Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютерних технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення робота трекера для сонячних панелей
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ -21-2
Ростислав КОЛНОГУЗОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олександр ЦИМБАЛ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри КІТАР Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Колногузов Ростислав Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував не дозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«31» травня 2025 р Колногузов Р. С.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)

«19» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Колногузову Ростиславу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Розроблення робота-трекера для сонячних панелей

Затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. №391 Ст
2 Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 03.06.2025
3 Вихідні дані до роботи
3.1 Arduino UNO, мікроконтролер для розробки проекту
3.2 Додаткові компоненти, датчики, мотори, корпус робота
3.3 Блоки живлення та перетворювачі струму
3.4 Пристрої для пайки та вимірювання струму та напруги в електричному колі

4 Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ
4.2 Огляд сучасних моделей трекінгових систем
4.3 Аналіз вимог до створення проекту
4.4 Розробка автоматизованої системи відстежування положення сонця
4.5 Питання пов'язані з охороною праці
4.6 Висновки та перелік джерел посилань

5 Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) 12 с. формату А4

6 Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№		Термін виконання етапів роботи	Приміт–ка
1	Аналіз технічного завдання	18.11.2024	Виконано
2	Формування мети та задач проекту	04.12.2024	Виконано
3	Вибір апаратної платформи та компонентів системи	07.03.2025	Виконано
4	Тестування та перевірка системи автоматизації управління зображеннями	22.03.2025	Виконано
5	Збірка і тестування апаратної частини	19.04.2025	Виконано
6	Програмна реалізація системи	11.05.2025	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	21.05.2025	Виконано

Дата видачі завдання 15.11.2024

Студент _____ Колногузов Р.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ проф. Олександр ЦИМБАЛ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 8 табл., 42 рис., 2 дод., 15 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ARDUINO, РОБОТ, ТРЕКЕР, C++, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ДАТЧИКИ, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА.

Об’єкт розробки – процес створення моделі робота-трекера для сонячних панелей.

Предмет розробки – модель робота-трекера для сонячних панелей.

Мета роботи – досягнення ефективного відстежування сонячного випромінювання шляхом створення автоматизованої трекінгової системи.

За час написання кваліфікаційної роботи було розглянуто різні системи трекінгу які є на ринку, було проведено їх аналіз та виділені як плюси так і мінуси пристроїв.

Було здійснено порівняльний аналіз двох типів систем, після чого обрано оптимальну. Проведено порівняння різних серводвигунів, датчиків, та відібрано лише ті, що мають найвищий пріоритет. Розглянуто детальний перелік компонентів, що були використані у процесі розробки. Також представлено технічний опис обраних компонентів.

Розроблено програмний код для автоматизації функціонування приладу в програмному середовищу Arduino IDE.

Проведено тестування системи у різноманітних умовах експлуатації а також проведення тестування пристрою на протязі дня для відслідковування стану системи трекінгу.

ABSTRACT

Explanatory note: 81 pages, 8 tables, 42 pictures, 15 sources, 2 appendix.

AUTOMATION, ARDUINO, ROBOT, TRACKER, C++, SOLAR CELL, SOLAR PANELS, SENSORS, ELECTRICAL CIRCUIT.

Purpose of the development – to create a tracker robot that can follow the position of the sun.

Object of the development – the process of creating a model of the tracker robot.

Subject of the development – the model of the tracker robot for use with solar panels.

During the qualification work, different solar tracking systems available on the market were studied. Their advantages and disadvantages were analyzed. A comparison between two types of systems was made and the most suitable one was chosen.

Various types of servo motors and sensors were also compared and only the most suitable ones were selected for the final design. A detailed lest of the components used in the project was created, along with a technical description of each part.

Software was written in the Arduino IDE to automate the device's operation.

The system was tested in different working conditions, including a full-day test to track the performance of the tracking system.

ЗМІСТ

Перелік скорочень і одиниць 8
Вступ 9
1 Аналіз конструктивних особливостей систем сонячної енергетики 11
1.1 Принцип роботи та класифікація сонячних енергосистем 11
1.2 Основні компоненти автономної сонячної системи 14
1.3 Порівняння фіксованих і трекінгових систем 17
2 Розробка конструкції трекінгової системи 21
2.1 Розробка структурної схеми 21
2.2 Вибір компонентної бази 23
2.2.1 Аналіз характеристик сонячних панелей 23
2.2.2 Аналіз характеристик платформи Arduino UNO 27
2.2.3 Аналіз системи приводів та сенсорів у трекері 28
2.2.4 Аналіз системи перетворення струму та напруги 32
3 Розробка автоматизації робота-трекера для сонячних панелей 41
3.1 Алгоритмічна схема роботи системи 41
3.2 Розробка схеми підключення елементів 44
3.3 Розробка конструкції та встановлення усіх компонентів 49
3.4 Розробка програмного коду для Arduino 58
3.5 Тестування роботи датчиків в умовах експлуатації 60
3.6 Теоретичні основи автоматичного управління у системах відстеження положення сонця 66
3.7 Охорона праці 68
Висновки 70
Перелік посилань 72
Додаток А Лістинг програми керування для Arduino 74
Додаток Б Демонстраційний матеріал 78

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ОДИНИЦЬ

ДСП – деревостружкова плита;

ДСТУ – державні стандарти України;

кГц – кілогерц;

кВт – кіловат;

кОм – кілоом;

ЛК – люкс;

мА – міліампер;

мВт – міліват;

МГц – мегагерц;

МК – мікроконтролер;

мкА – мікроампер;

мкс – мікросекунда;

МОм – мегаом;

нм – нанометри;

нс – наносекунда;

ПК – персональний комп’ютер;

пФ – пікофарад;

СЕС – сонячна енергосистема;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

Arduino IDE – Integrated Development Environment;

BMS – Battery Management System;

COM – Communication;

I^2C – шина I^2C (Inter Integrated Circuit);

OSB-плита – орієнтовано-стружкова плита (orient strand board);

TVS – Transient Voltage Suppression;

USB – Universal Serial Bus.

ВСТУП

На сьогоднішній день зростає актуальність використання альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, що обумовлення як екологічними викликами, так і необхідністю енергонезалежності. З цією метою активно розробляються та впроваджуються автоматизовані системи, які дозволяють підвищити ефективність використання сонячної енергії. Одним із перспективних напрямів є створення роботизованих трекерів для сонячних панелей, які здатні самостійно орієнтуватися на джерело світла задля досягнення максимальної енерговіддачі.

Використання таких роботизованих систем не лише сприяє автономності роботи пристроїв в умовах нестабільного електропостачання, а й дозволяє розширити сферу застосування альтернативної енергетики у побуті, на транспорті та в малих підприємствах. З огляду на це зростає потреба у створенні нових, більш інтелектуальних та оптимізованих систем керування слідкуванням за сонцем, що мають низьке енергоспоживання, модульну структуру, а також здатність працювати без участі людини тривалий час.

В Україні ця інновація тільки впроваджується, але наприклад у Австралії такі системи активно використовують в пустельних зонах, де трекінгові системи можуть працювати з мінімальним обслуговуванням і максимальним ККД.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 “Промисловість, інновації та інфраструктура”, а саме п. 9.4. “Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямами: розвиток інноваційної екосистеми”, індикатор 9.4.1. А також до Цілі сталого розвитку 7 “Доступна та чиста енергія”, а саме п. 7.3. “Збільшити частку енергії з відновлюваних джерел у національному енергетичному балансі, зокрема за рахунок введення додаткових потужностей об’єктів, що виробляють енергію з відновлюваних джерел”, індикатор 7.3.1.

Мета роботи – досягнення ефективного відстежування сонячного випромінювання шляхом створення автоматизованої трекінгової системи.

Об’єкт розробки – процес створення моделі робота трекера для сонячних панелей.

Предмет розробки – модель робота-трекера для сонячних панелей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз існуючих аналогів та порівняти їх між собою

– провести аналіз компонентів з яких буде складатися модель;

– розробити макет робота-трекера та виконати тестовий запуск;

– виконати тест моделі при повній експлуатації;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [2].

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Принцип роботи та класифікація сонячних енергосистем

Сонячна енергетика – є одним із ключових та найперспективніших напрямків розвитку сучасної енергетики, який ґрунтується на широкомасштабному використанні відновлюваних джерел енергії, зокрема енергії Сонця. В умовах постійного зростання попиту на електроенергії, вичерпності природних ресурсів та загострення екологічних проблем, пов'язаних із використання традиційних джерел енергії таких як вугілля, нафта чи природний газ, сонячні енергетичні системи (СЕС) стають надзвичайно актуальними. Вони не лише дозволяють зменшити навантаження на навколишнє середовище, а й сприяють переходу до більш сталої та екологічно безпечної моделі енергоспоживання.

У центрі функціонування сонячних електростанцій лежить фізичне явище, відоме як фотоелектричний ефект. Це фундаментальний процес, у якому під дією сонячного світла на поверхню певних матеріалів, здебільшого напівпровідникових, відбувається генерація електричних зарядів – електронів і дірок. Вперше це явище було зафіксоване у 1839 році французьким фізиком Олександром Едмоном Беккерелем, який експериментально довів можливість перетворення світлової енергії в електричну. Згодом, у 1905 році, видатний вчений Альберт Ейнштейн теоретично пояснив природу цього явища, що стало основою для розвитку фотоелектричних технологій. За це відкриття він був удостоєний Нобелівської премії з фізики у 1921 році, що ще раз підкреслює фундаментальну важливість фотоелектричного ефекту для науки й техніки [3].

Фотоелектричні модулі або сонячні панелі – це пристрої, що складаються з великої кількості сонячних елементів, виготовлених переважно із

кристалічного кремнію – напівпровідника, який завдяки своїм фізико-хімічним властивостям здатен ефективно поглинати фотони та генерувати електричний струм. Основним елементом конструкції кожного фотоелектричного елемента є так званий p-n перехід, утворений за допомогою легування кремнію спеціальними домішками, які формують дві області з різною електропровідністю: p-типу (з перевагою позитивних носіїв заряду – дірок) та n-типу (з перевагою електронів).

Коли фотон, тобто квант світлової енергії, досягає поверхні сонячного елемента, він може передати свою енергію електрону у валентній зоні. У результаті цього електрон вивільняється зі свого зв'язку й переходить у зону провідності, утворюючи пару електрон-дірка. Внутрішнє електричне поле, наявне в області p-n переходу, спрямовує ці носії заряду в різні сторони (рис. 1.1), що створює умови для виникнення електричного струму у зовнішньому колі. Таким чином, світлова енергія Сонця ефективно перетворюється в електричну енергію без застосування рухомих частин чи механічних компонентів, що робить дану технологію надзвичайно надійною і довговічною.

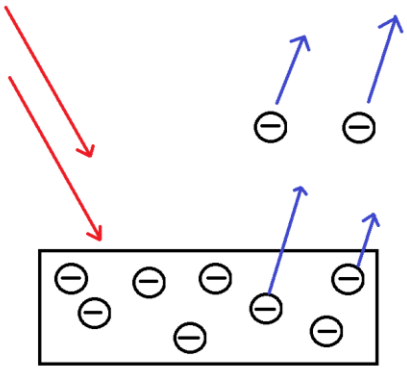

Рисунок 1.1 – Фотоефект у твердому тілі: ультрафіолетове світло вириває електрони з кристалу

Залежно від конструктивних особливостей, умов експлуатації, архітектури системи, рівня доступу до електромережі та енергетичних потреб споживача

сонячні енергосистеми класифікуються на три основні типи: автономні, мережеві та гібридні. Кожен із цих типів має свої переваги, недоліки та специфіку використання [4,5].

Автономна сонячна енергосистема функціонує незалежно від загальної електромережі. Вона розрахована на повну або часткову енергетичну автономність споживача та зазвичай застосовується в місцевостях, де підведення традиційного електропостачання є технічно складним, економічно невигідним або взагалі неможливим. Структурно така система складається з сонячних панелей, що генерують електроенергію, акумуляторних батарей для її накопичення, інвертора для перетворення постійного струму на змінний, а також контролера заряду, який забезпечує оптимальний режим заряджання та розряджання акумуляторів. У денний час, коли сонячна активність найвища, енергія накопичується у батареях, а вночі чи у похмурі дні вона використовується для живлення електроприладів. Основна перевага таких систем – повна незалежність від центральної електромережі. Проте вони мають і недоліки: висока вартість акумуляторів, обмежена тривалість їхнього ресурсу та залежність від погодних умов.

Мережева сонячна система, на відміну від автономної, підключена до загальної електромережі. Вона не використовує акумуляторів, оскільки надлишки виробленої електроенергії можуть бути передані до енергосистеми, а у разі недостатнього вироблення – компенсовані споживанням із мережі. Це дозволяє зменшити витрати на обладнання, знизити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність системи. У багатьох країнах передбачено спеціальні програми підтримки таких систем через механізми “зеленого тарифу”, які дозволяють продавати надлишкову електроенергію за вигідними цінами. Недоліком мережевих СЕС є залежність від стану загальної енергомережі – у випадку аварійного вимкнення мережі або перебоїв з електропостачанням система припиняє роботу, навіть якщо сонячна генерація триває.

Гібридна система є поєднанням автономної та мережевої конфігурацій. Вона має доступ як до електромережі, так і до власних акумуляторів. У разі нормального функціонування мережі система може живити споживачів, віддавати надлишок енергії в мережу або накопичувати її в акумуляторах. У разі аварії або зникнення напруги, гібридна система переходить у автономний режим, забезпечуючи безперебійне живлення критично важливих навантажень. Такий підхід дозволяє досягти максимальної гнучкості, надійності та енергонезалежності. Водночас гібридна система є найбільш складною в проектуванні та реалізації, вимагає ретельного налаштування, відповідного програмного забезпечення та значних капіталовкладень.

