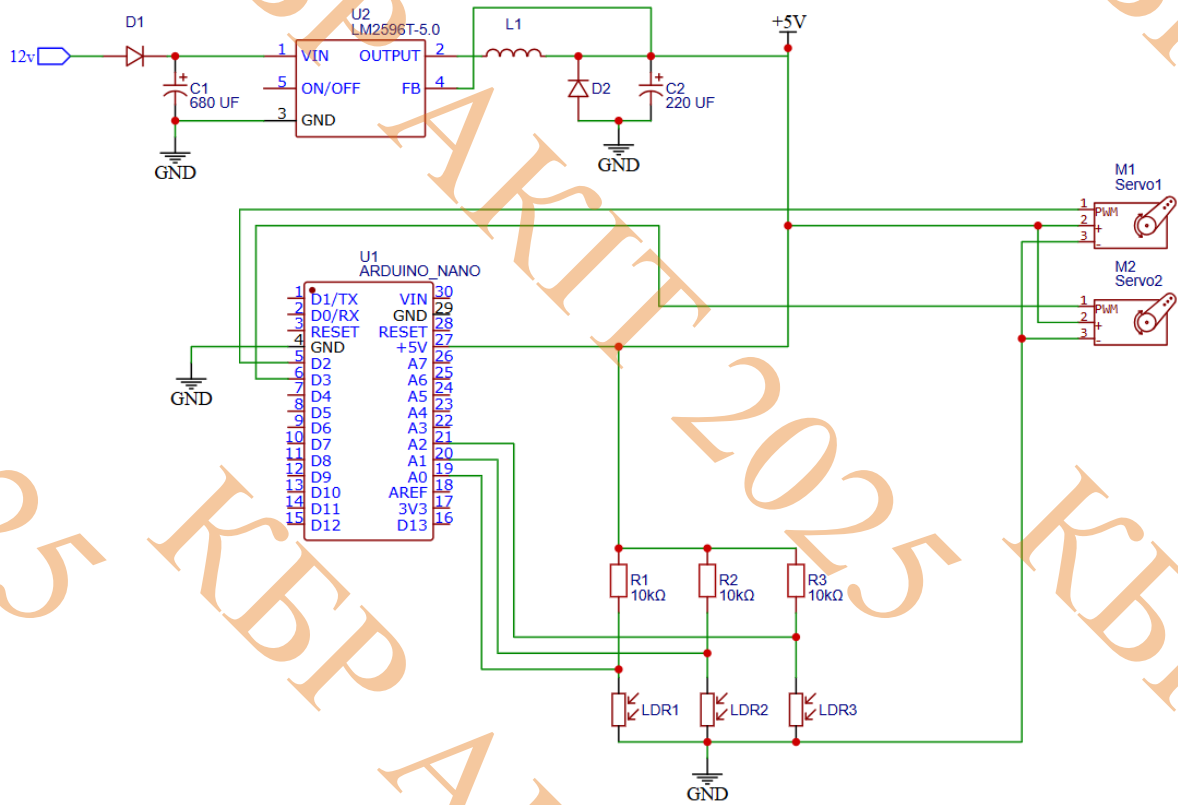
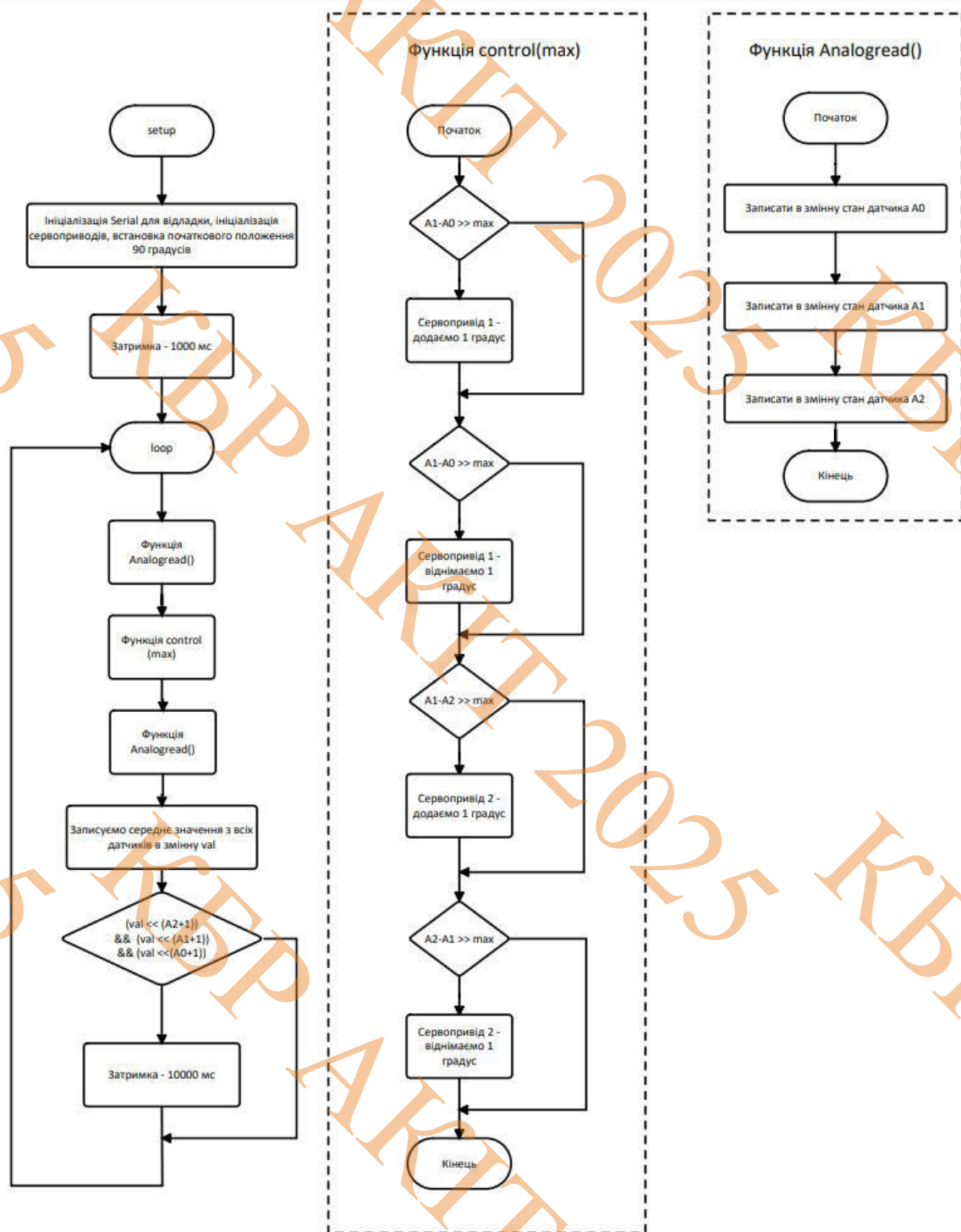