Вибір оптимального типу СЕС залежить від низки факторів, зокрема: географічного розташування об'єкта (середньорічна інсоляція, кількість сонячних днів), кліматичних умов (наявність туману, дощових сезонів), надійності традиційного енергопостачання, доступу до інфраструктури, рівня енергоспоживання, бюджетних можливостей користувача, а також очікуваної тривалості автономної роботи системи. Комплексний аналіз усіх цих параметрів дозволяє підібрати найбільш ефективне та економічно доцільне рішення для конкретного випадку.

1.2 Основні компоненти автономної сонячної системи

Автономна сонячна енергетична система (СЕС) – це інженерно-технічний комплекс, який дозволяє повністю забезпечити електропостачання об'єкта без необхідності підключення до централізованої енергетичної мережі. Такі системи особливо актуальні в умовах віддалених або важкодоступних районів, де прокладка традиційної електромережі є економічно недоцільною або технічно складною. Також автономні СЕС активно використовуються для забезпечення енергією об'єктів мобільного або тимчасового призначення – кемпінгів, дач, військових та польових баз тощо.

Основним завданням автономної СЕС є безперервна генерація, зберігання та споживання електроенергії протягом доби незалежно від умов освітлення. Її ефективність залежить від правильного підбору, якісного проектування та інтеграції окремих компонентів, кожен з яких виконує визначену функцію в загальній системі.

Центральним елементом автономної системи є сонячні панелі (фотомодулі), які виконують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Панелі складаються з багатьох фотоелементів, виготовлених, як правило, з кристалічного кремнію. У процесі поглинання фотонів відбувається фотоелектричний ефект, який забезпечує генерацію постійного електричного струму. Величина виробленої потужності прямо залежить від кількості сонячного світла, що потрапляє на поверхню модуля, кута нахилу панелі, температури навколишнього середовища, якості матеріалів та погодних умов (рис. 1.2). У похмурі або туманні дні генерація значно знижується, що потребує ефективного енергозбереження або використання додаткових накопичувачів енергії.

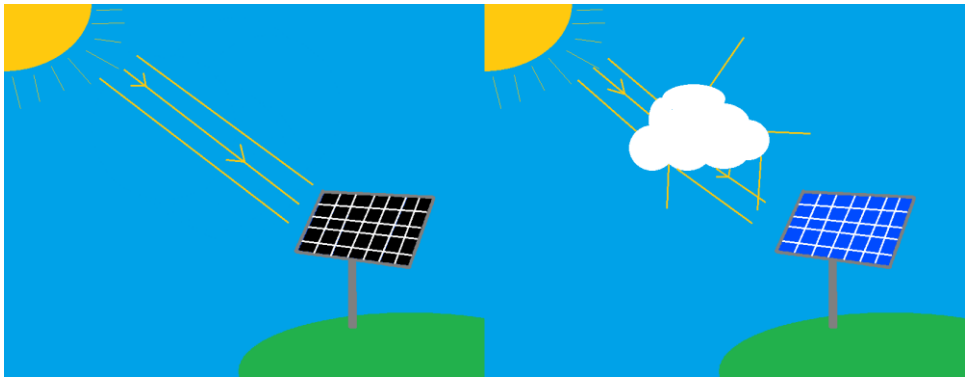

Рисунок 1.2 – Залежність ступеня хмарності на роботу СП

Для зберігання надлишкової енергії, що виробляється впродовж світлового дня, в системі використовуються акумуляторні батареї. Вони забезпечують автономність роботи споживачів в темний період доби або під час несприятливих погодних умов. У сучасних автономних СЕС перевагу надають літій-іонним та

гелевим акумуляторам, які мають більшу кількість циклів зарядки-розрядки, кращу ефективність та меншу вагу у порівнянні зі свинцево-кислотними, або літій-ферум-фосфатними аналогами. Важливим аспектом є вибір ємності акумулятора залежно від пікового споживання енергії та очікуваної тривалості автономної роботи без підзарядки.

Контролер заряду – це пристрій, який регулює процес заряду акумуляторних батарей, запобігаючи як їх перезарядженню, так і надмірному розрядженню. Його наявність є критично важливою для забезпечення довговічної та безпечної експлуатації акумуляторів. Серед сучасних технологій контролерів найпоширенішими є два типи: ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) та MPPT (відстеження точки максимальної потужності). Останні є значно ефективнішими, оскільки здатні адаптуватися до змін освітленості, аналізуючи вихідні характеристики сонячних панелей і підтримуючи максимальний рівень потужності при нестабільному сонячному випромінюванні (рис. 1.3).

Рисунок 1.3 – Контролер заряду (MPPT)

Крім генерації та зберігання, автономна СЕС повинна також забезпечувати перетворення електричної енергії з постійного струму у змінний, оскільки більшість побутових приладів працюють саме від змінного струму з напругою 220В. Для цього в систему інтегрується інвертор, який виконує функцію перетворювача. Вибір типу інвертора (синусоїдальний, модифікований тощо) залежить від виду навантаження, чутливості приладів до якості сигналу та загальної потужності споживачів.

Не менш важливою є конструктивна частина системи – елементи монтажу, кріплення, електричні кабелі, клеми, комутаційні панелі, що забезпечують фізичне та електричне з'єднання між усіма складовими. Від правильності монтажу залежить як ефективність, так і безпека функціонування всієї системи.

Реалізація такої системи суттєво підвищує ефективність генерації енергії протягом усього року, зменшує час бездіяльності та дозволяє отримати більший обсяг електроенергії без встановлення додаткових панелей.

У підсумку, автономна сонячна система – це складний багатокомпонентний комплекс, ефективність якого залежить не лише від якості окремих елементів, а й від їхньої правильної інтеграції, точного проектування та відповідності реальним умовам експлуатації. Ретельний аналіз споживання енергії, погодних умов, географічного розташування та бюджету дозволяє створити надійну та довговічну систему енергозабезпечення з мінімальною залежністю від зовнішніх факторів.

1.3 Порівняння фіксованих і трекінгових систем

У процесі проектування та впровадження сонячних енергетичних установок одним із ключових техніко-економічних рішень є вибір типу конструкції кріплення фотомодулів. Цей вибір істотно впливає не лише на рівень генерації електроенергії, а й на загальну ефективність системи, її надійність,

довговічність, обслуговування та вартість встановлення й експлуатації. У практиці реалізації сонячних електростанцій найчастіше використовуються два основні типи конструкцій для встановлення сонячних панелей: фіксовані (статичні) конструкції та трекінгові (динамічні) системи відстеження. Вони суттєво відрізняються за принципами роботи, конструктивною складністю, технічними характеристиками, а також рівнем енерговіддачі у різних кліматичних умовах.

Фіксовані конструкції передбачають жорстке закріплення фотомодулів під певним фіксованим кутом нахилу, який заздалегідь розраховується з урахуванням географічного розташування об’єкта та середньорічної сонячної інсоляції (рис. 1.4). Найчастіше кут нахилу обирається такий, щоб забезпечити максимальний річний показник вироблення енергії, проте конструкція не передбачає можливості змінювати орієнтацію панелей протягом доби або в залежності від сезонних змін. Це робить фіксовані конструкції вкрай простими у виготовленні та встановленні. Їх перевагами є низька вартість реалізації, відсутність потреби в обслуговуванні рухомих частин, висока механічна стійкість та довговічність.

Рисунок 1.4 – Конструкція фіксованого положення сонячних панелей

Такі системи є ідеальними для малопотужних або побутових фотоелектричних установок, де пріоритет надається простоті експлуатації та мінімізації капітальних витрат. Особливо це актуально в умовах, коли вартість сервісного обслуговування або складність конструкції критично важливі – наприклад, для систем, встановлених у важкодоступних регіонах.

Однак, основним обмеженням фіксованих конструкцій є невисокий рівень ефективності використання сонячної енергії. Сонячна панель у фіксованому положенні працює з максимальною продуктивністю лише протягом короткого проміжку часу впродовж дня – зазвичай опівдні, коли Сонце знаходиться у найвигіднішому положенні по відношенню до площини фотомодуля. У решту часу потік сонячного випромінювання потрапляє на поверхню панелі під менш оптимальними кутами, що знижує коефіцієнт корисної дії всієї системи.

Трекінгові конструкції, на відміну від фіксованих, використовують динамічний принцип зміни орієнтації сонячних панелей залежно від руху Сонця по небосхилу. Завдяки цьому фотомодулі постійно підтримують максимально ефективне положення відносно джерела світла, що дозволяє значно збільшити обсяг виробленої електроенергії. Такий підхід реалізується за допомогою складніших інженерних рішень – використання сервомоторів, електроприводів, мікроконтролерів і систем керування, які забезпечують обертання або нахил панелі в одній або двох площинах.

Трекінгові конструкції можуть бути:

– одновісні, які дозволяють повертати панель по одній осі;

– двовісні, які дають змогу точно орієнтувати панель у будь-якому положення для досягнення найкращого кута падіння променів.

Завдяки можливості безперервного орієнтування на джерело світла трекінгові системи дозволяють підвищити річний показник генерації електроенергії на 25-40% у порівняння з фіксованими конструкціями. Цей приріст є особливо відчутним у регіонах з високою інтенсивністю сонячного

випромінювання або в умовах обмеженої площі встановлення, де максимізація енерговіддачі на одиницю площі має критичне значення.

Однак слід враховувати, що трекінгові системи мають низку недоліків. По-перше, вони значно дорожчі у реалізації через складність конструкції та необхідність використання електронних компонентів. По-друге, такі системи потребують регулярного технічного обслуговування – змащення механізмів, перевірки моторів, контролю електроніки, що збільшує експлуатаційні витрати. Також вони є більш чутливими до зовнішніх факторів, таких як вітер, опади або обмерзання, що вимагає додаткових заходів захисту та стабілізації (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик конструкцій

Характеристика	Фіксовані конструкції	Трекінгові конструкції
Орієнтація панелі	Статична	Динамічна, змінюється
Складність конструкції	Проста	Складна
Вартість	Низька	Зазвичай висока
Рівень генерації енергії	Стабільний, нижчий	Вищий на 25-40%
Обслуговування	Мінімальне	Регулярне
Залежність від погоди	Низька	Середня

Фіксовані конструкції відзначаються простотою і низькими витратами, що робить їх придатними для масового побутового використання. Водночас, трекінгові конструкції, хоча й дорожчі у впровадженні та обслуговуванні, дають змогу істотно збільшити виробіток електроенергії. Це особливо актуально у віддалених районах, для автономних систем живлення або коли площа встановлення обмежена. В умовах інтенсивного сонячного випромінювання використання трекера повністю себе виправдовує.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТРЕКІНГОВОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розробка структурної схеми

Розробка трекінгової системи розпочинається з побудови структурної схеми, яка наочно ілюструє логіку функціонування пристрою, взаємозв'язки між його основними апаратними складовими та принципи їхньої взаємодії. Така схема дозволяє систематизувати процес проектування, виокремити ключові елементи управління, сенсорики та привідної частини, а також визначити поряд обміну інформацією між ними.

Структурна схема системи (рис. 2.1) демонструє загальний алгоритм функціонування робота-трекера, від моменту сприйняття світлового сигналу до фізичного переміщення панелі в потрібному напрямку.

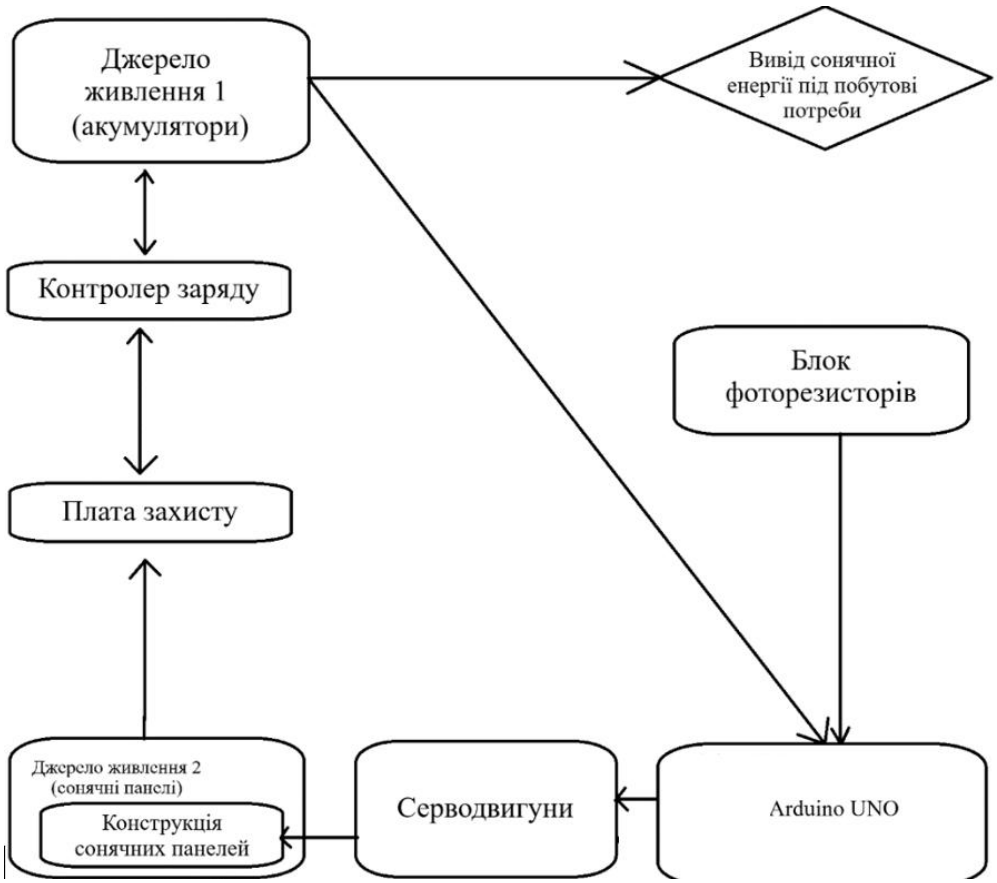

Рисунок 2.1 – Структурна схема робота-трекера

Основна мета функціонування трекінгової системи – забезпечення максимально точного орієнтування сонячних панелей відносно положення Сонця в реальному часі. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність перетворення сонячної енергії у порівнянні зі статичними системами. Точність позиціонування панелі забезпечується завдяки безперервному аналізу рівня освітленості з різних напрямків і відповідному коригуванню положення панелі за допомогою виконавчих механізмів.

В основі системи відстеження – мікроконтролер. Він відповідає за обробку інформації, що надходить від датчиків, та формування команд для руху платформи. Його інтеграція зумовлена здатністю працювати з багатьма сигналами одночасно, підтримкою різноманітних бібліотек, сумісністю з широким переліком електронних деталей, а також можливістю адаптивного управління, що базується на програмному забезпеченні. Обчислювальних ресурсів достатньо для виконання алгоритму, який ґрунтується на порівнянні освітленості з різних сторін. Завдяки цьому система реагує на зміни навколишнього середовища логічно та оперативно, не вимагаючи складних математичних обчислень.

Сенсорна система працює через аналіз відмінностей у яскравості, отриманої з чотирьох різних напрямків. Світлочутливі компоненти розташовані по квадрату навколо центрального непрозорого бар'єру, формуючи чіткі зони затінення та освітлення, що залежить від розташування джерела світла. Відмінності в інтенсивності світла між протилежними сенсорами створюють сигнал, що несе інформацію про напрям переміщення Сонця на небосхилі. Обчислювальний блок використовує ці різниці для визначення, в якому напрямку та наскільки потрібно перемістити платформу. Метод базується на градієнтному принципі – порівнянні, а не вимірюванні абсолютного положення. Цей підхід дозволяє уникнути застосування дорогих датчиків кута, енкодерів або астрономічних розрахунків.

Орієнтування реалізується за допомогою двовісного механізму, що дає змогу здійснювати повороти у двох взаємно перпендикулярних площинах. Така конструкція надає платформі здатність змінювати кут нахилу, як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках, гарантуючи точне наведення на джерело світла протягом усього світлового дня. Приводи характеризуються високою швидкістю реагування на зміни вхідних параметрів, відмінною стабільністю у зафіксованому положенні та повною сумісністю з цифровою системою управління. Розвинена інтеграція з мікроконтролером забезпечує ефективне перетворення логічних сигналів у механічні дії без необхідності додаткових проміжних операцій, що сприяє підвищенню надійності та зменшенню інерційності системи.

Енергетична незалежність реалізується завдяки акумуляторному живленню, що дозволяє системі працювати без підключення до зовнішніх мереж. За стабільність процесів зарядки та розрядки відповідає захисна електронна схема, які унеможливлює перегрів, короткі замикання і передчасне зношення акумулятора. Ця енергетична система ідеальна для використання там, де немає стаціонарного джерела живлення, або доступ до інфраструктури обмежений.

Для забезпечення безперебійної роботи електронних пристроїв використовується модуль перетворення напруги. Він регулює рівень напруги, що надходить, незалежно від фактичного стану акумуляторів. Завдяки цьому система функціонує навіть тоді, коли енергетичний потенціал джерела живлення зменшується, що є критичним для безперервної роботи протягом усього дня. На виході зберігається стабільний струм, гарантуючи безперебійну роботу чутливих до коливань напруги електронних компонентів.

2.2 Вибір компонентної бази

2.2.1 Аналіз характеристик платформи Arduino UNO

Для подальшої реалізації макету сонячного трекера необхідно здійснити вибір основних компонентів, які будуть задіяні у складі пристрою. В першу чергу

слід визначитися з апаратною платформою, яка відповідатиме за обробку вхідних даних, виконання алгоритму керування та формування керуючих сигналів для виконавчих елементів. У даному проекті такою платформою обрано Arduino UNO R3.

Arduino UNO R3 – це універсальна мікроконтролерна плата, побудована на основі мікроконтролера ATmega328P, яка добре зарекомендувала себе у багатьох аматорських, освітніх та навіть професійних проектах завдяки своїй стабільності, доступності та гнучкості використання (рис. 2.2).

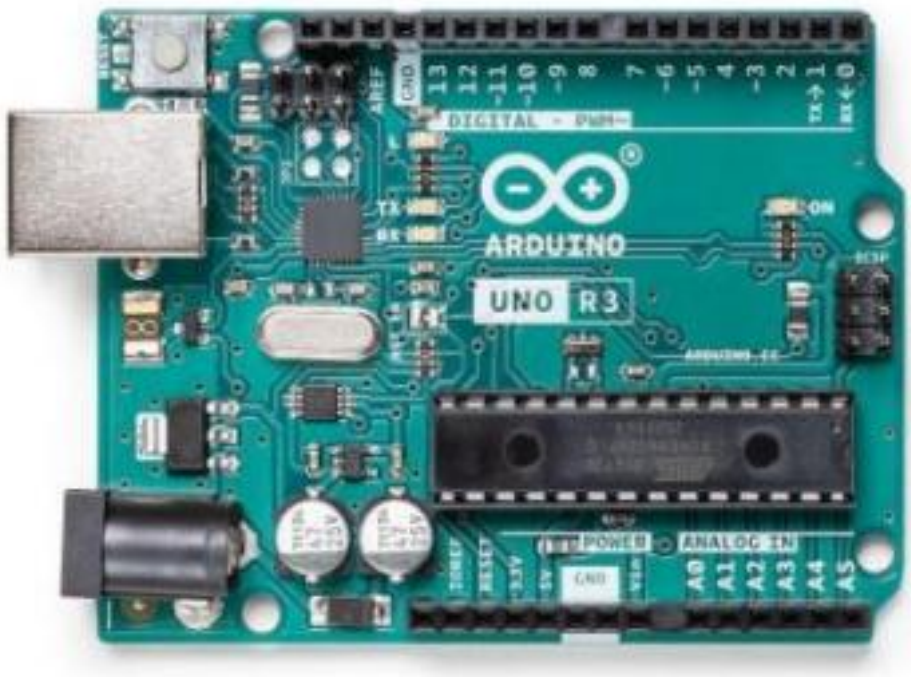

Рисунок 2.2 – Arduino UNO R3 [6]

Ця плата має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких підтримують широтно-імпульсну модуляцію – ШІМ), що дозволяє створювати гнучкі схеми керування різними пристроями – від світлодіодів до двигунів. Також присутні 6 аналогових входів, які дозволяють підключати датчики з аналоговим виходом, зокрема фоторезистори, що використовуються у сенсорній частині трекера.

До додаткових апаратних можливостей плати належать: кварцовий

генератор на 16 МГц, роз'єм USB Type-B для підключення до комп'ютера або джерела живлення, роз'єм живлення DC Jack, інтерфейс програмування ICSP, кнопка Reset для перезапуску мікроконтролера. Для запуску плати достатньо підключити її до ПК через USB, або подати живлення від зовнішнього джерела – батареї, адаптера змінного/постійного струму.

Живлення плати може відбуватися за допомогою її підключення до комп'ютера шнуром USB Type B, або за допомогою блока живлення від 6В до 20В з низьким рівнем пульсації.

Основні характеристики наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики платформи Arduino UNO R3 [6]

Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	Від 7 В до 12 В
Вхідна напруга (гранична)	Від 6 В до 20 В
Цифрові входи/виходи	14 (6 з яких можуть використовуватись як виходи для ШІМ)
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Постійний струм для виводу 3.3В	50 мА
Флеш-пам'ять	32 Кб (ATmega328) із яких 0,5 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	2 КБ (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	50,8 мм x 66,04 мм

Arduino UNO R3 було обрано для реалізації цього проекту на основі таких ключових переваг:

– доступність: плата є дешевою в порівнянні з аналогічними мікроконтролерними рішеннями, що дозволяє зменшити загальну вартість проекту;

– підтримка інтерфейсу I²C: що забезпечує зручне підключення модулів, дисплеїв, датчиків та інших пристроїв;

– інтуїтивне середовище розробки Arduino IDE: дозволяє швидко створювати, налагоджувати та компілювати програми навіть новачкам у мікроконтролерах;

– модульність конструкції: завдяки стандартним роз'ємам, до плати можна легко підключати зовнішні пристрої (сенсори, серводвигуни тощо) без потреби у пайці;

– широкий вибір бібліотек: спільнота Arduino створила тисячі бібліотек для роботи з усіма можливими компонентами, що значно спрощує розробку;

– низьке енергоспоживання: забезпечує тривалу автономну роботу пристрою від батарей або акумуляторів;

– точне керування сигналами: повний контроль над часом, частотою і тривалістю ШІМ-сигналів, що критично важливо при управлінні сервоприводами.

На рисунку 2.3 наведено розпіновку плати Arduino UNO R3, яка дозволяє зрозуміти фізичне розташування входів/виходів та допомагає у процесі розведення схеми підключення компонентів.

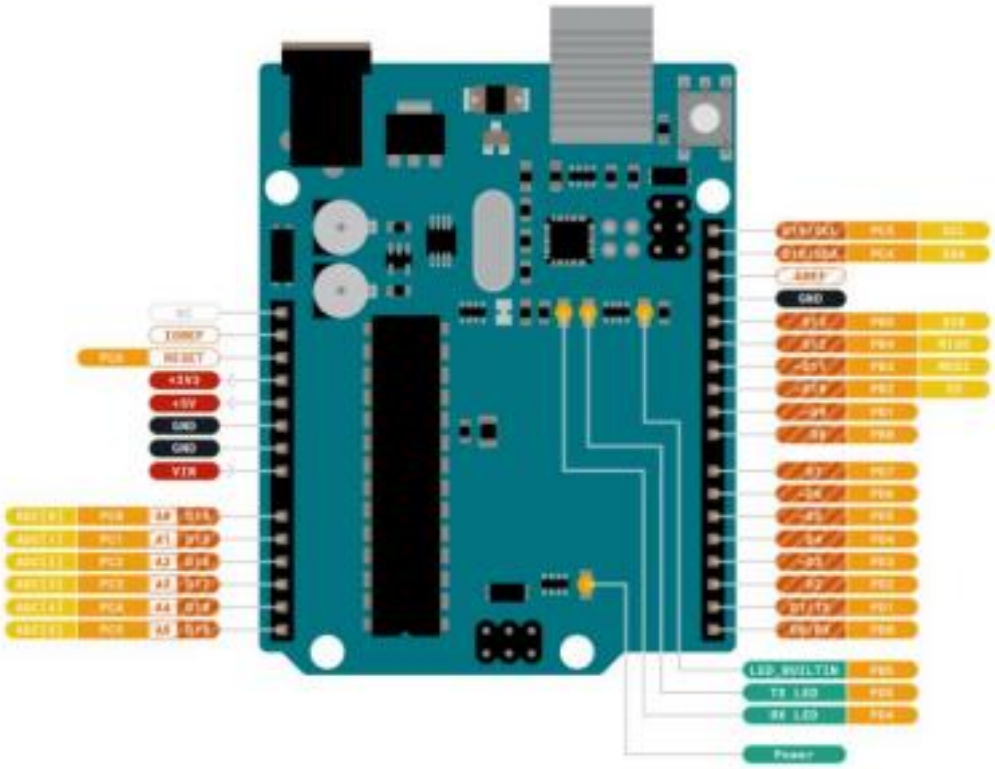

Рисунок 2.3 – Роспіновка Arduino UNO R3 [6]

2.2.2 Аналіз характеристик сонячних панелей

Сонячні панелі, застосовані в цьому проекті, виготовлені з монокристалічного кремнію та слугують для перетворення сонячної енергії на електричну. Їх номінальна потужність дорівнює 30 Вт при робочій напрузі 9 В. У точці найбільшої потужності вони генерують струм близько 1,67 А. Напруга холостого ходу панелей коливається в межах 10,5–11,0 В, а струм короткого замикання сягає 1,80–1,85 А, що вказує на їх високу чутливість до сонячного випромінювання.

Коефіцієнт заповнення (Fill Factor) становить приблизно 0,75, що є типовим значенням для даного типу фотоелементів. Орієнтований ККД панелей складає від 16% до 18%, залежно від умов експлуатації. Це забезпечує досить високу ефективність перетворення сонячного світла в електричну енергію навіть при помірному рівні освітленості.

Панелі здатні працювати в широкому діапазоні температур – від -40 °C до +85 °C, що дозволяє використовувати її у зовнішніх системах протягом усього року. Габаритні розміри однієї панелі становлять приблизно 325 мм x 23,5 мм x 3 мм, що робить її зручною для монтажу в мобільних або компактних конструкціях. Маса однієї панелі становить близько 0,8 кг, а захисне покриття з загартованого скла забезпечує стійкість до механічних пошкоджень та атмосферного впливу. Ступінь захисту відповідає класу IP65, що гарантує пилонепроникність і захист від водопроникнення.

2.2.3 Аналіз системи приводів та сенсорів у трекері

В будь-якому автоматизованому механізмі керування положенням об’єкта, зокрема у системі орієнтації сонячних панелей за сонцем, критичну роль відіграє якість та надійність виконавчих механізмів і датчиків зворотного зв’язку. В умовах обмежених ресурсів, просторових обмежень і вимог до енергоефективності, вибір компонентів системи управління повинен бути обґрунтованим не тільки з технічної, а й з економічної точки зору.