Рисунок 7 – Принципова електрична схема проекту

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3.5 Алгоритм функціонування та код програми

Схема алгоритму роботи наведена нижче, код можна переглянути в додатку А:



ВИСНОВКИ

В цій бакалаврській кваліфікаційній роботі було досягнуто наступних результатів:

1. Проведено детальний аналіз інформації про актуальність використання систем автоматичного позиціонування сонячних панелей, а також сфер їх застосування в промисловості, сільському господарстві та побуті. Розглянуто, як ці системи сприяють підвищенню продуктивності сонячних установок, дозволяючи їм слідкувати за положенням сонця впродовж дня.

2. Проаналізовано переваги та недоліки фіксованих сонячних панелей і систем із динамічним позиціонуванням, зокрема щодо ефективності енергозбирання, стабільності роботи, вартості встановлення та обслуговування.

3. Подано короткий опис основних компонентів проекту, таких як Arduino Nano, сервоприводи SG90 і світлочутливий модуль, що включає в себе фоторезистори для визначення положення сонця.

4. Приведено електричну схему та розроблено програмний код для реалізації проекту, який забезпечує коректну роботу системи позиціонування панелі.

					КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1696>
2. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10373430>
3. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano?srltid=AfmBOoo4ohgtsu46uLRSHs6FiP8P8GsCVzmlRMt4qAi6JF7xlb3g2U0D>
4. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>
5. Жуйков В. Я., Терещенко Т. О., Ямненко Ю.С., Заграничний А.В. «Мікропроцесорна техніка», Київ - 2016.
6. Методичні вказівки до комп'ютерного практикуму. Програмування мікроконтролерів AVR мовою Сі. Для студентів спеціальності 6.0908.03 «Електронні системи» всіх форм навчання / Уклад.: Л.М.Батрак, В.А.Тодоренко, О.В.Хоменко. «Мікропроцесорні пристрої» - К.: НТУУ «КПІ», 2011.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КБР.АКІТ. 9469929.01.000 ПЗ	Арк. 33
------	------	----------	--------	------	-----------------------------	------------