У використаній схемі конструкції використовуються два сервоприводи типу TowerPro MG996R, які забезпечують рух платформи у двох площинах (рис. 2.4) [7].

Рисунок 2.4 – Сервопривід TowerPro MG996R [7]

Кожен із сервоприводів має компактну конструкцію (рис. 2.5-2.6), працює за принципом пропорційного керування положенням валу за допомогою ШІМ, що генерується мікроконтролером. Характеристики сервоприводу наведені в таблиці 2.2.

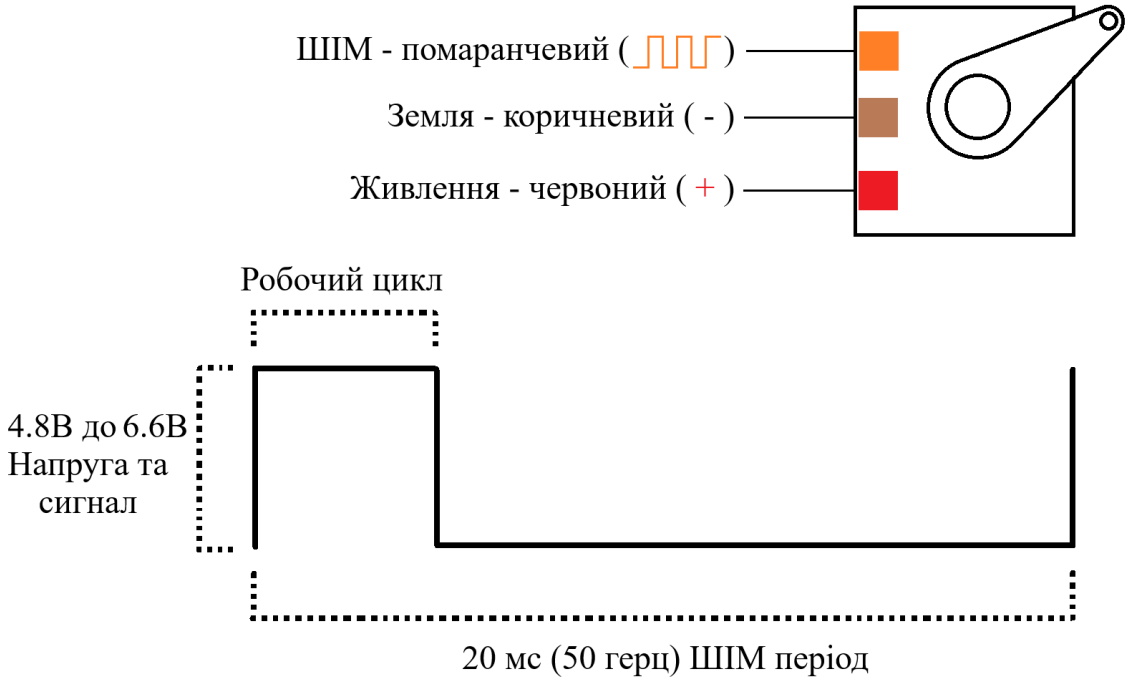

Рисунок 2.5 – Принцип пропорційного керування положенням валу

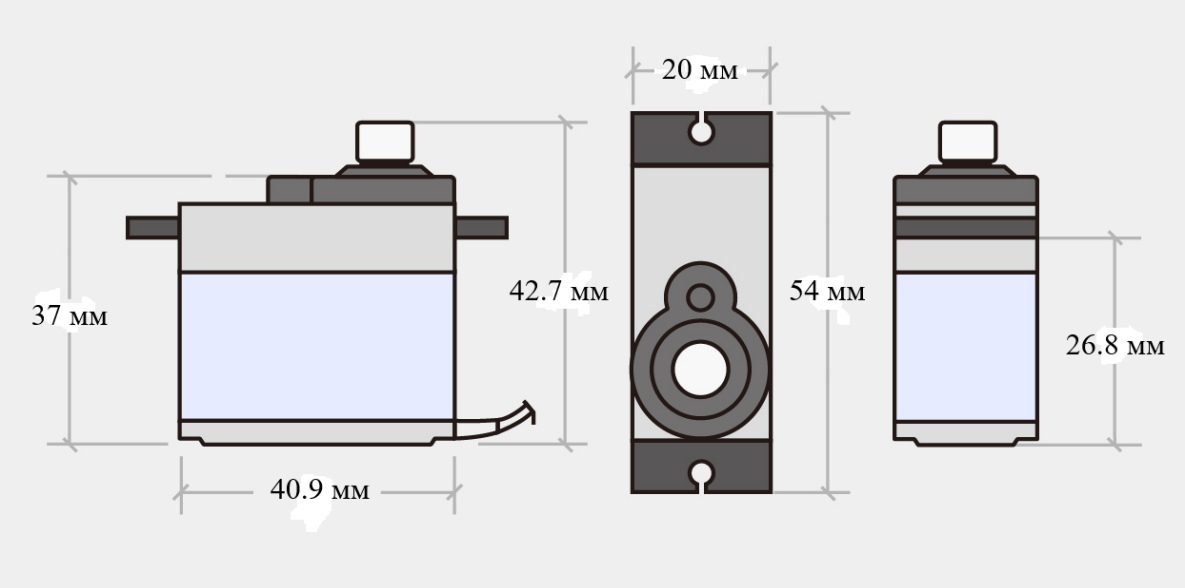

Рисунок 2.6 – Конструкція сервоприводу

Таблиця 2.2 – Характеристики сервоприводу MG996R [7]

Параметр	Значення
Вага	55 грамів
Крутний момент, кг/см (4,8В)	9,4 кг/см
Швидкість оберту, с/60 град.	0,17 с
Вхідна напруга	4,8-6,6 В
Робочий струм	500-900 мА (6 В)
Довжина дроту	32 см
Матеріал механізму	Металевий

Завдяки високому крутному моменту MG996R здатен ефективно переміщати платформу з сонячною панеллю навіть при зовнішньому навантаженні (наприклад, вітровому тиску).

Також, зазвичай, в комплекті до серводвигунів є допоміжні насадки на вал, які допомагають міцно закріпити конструкцію, щоб зчеплення з конструкцією було незворушним (рис. 2.7).

Рисунок 2.7 – Насадки на вал серводвигуна

Для визначення положення сонця використовуються чотири фоторезистори GL5528 (рис. 2.8) – пасивні напівпровідникові компоненти, чутливі до світла, і належать до класу резистивних сенсорів, параметри яких змінюються залежно від інтенсивності освітлення. Матеріалом фоточутливого шару у даній моделі є сульфід кадмію (CdS), який забезпечує стабільну спектральну чутливість у межах видимого діапазону.

Рисунок 2.8 – Модель фоторезистора

При зміні рівня освітленості фоторезистор демонструє обернену залежність між опором і інтенсивністю світла: чим більше світла падає на поверхню сенсора, тим меншим стає його електричний опір. У темряві опір GL5528 може перевищувати 1 МОм, тоді як при сильному освітлення (10-100 лк) опір зменшується до 10-20 кОм. Зміна опору має нелінійний характер, і ця характеристика відома як “крива світлової провідності”. Така поведінка дозволяє використовувати елемент у схемах, де потрібне детектування змін у рівні

освітленості або світлового контрасту. Характеристика фоторезистору наведена у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристика фоторезистору GL5528

Опір при освітленості ~ 10 лк (при 25 °C)	8~20 кОм
Опір при освітленні 0 лк	1 МОм (мінімальний)
Значення гамми при 100-10 лк	0,7
Розсіювання потужності (при 25 °C)	100 мВт
Максимальна напруга (при 25 °C)	150 В
Довжина електромагнітного випромінювання на піку сенсорної чутливості	540 нм
Робоча температура	-30~+70 °C

Серед важливих параметрів варто відзначити час відгуку, що становить близько 20-30 мс, що вважається середнім значенням для фоторезисторів даного типу. Це означає, що елемент здатен з достатньою швидкість реагувати на зміну умов освітлення у реальному часі без значимої затримки. Робоча напруга GL5528 визначається не самим компонентом, а конфігурацією підключення у схемі – як правило, фоторезистор підключається до напруги 3,3 В або 5 В через подільник (резистор) напруги, що дозволяє отримати аналоговий сигнал на виході.

2.2.4 Аналіз системи перетворення струму та напруги

Система живлення сонячного трекера виконує одразу кілька функцій: забезпечує стабільну напругу для електронних компонентів, відповідає за заряджання акумуляторів і підтримує належний рівень струму для енергоспоживаючих вузлів. У зв’язку з тим, що напруга на виході сонячних панелей не відповідає робочій напрузі більшості компонентів схеми, у

конструкції реалізовано систему понижувальних та стабілізуючих перетворювачів, яка дозволяє адаптувати значення електричних параметрів у відповідності до вимог окремих елементів.

Первинне джерело живлення – сонячні панелі, вони забезпечують вихідну напругу близько 9 В, яка змінюється в залежності від умов освітлення та навантаження. Для перетворення цієї нестабільної напруги в придатну для зарядки акумуляторного блоку використовується понижувальний імпульсний стабілізатор напруги на базі модуля LM2596S (рис. 2.9) [8,9].

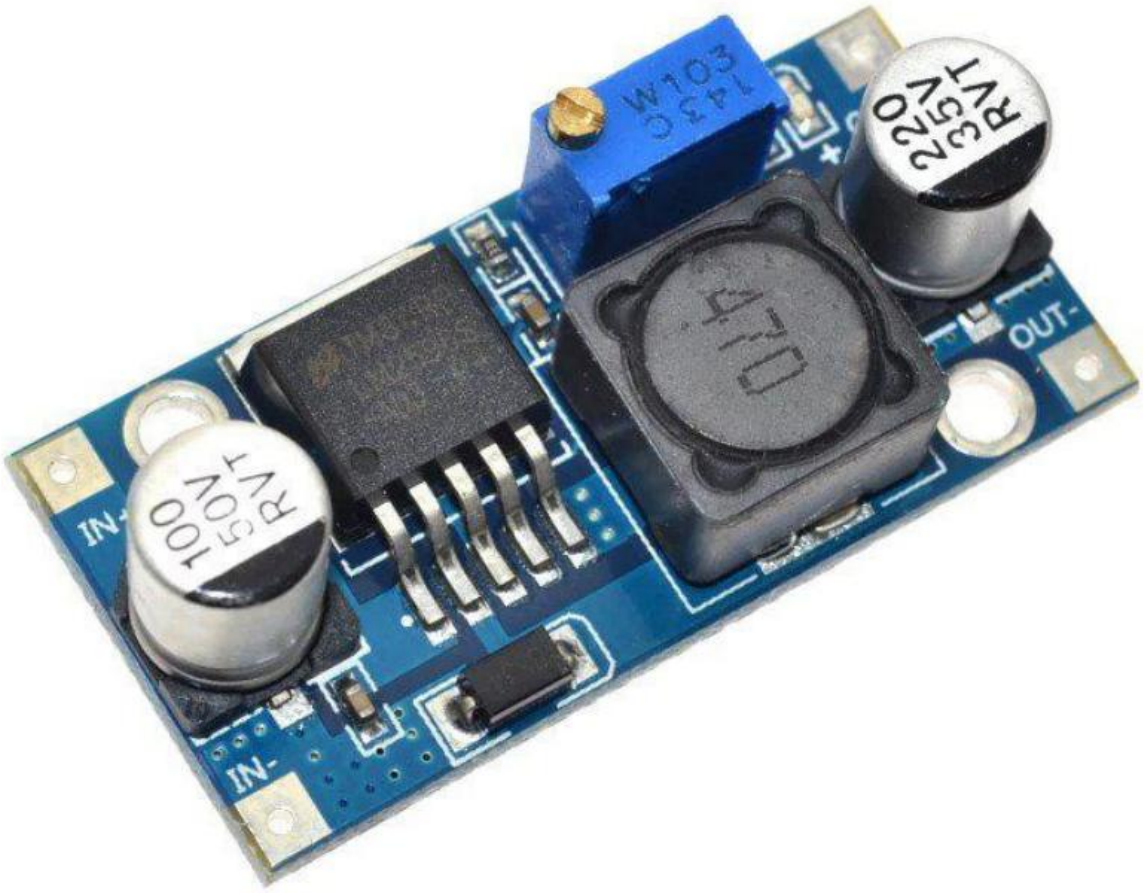

Рисунок 2.9 – Модель понижувального перетворювача LM2596S [8,9]

Даний перетворювач напруги здатний видавати струм до 3 А, працює на частоті 150 кГц та має високу ефективність близько 80%. На базі модуля

LM2596S існує можливість створити найпростіший блок живлення або зарядний пристрій. Технічні характеристики перетворювача вказані у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики модуля LM2596S [8,9]

Характеристика	Значення	Вимірювання
Вхідна напруга	4,5 - 40	В
Вихідна напруга	1,25 - 37	В
ККД	до 80	%
Частота перетворення	150	кГц
Мінімальна температура	-40	°С
Максимальна температура	+125	°С
Максимальний вхідний струм	3 (безперервний)	А
Піковий вхідний струм	до 6,9 (короткочасно)	А
Пікова напруга на виході	до 45	В

Після перетворення напруги для заряджання акумуляторного блоку живлення, вона, згідно електричній логіці має подаватися на контролер заряду. В даному випадку використовується контролер заряду з системою захисту – BMS (Battery Management System). Модуль BMS 2S є ключовим елементом забезпечення безпечної експлуатації акумуляторів (рисунок 2.10).

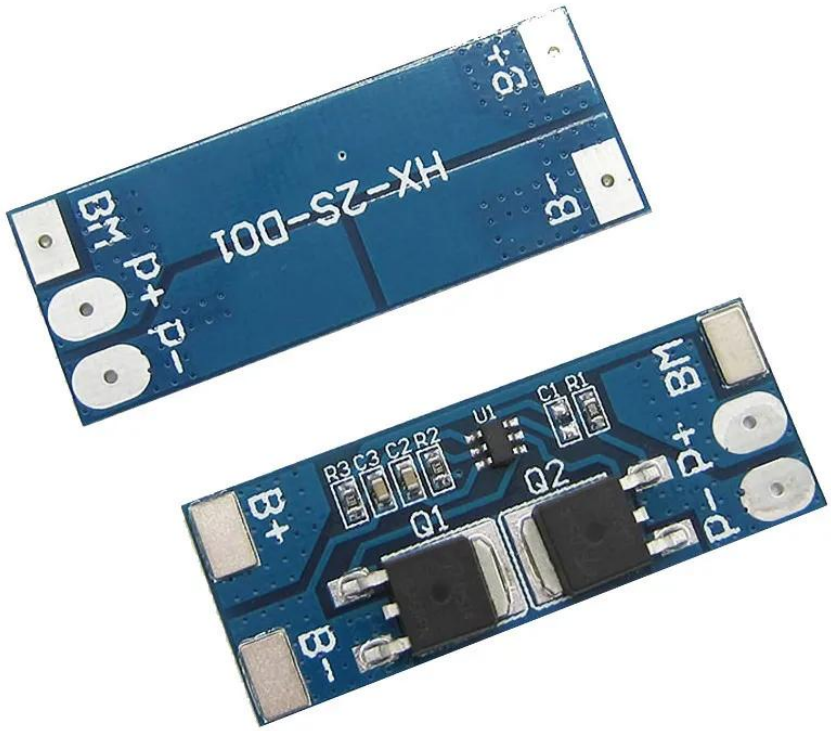

Рисунок 2.10 – Модуль BMS 2S HX-2S-D01

Його основна функція полягає у захисті акумуляторного блоку від критичних режимів роботи, таких як перезаряд, глибокий розряд, перевищення струму навантаження та коротке замикання. За конструкцією плата містить контролер захисту, два MOSFET транзистори для комутації живлення та резистивні елементи, що відповідають за контроль напруги та струму.

Основні характеристики наведені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Характеристики плати керування акумуляторним блоком

Параметри	Значення
Тип акумуляторів	Li-ion або LiFePO4
Максимальний зарядний струм	до 1,5 А
Максимальний струм навантаження	до 3 А
Захист від перезаряду	~ 4,25 В на кожну банку

Продовження таблиці 2.5

Параметри	Значення
Захист від глибокого розряду	~ 2,4 В на кожну банку
Захист від перевищення струму	при навантаженні > 3 А
Затримка спрацювання	~ 100 мс
Робоча температура	від -20 °C до +60 °C
Функція балансування	відсутня
Кількість пінів (контактів)	5

Плата підключається до акумуляторного блоку за схемою з окремим підключенням кожної секції. На відміну від більш складних BMS-систем, плата HX-2S-D01 не має активного або пасивного балансування заряду між елементами, тобто вона не вирівнює напругу окремих банок під час заряджання. У зв'язку з цим, у випадку тривалого використання акумуляторів без додаткової балансувальної схеми можливе накопичення розбалансу, що призведе до швидшого зносу одного з елементів і скорочення загального ресурсу батареї.

Проте для малопотужних пристроїв або систем з відносно низькими струмами споживання, наприклад таких як невеликі сонячні трекери, використання BMS без балансування є допустимим. За умов періодичного контролю напруги на кожній банці зовнішніми засобами або у разі періодичного ручного балансування (через зарядку кожної банки окремо) така система може стабільно функціонувати.

Перевагами обраної плати є компактність, низька вартість, простота реалізації у схемі та мінімальне тепловиділення при нормальному режимі роботи. Модуль легко інтегрується в схеми з понижувальними перетворювачами та дозволяє реалізувати захист програмного забезпечення.

Для захисту від зворотного живлення, а саме в сонячні панелі, що може призвести до короткого замикання, в електричній схемі використовується діод Шотткі, а саме модель 1N1819 (рис. 2.11).

Рисунок 2.11 – Вигляд моделі діоду Шотткі

Основна відмінність діодів Шотткі від стандартних кремнієвих діодів полягає у значно нижчому прямому падінні напруги, що дозволяє зменшити втрати потужності, а також у високій швидкості перемикання, що є критично важливим у імпульсних та комутаційних застосуваннях.

Діод 1N5819 розрахований на роботу з максимальною зворотною робочою напругою до 40 В і забезпечує постійний струм до 1 А, у разі короткочасних імпульсів струм може досягати 25 А, що дозволяє використовувати його в схемах з короткими піковими навантаженнями, під час вмикання, перемикання або різкого зростання освітлення сонячних панелей.

Пряме падіння напруги на діоді становить приблизно 0,45-0,60 В при номінальному струмі, що істотно менше, ніж у звичайних кремнієвих діодів (~0,7-1,0 В).

Корпус діоду виконаний у стандартному аксіальному форматі DO-41, що дозволяє зручно інтегрувати його у друковані плати, припаяти до дроту або використовувати його на макетних платах. Зазвичай такі діоди встановлюють на

+ одразу після основного живлення перед першим приймачем, оскільки це запобігає ситуаціям, коли у разі зниження напруги до наближеної до мінімуму, струм може протікати в зворотному напряму – назад до блоку живлення. Це не тільки може призвести до розряду акумуляторного блоку, а також до його пошкодження.

Характеристики діоду наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Характеристики діоду Шотткі моделі 1N5819

Параметр	Значення
Максимальна зворотна напруга	40 В
Середній прямий струм	1 А
Піковий імпульсний струм	25 А
Пряме падіння напруги	0,60 В
Зворотній струм витоку	до 1000 мкА
Ємність переходу	110 пФ
Робочий температурний діапазон	-65 °C ~ +125 °C
Корпус	DO-41

1N5819 має низьке пряме падіння напруги, тому не створює суттєвих втрат потужності. У порівнянні зі звичайними випрямними діодами, 1N5819 дозволяє зберегти більше енергії, зменшити тепловиділення і працювати ефективно навіть при невеликих струмах генерації від сонячних панелей.

Також, щоб запобігти ситуаціям імпульсних перенапруг, в системах живлення часто використовують елементи захисту, здатні подавляти перенапругу. Одними із найефективніших і водночас простих у застосуванні рішень є діоди TVS (Transient Voltage Suppression). Вони реагують на стрибки напруги практично миттєво – в межах наносекунд – і відводять надлишкову енергію, запобігаючи її проникненню в чутливу частину схеми.

У рамках конструкції, що розроблюється, застосовується TVS-діод моделі 1.5KE12A, який є однонаправленим, тобто він захищає тільки в одному напрямку струму (рис. 2.12).

Рисунок 2.12 – Супрессор 1.5KE12A

У нормальних умовах діод не проводить струм і залишається в режимі високого опору. Коли прикладена напруга перевищує певний поріг – так звану напругу пробою – діод переходить у режим провідності, ефективно шунтуючи надлишковий імпульс на землю або спільну точку ланцюга.

Номінальна напруга утримування для цієї моделі становить 10 В (тобто діод не проводить струм до цієї межі), пробій відбувається при 11,4-12,6 В, а напруга обмеження до 16,7 В. Це означає, що в разі перенапруги діод здатен обмежити її до безпечного значення нижче 17 В [10].

Він здатен розсіювати імпульсну потужність до 1,5 кВт при 10/1000 мкс імпульсах (згідно зі стандартної формою хвилі імпульсного навантаження), а

максимальний піковий струм може досягати 90 А (табл. 2.7). Завдяки надшвидкому часу реакції компонент надійно захищає ланцюг до того, як перенапруга встигне пошкодити інші елементи.

Таблиця 2.7 – Параметри діоду 1.5KE12A

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Тип діода	Однонаправлений	–
Максимальна імпульсна потужність (10/1000 мкс)	1500	Вт
Напруга утримання	10,2	В
Напруга пробою	11,4 – 12,6	В
Напруга обмеження	16,7	В
Максимальний імпульсний струм	91	А
Струм витоку	5	мкА
Максимальна пряма напруга при 25 А	3,5	В
Час реакції	< 1	нс
Робочий температурний діапазон	-55 … +150	°С

3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОТА-ТРЕКЕРА ДЛЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1 Алгоритмічна схема роботи системи

Алгоритм функціонування системи сонячного трекера базується на втіленні принципу автоматичного орієнтування фотомодуля в бік найбільшої освітленості. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати енергію сонячного випромінювання впродовж усього світлового дня. Системи забезпечує двовісне стеження за положенням Сонця в реальному часі з застосуванням мікроконтролера Arduino, чотирьох фоторезисторів і двох сервоприводів.

Після подачі живлення на пристрій мікроконтролер переходить в режим ініціалізації. В цьому режимі виконується налагодження внутрішніх аналогових входів, під'єднання сервоприводів до відповідних цифрових пінів, та визначення початкового положення обертання панелі. Це положення зазвичай обирається як нейтральне – посередині наявного діапазону, що дає змогу однаково обертатися як вліво чи вправо, так і вгору чи вниз. На цьому етапі також можуть виконуватися короткі затримки (delay), які дають час сервоприводам увійти в початкове положення без різких обертів, що дозволяє уникнути механічного та електричного перенавантаження.

Після ініціалізації система переходить до циклічного порядку роботи. У першому кроці циклу відбувається зчитування аналогових сигналів з чотирьох фоторезисторів, котрі умовно поділяються на верхній лівий, верхній правий, нижній лівий та нижній правий. Все фоторезистори утворюють подільники напруги, опір котрих змінюється залежно від світла. Значення, які надходять на входи Arduino, є цифровими відображеннями аналогової освітленості,

вираженими в діапазоні 0-1023 одиниці. Отримані чотири значення дозволяють визначити рівень освітлення кожного квадранта сенсорного поля.

Наступним кроком є математична обробка отриманих сигналів. Виконується обчислення середніх значень для пари верхніх лівого та правого сенсорів – умовно верхнє освітлення, а також для нижніх – нижнє освітлення. Отримані значення розраховуються арифметично (наприклад, (верхній лівий + верхній правий) / 2). На основі отриманих середніх значень обчислюються диференціали:

dvert = top – bottom, де dvert – середнє вертикальне значення;

dhoriz = left – right, де dhoriz – середнє горизонтальне значення.

Ці два параметри відповідають за прийняття рішення щодо вертикального та горизонтального положення панелі. Якщо значення dvert позитивне – освітлення більше зверху, і потрібно повернути панель вгору; якщо негативне – світло переважає знизу. Аналогічно обробляється dhoriz.

Щоб уникнути постійного коливання платформи через незначні відхилення освітленості, вводиться поняття порогового значення чутливості (tol). Якщо абсолютне значення dvert або dhoriz менше порогового – переміщення не здійснюється. Це дозволяю уникнути «дрижання» платформи через електричний шум або незначні світлові коливання. Якщо ж різниця перевищує порогову величину, наприклад 50 одиниць – система переходить до фази корекції положення.

Для кожного напрямку (горизонтального та вертикального) передбачено окремий сервопривід. Якщо напрямок змін потрібно – наприклад, освітлення зліва значно сильніше за праве – значення кута горизонтального серво збільшується або зменшується на невеликий крок (від 1 градуса до 5 градусів).

Перед записом нового положення до сервоприводу виконується перевірка: чи не перевищує нове значення допустимі межі обертання (від 0 градусів до 180 градусів). Якщо кут виходить за межі – він обмежується граничними значеннями.

Сервоприводи отримують сигнал керування за допомогою ШІМ. У результаті обертання відбувається поступово, з затримками (delay), що забезпечує плавність рухів і зменшує механічне навантаження.

Після завершення кожного циклу переміщення або очікування система переходить у режим затримки (пауза від 300 мс до 1 с), після чого алгоритм повторюється з початку – зчитуються нові значення освітленості, і цикл відбувається знову (рис. 3.1).

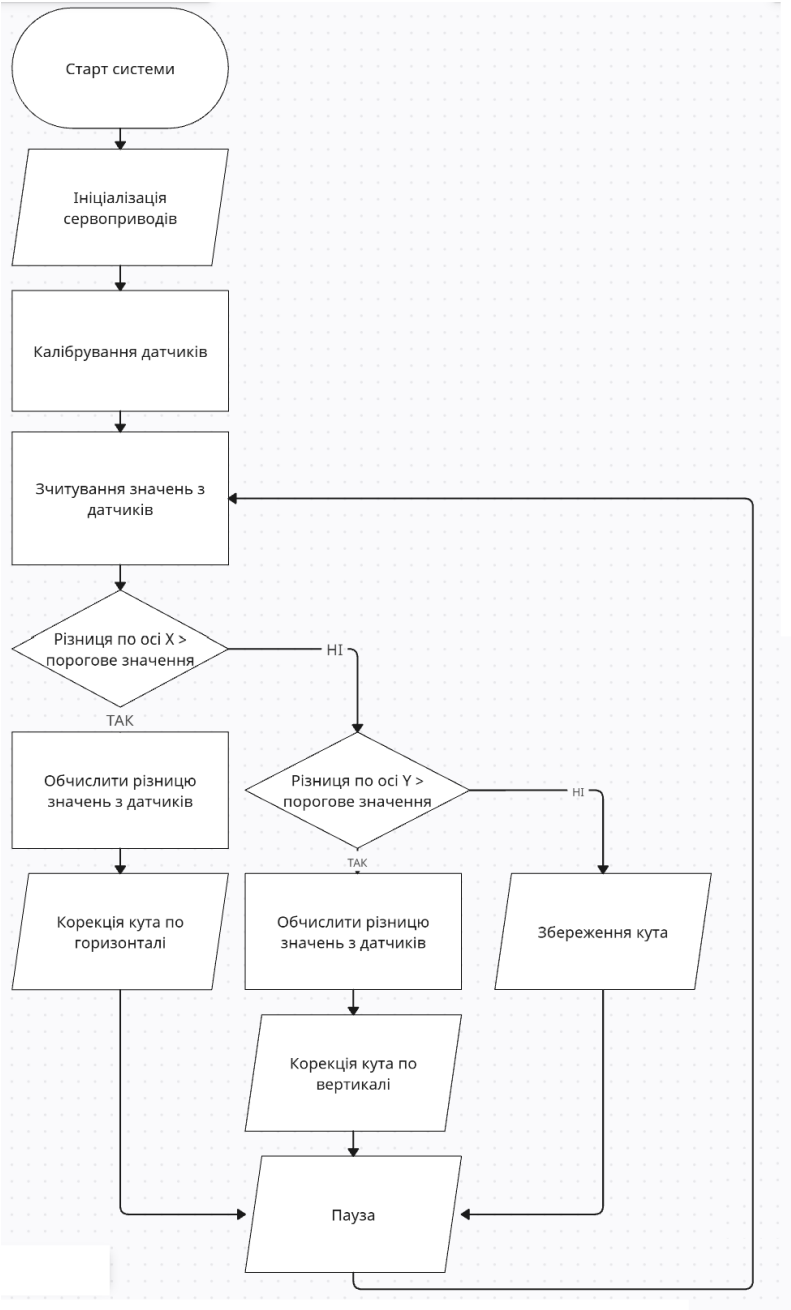

Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи робота-трекера

Таким чином реалізується постійне слідкування за напрямком сонячного світла з періодичним оновленням положення панелі. Алгоритм працює в реальному часі та не потребує ручного втручання після запуску.

3.2 Розробка схеми підключення елементів

Після аналізу апаратних компонентів системи було розроблено повну схему підключення, яка забезпечує їх взаємодії в межах одного функціонального комплексу. Метою при створенні схеми було не лише з'єднання елементів, а й забезпечення стійкості, захищеності та ефективності роботи всієї системи в умовах автономного живлення.

Усі компоненти умовно згруповано у такі підсистеми:

– блок логіки керування (Arduino);

– блок сенсорів освітленості;

– блок виконавчих механізмів (сервоприводи);

– блок живлення та захисту;

– блок зовнішнього живлення.

Збірка електричної схеми виконана у програмному забезпечені Fritzing перед виконанням її на практиці має декілька важливих переваг – планування, організація, можливість запобігти помилок (наприклад, порушення логіки живлення) (рис. 3.2) [11].

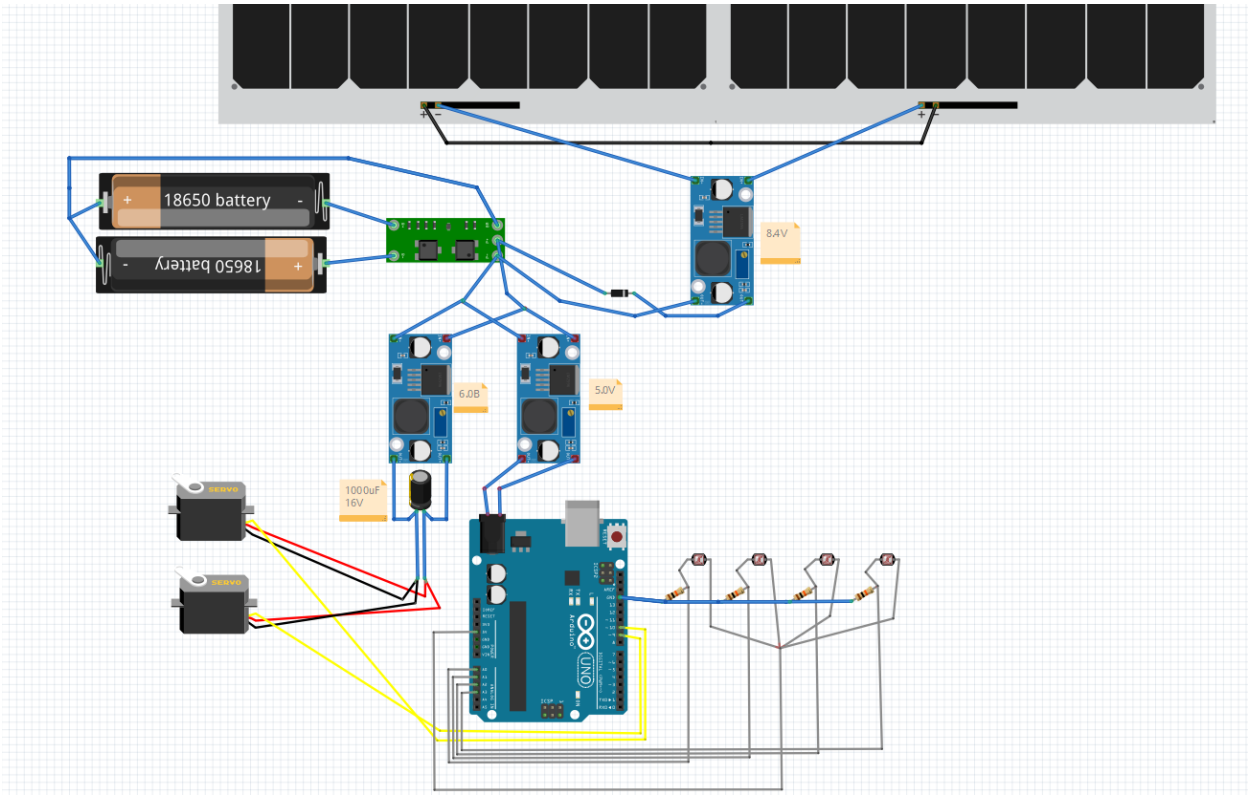

Рисунок 3.2 – Попередня схема підключення елементів

За допомогою візуальної схеми можна підібрати зручний та скомпонований вид підключення елементів і дротів, що спрощує процес монтажу. Ще одним корисним аспектом є можливість візуалізації обчислень. За допомогою програмного забезпечення можна без проблем здійснити розрахунки для визначення характеристик складових, наприклад резисторів, конденсаторів, що унеможливлює використання невідповідних елементів. Крім того, вагоме значення має оптимізація. Спроможність випробувати різні варіанти розташування компонентів і прокладання доріжок у програмному середовищі дає змогу обрати найефективніший варіант. Що спрощує подальше складання та технічне обслуговування пристрою. Підсумовуючи, розробка електричної схеми стала критичним кроком, що гарантує продуктивність, безпеку та якість кінцевого електричного пристрою. Схема в програмі – це не кінцева версія, а початкова концепція, оскільки за нею було створено перший реальний макет, та за допомогою цієї схеми було знайдено декілька недоліків.

За схемою на рис. 3.2 видно, що живлення від сонячних панелей йде одразу на плату зниження напруги LM2596. Через те, що сонячні панелі можуть використатися при хмарній погоді, то коли сонце виходить з-за хмари – різко і стрімко з панелей на плату подається велика напруга, що може призвести до її пошкодження або повного виведення з ладу. Завдяки цьому в схему системи після сонячних панелей була потреба встановити супрессор – TVS-діод 1.5KE12A для захисту від перенапруги (рис. 3.3).

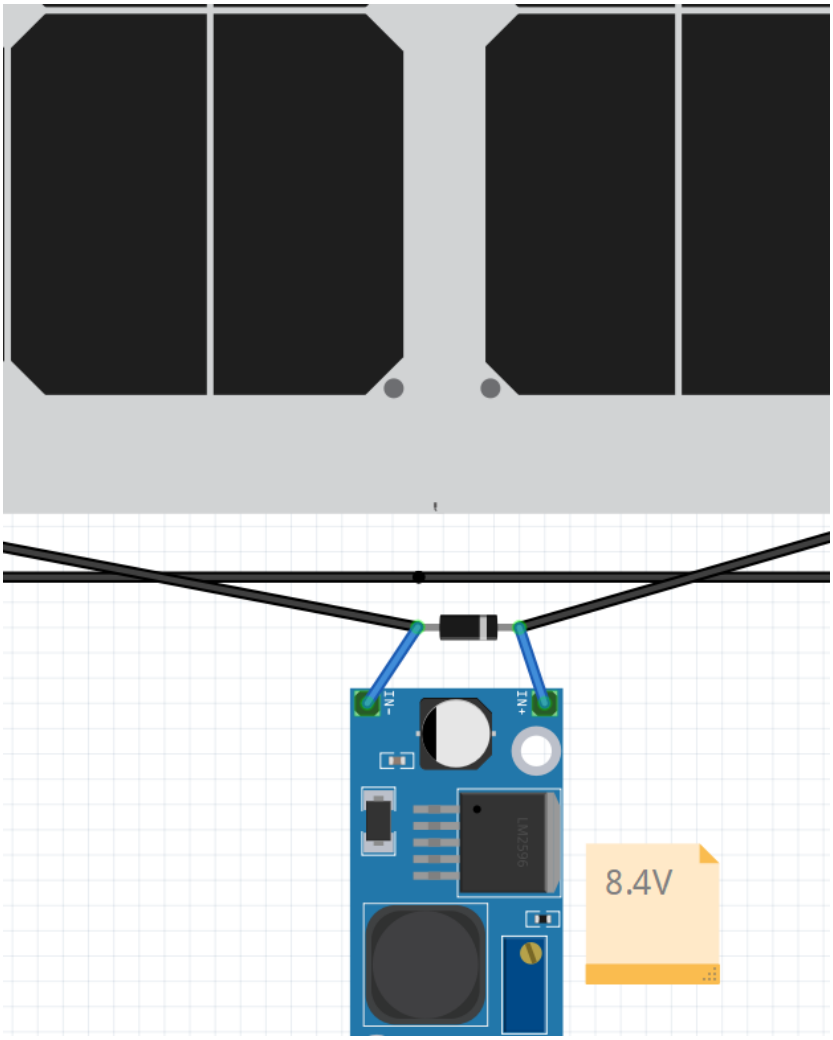

Рисунок 3.3 – Доданий супрессор на вхід перетворювача напруги

Після цього було замінено конденсатор 1000 мкФ 16 В на 2 конденсатори 1000 мкФ 25 В, які були з’єднані послідовно (рис. 3.4). Оскільки у програмній частині Arduino UNO R3 є недолік – серводвигуни не цифрові і вони не можуть

передати на мікроконтролер плати керування інформацію про положення валу серводвигуна у реальному часі, а також Arduino при ініціалізації “перезавантажує” серводвигуни і вони з перших секунд, перед тим як почнеться зчитування сенсорів, стрімко повертаються в нульове (0 градусів) положення. Через що, при таких різких поворотах, миттєве споживання струму ~2 А на старті, LM2596 не встигає збалансуватися та сервоприводи починають рухатися ривками або працювати повільніше. Задля запобігання цьому встановлюються конденсатори, які будуть згладжувати струм який йде від понижувального модуля.

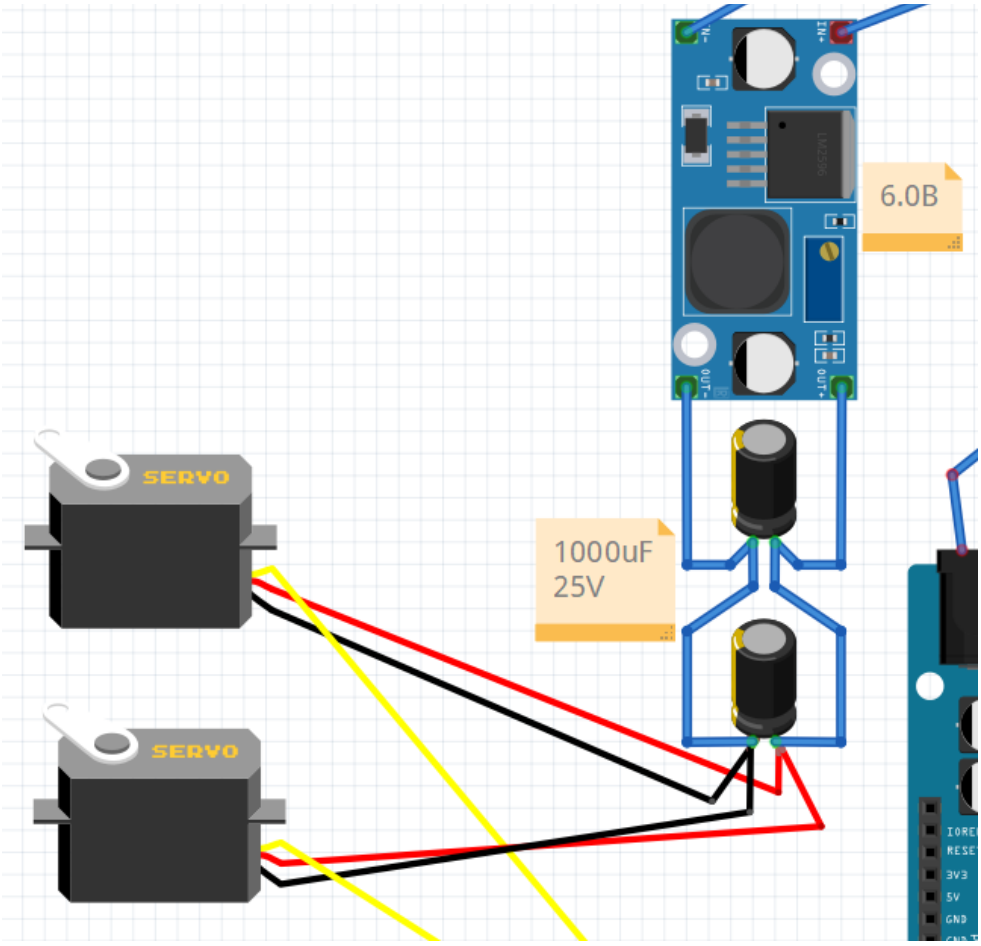

Рисунок 3.4 – Підключення конденсаторів послідовно

Також для “чистоти” роботи до схеми було додано вимикачі системи, які зображено на рисунку 3.5.

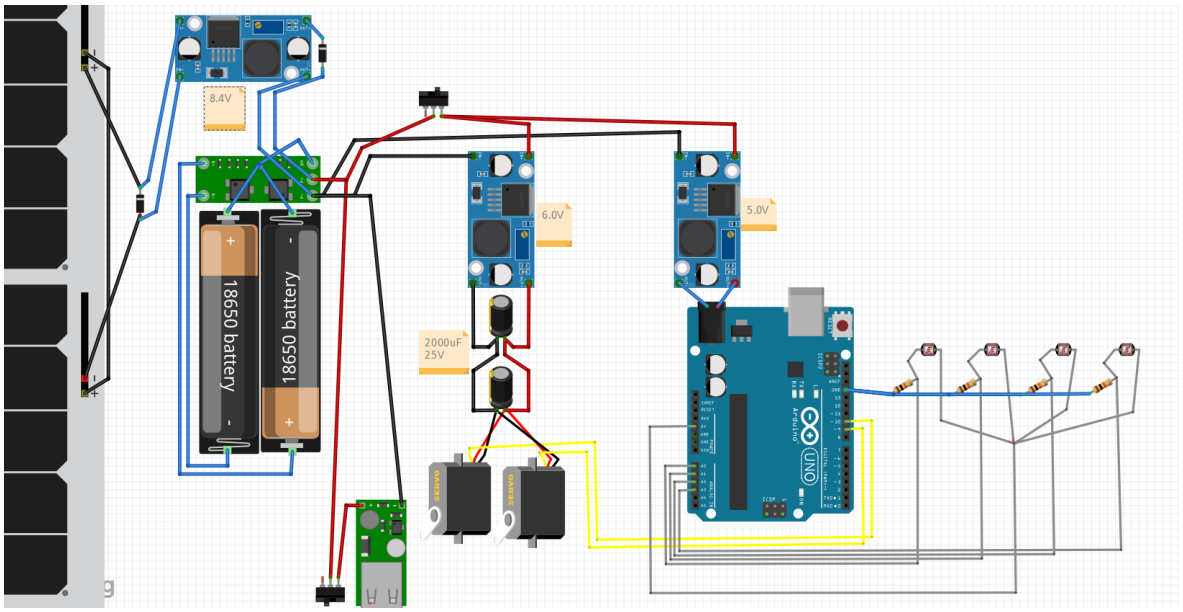

Рисунок 3.5 – Електрична схема проекту

Завдяки вимикачу користувач може в будь-який час ввімкнути або вимкнути систему за потреби, наприклад для заміни акумуляторного блоку або для корегування системи.

Також додано USB-модуль для використання накопичуваної на сонці енергії у побутових потребах, наприклад, заряджання мобільного пристрою (рис. 3.6).

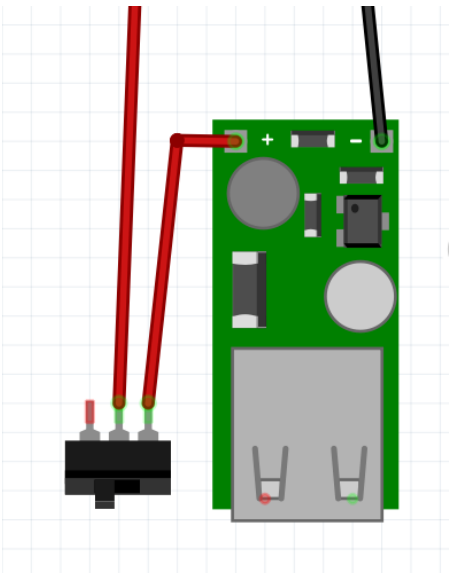

Рисунок 3.6 – Зарядний USB-модуль

До нього також додано вимикач, для використання модуля лише за потреби, оскільки залишивши його постійно ввімкненим – витік струму, навіть мінімального призведе до розряджання акумуляторного блоку, хоч і поступово.

3.3 Розробка конструкції та встановлення усіх компонентів

Для розробки каркасу робота було обрано одразу декілька матеріалів. Основа, на якій тримається уся конструкція виготовлена з OSB-плити, завдяки якій було зроблено ніжки та поверхню під обертаючу платформу.

OSB-плита має структуру листового будівельного матеріалу, виготовленого шляхом пресування великих деревних стружок (опилків або щепи), орієнтовані у певному напрямку з використанням синтетичних смол. Такі плити легко піддаються механічній обробці, утримують шурупи, цвяхи, це робить їх корисними при конструюванні робота.

Також використовувалась фанера, завдяки якій було виготовлено рамку, яка буде втримувати сонячні панелі. Конструкція рамки розроблено з 3 шарів фанери з’єднаних між собою шурупами (рис. 3.7).

Рисунок 3.7 – Конструкція утримування сонячних панелей

Аби вертикальний серводвигун не працював через усю потужність, було вигадано ідею зробити раму яка буде утримувати сонячні панелі відцентровано (рис. 3.8). Для цього у двох брусках було зроблено два отвори – один отвір під сервопривід (рис. 3.9), інший для утримування панелей з іншої сторони. Отвір з іншої сторони мав діаметр під гвинт, який вкручувався у другий брусок (рис. 3.10) та заходив у спеціально розроблений фіксатор (рис. 3.11).

Рисунок 3.8 – Рама для утримування сонячних панелей

Рисунок 3.9 – Отвір для утримання сервоприводу

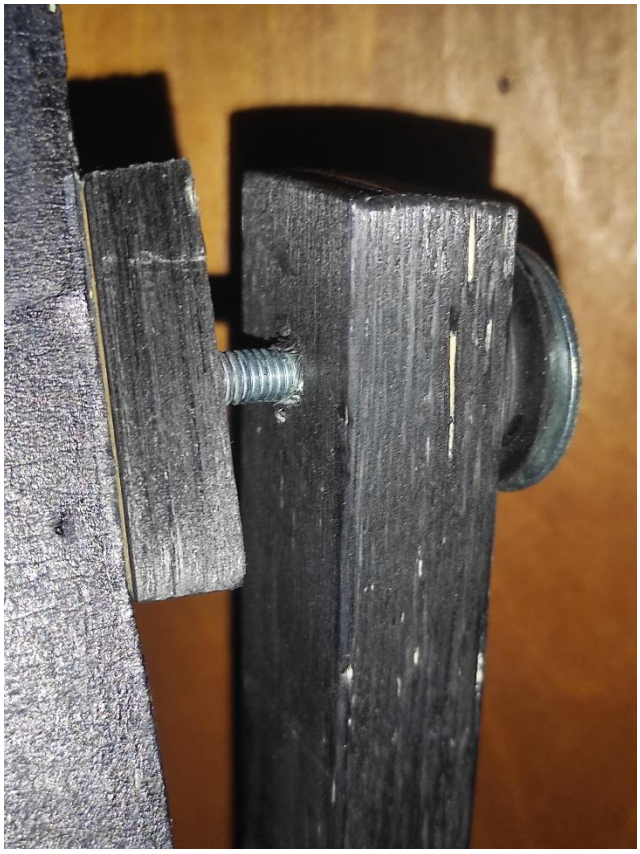

Рисунок 3.10 – Отвір під утримуючий гвинт

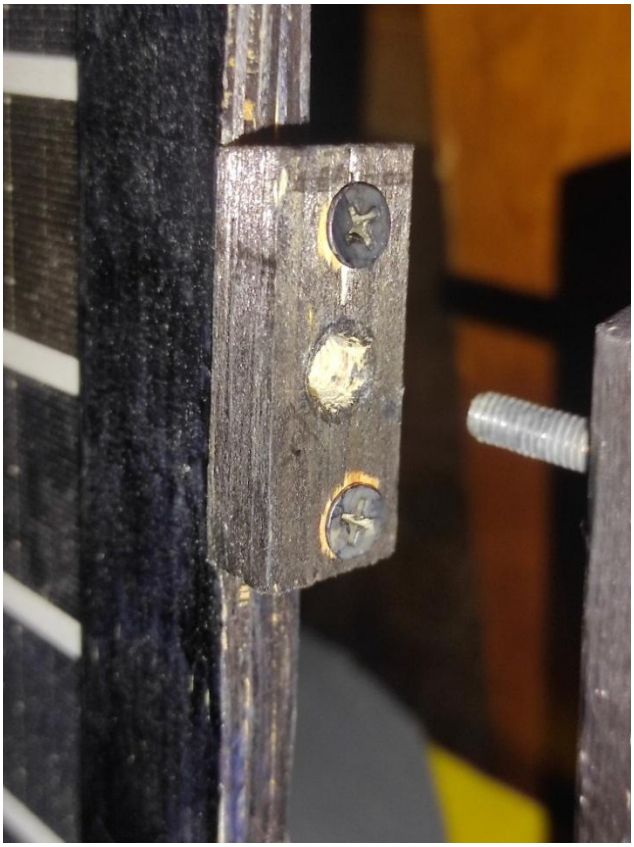

Рисунок 3.11 – Фіксатор для утримуючого гвинту

Рамка сонячних панелей була складена в 3 шарів фанери товщиною 3 мм. Оскільки об’єм матеріалу був обмежений – було прийнято рішення попиляти фанеру на окремі “смужки” та скласти рамку з них. Перший шар, а саме задня частина рамки є цільною – в ній було вирізано тільки вивід під дроти від сонячних панелей. Середня частина складалася зі смужок шириною 2 сантиметри, довжиною: для горизонтальних – 50 см, для вертикальних 34,5 см. Ці смужки було приклеєно на першу частину рамки аби краї не виступали. І, нарешті, верхня, лицьова частина складалася зі смужок шириною 3 см, довжиною горизонтальних і вертикальних – 50 см і 32,5 см відповідно. Далі на них було прикріплено на шурупи фіксатор для утримувача гвинту з правої сторони та насадку на вал сервоприводу з лівої сторони.

Рама для тримання рамки сонячних панелей кріпиться до обертаючої платформи таким чином, щоб край першої частини лівого плеча (довжиною 16,5 см) був на відстані 19,5 см від центру платформи. Друга частина лівого плеча, довжиною 23 см, прикручується перпендикулярно до першої частини, створюючи кут 90 градусів (рис. 3.12).

Рисунок 3.12 – Конструкція плеча рами

Аби плечі рами не хиталися – допоміжними елементами були кутові кріплення та кронштейни (рисунки 3.13-3.14).

Рисунок 3.13 – Кутове металеве кріплення

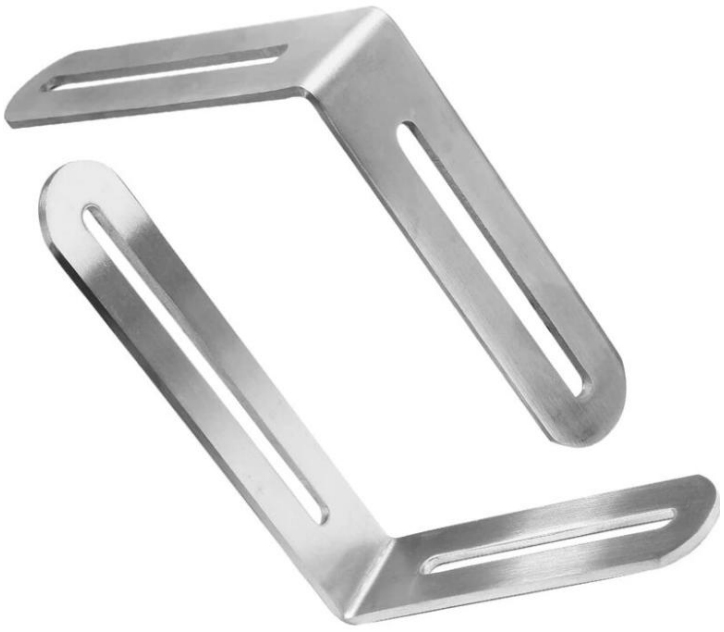

Рисунок 3.14 – Кутовий металевий кронштейн

Сама обертаюча платформа складається з “диску” зробленого з ДСП плити діаметром 39 сантиметрів і товщиною 1,5 см, яка монтується на основну

поверхню, розміри якої 39 см х 39 см. До основної платформи також прикріплені “ніжки” довжиною 39 см і висотою 7 сантиметрів (рис. 3.15).

Рисунок 3.15 – Метод монтування обертаючої платформи до основної поверхні

Знизу основної поверхні на шурупи вмонтовано серводвигун (рис. 3.15-3.16), який одночасно обертає платформу, а також через те що знизу обертаючої платформи встановлено вал для сервоприводу, завдяки гвинту, яким його можна закріпити на приводі – він тримає її як одну цільну конструкцію.

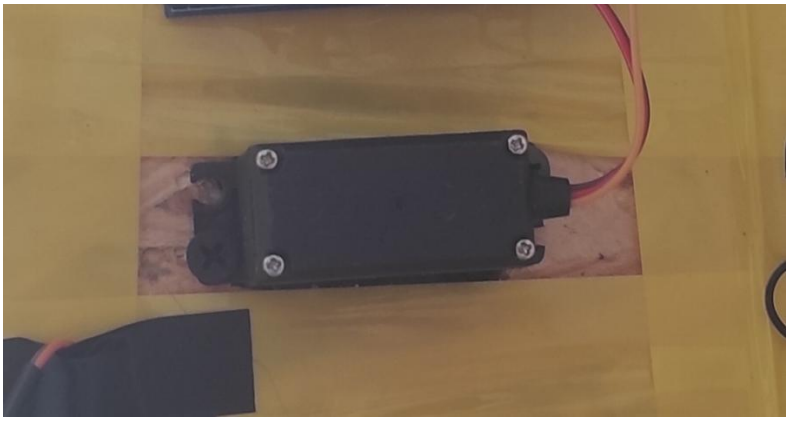

Рисунок 3.16 – Метод закріплення обертаючої платформи на основній поверхні

Оскільки уся деревина не була попередньо відшліфована, для запобігання великому тертя було прийнято рішення помістити між платформою та поверхнею два картонних “диски”, які дозволяють обертатися платформі без зусиль.

Коли каркас був зібраний – прийшов час підключення усіх компонентів згідно схемі, зображеної на рисунку 3.5.

Спочатку знизу основної поверхні було прикріплено акумулятори, плату BMS 2S і вже потім від неї додавалися інші компоненти. Оскільки механізмам, платі керування та BMS потрібні різні напруги – після встановлення контролера заряду і блоку акумуляторів було встановлено понижувачі напруги LM2596 на попередньо заданих параметрах. Перший понижувач йде після сонячних панелей (з’єднаних паралельно) на піни P+ та P- на BMS. Він налаштований на 8.4В – це середнє оптимальне значення для заряджання акумуляторів. Між його пінами, для захисту від перенапруги, встановлено супрессор 1.5KE12A. Після цього до контролеру заряду під’єднуємо акумулятори, одна сторона з яких з’єднана між собою і йде на пін BM, а з іншої сторони плюс та мінус йдуть на піни B+ та B-.

Після цього з пінів плати BMS P+ та P- виходять два дроти, плюс з яких йде на два паралельно під’єднаних клавішних вимикачі, а мінус йде далі на другий та третій понижувачі напруги, а саме на піни та IN-. З першого вимикача йде далі плюсовий дріт на IN+ другого та третього LM2596, як було вказано раніше – це зроблено для повного вимикання системи. Другий вимикач встановлюється для живлення USB-зарядного пристрою (рис. 3.17).

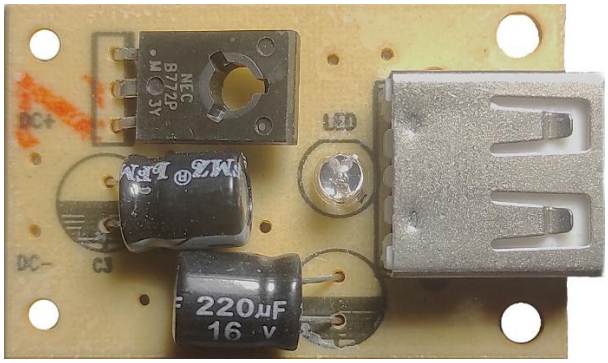

Рисунок 3.17 – Модель USB-зарядного пристрою

Другий понижувач напруги йде на живлення Arduino, він налаштований на 5 вольт, а третій йде на живлення сервоприводів з заданою напругою в 6 вольт. Для того щоб безпечно живити сервоприводи, необхідно під'єднати два конденсатори 1000 мкФ 25 В послідовно, що дасть згладжування напруги і вже потів підключати до них VCC та GND сервоприводів.

Блок сенсорів, який складається з чотирьох фоторезисторів, підключається до 6 пінів на Arduino. Одна сторона контактів фоторезисторів скручених з дротом йде на 5 В пін на платі керування. До кожного другого контакту фоторезистора під'єднується резистор на 10 кОм. Вище за резистори, до кожного контакту приєднуються чотири дроти, які йдуть на аналогові піни плати керування.

PWM контакти сервоприводів йдуть на цифрові піни D9 та D10. D9 пін керує горизонтальним сервоприводом, D10 – вертикальним.

Схему підключення зображено на рисунку 3.18.

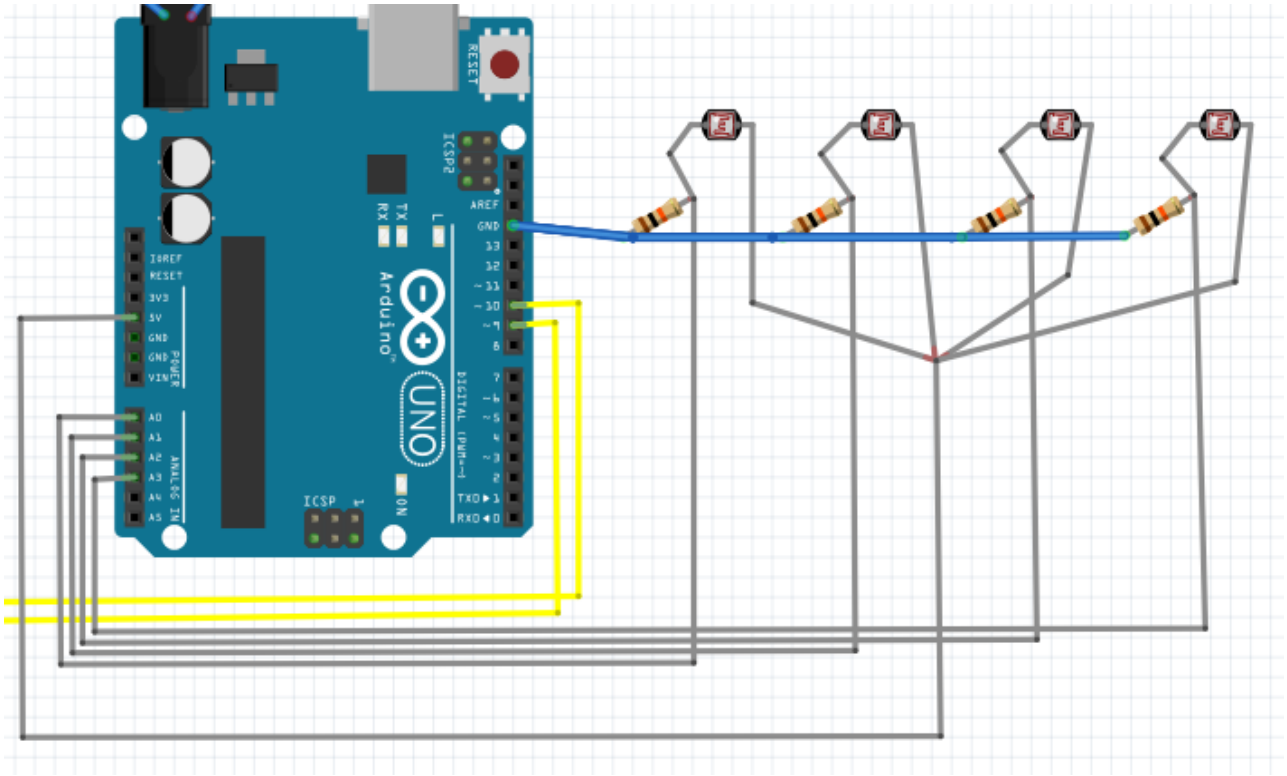

Рисунок 3.18 – Під'єднання фоторезисторів до плати керування

Повний вид підключення компонентів можна побачити на рисунку 3.19.

Рисунок 3.19 – Схема підключення компонентів на основній поверхні

Також на рисунку 3.20 яким чином було під’єднано блок фоторезисторів.

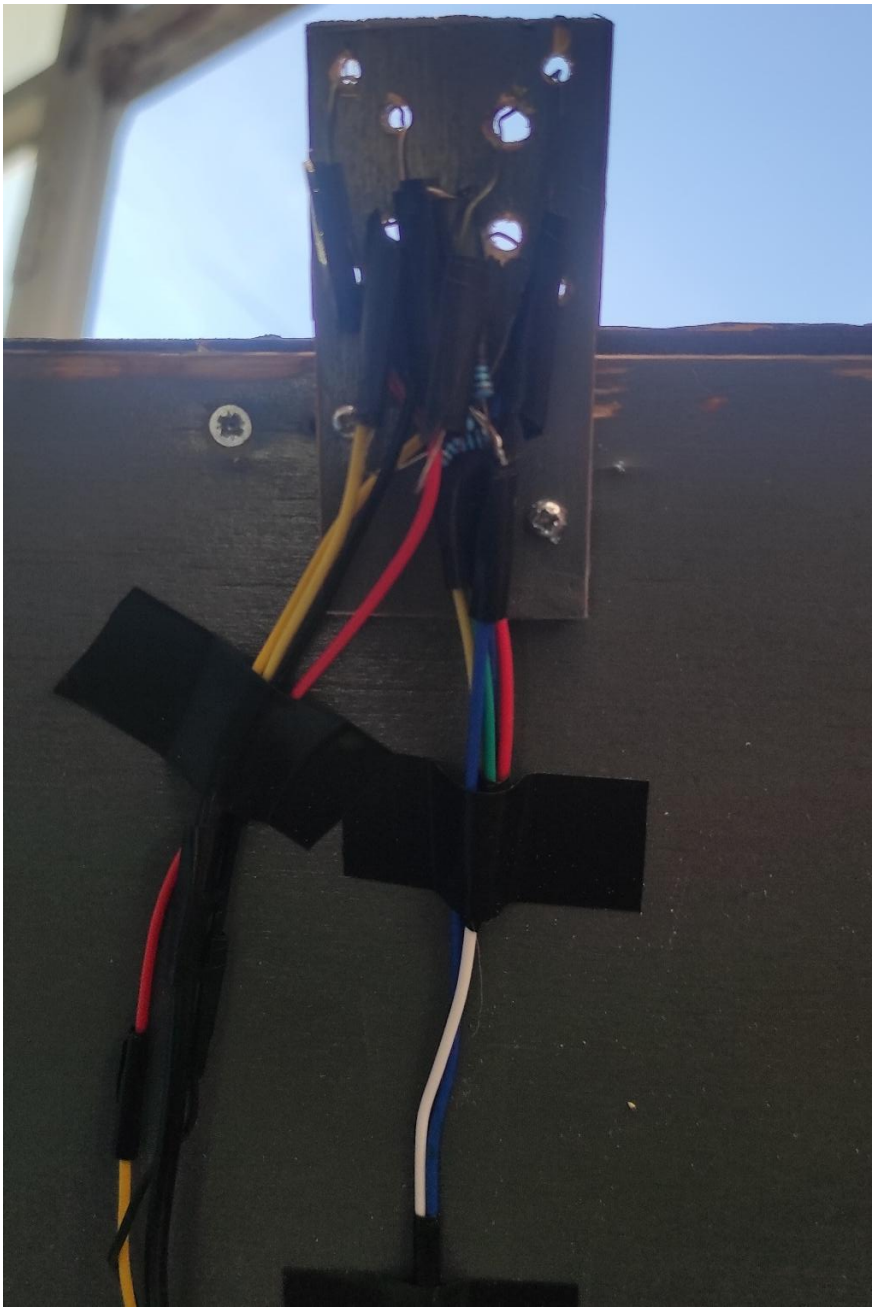

Рисунок 3.20 – Схема підключення фоторезисторів

3.4 Розробка програмного коду для Arduino

Програма була створена в Arduino IDE – спеціалізованому середовищі, розробленому для роботи з Arduino різних типів. Arduino IDE використовує мову програмування, основу якої складають C/C++. Ця мова вирізняється рядом особливостей, орієнтованих на зручність для новачків та прискорення процесу прототипування. Структура програми в Arduino досить проста та базується на

двох основних функціях: setup() та loop(). setup() викликається лише один раз під час запуску мікроконтролера, а loop() працює безперервно. Arduino підтримує стандартні типи даних, такі як цілі числа (int), дійсні числа (float), символи (char) та інші типи даних, властиві C. Крім того, користувач може створювати власні функції за межами setup() та loop(), а також використовувати вбудовані функції для взаємодії з пінами, затримкою та іншими компонентами.

Значним плюсом є також наявність великої кількості бібліотек для різноманітних завдань. Серед них – бібліотеки для керування світлодіодами, роботи з сенсорами, управління моторами, робота з різними датчиками, а також бібліотеки для роботи із зовнішніми камерами тощо. Також існує можливість розробки власних бібліотек, що є дуже корисним інструментом. Загалом, мова програмування в Arduino IDE є простою у вивченні та використанні, акцентуючи увагу на простоті та швидкості створення прототипів. Це дозволяє дуже оперативно вносити зміни в програму та швидко адаптувати її до потреб. Arduino IDE також забезпечує надзвичайно швидке завантаження програми на Arduino через COM Port, що є додатковою зручністю, оскільки немає потреби у додаткових модулях для прошивання.

Дивлячись на алгоритм, який зображено на рисунку 3.1, необхідно розробити програмний код (додаток А). Його розробка починається з підключення бібліотеки Servo.h. Це офіційна бібліотека, яка супроводжується авторством Arduino, вона створена спеціально для керування сервоприводами [12].

Далі у коді ініціюються об'єкти класу Servo. Вони необхідні для управління рухом механічних компонентів в двох вимірах: вгору/вниз та вправо/вліво. Паралельно визначаються базові налаштування: початкові кути положення та діапазон обертання, котрі встановлюють границі коливань сервоприводів.

У функції setup(), яка в Arduino IDE запускається одноразово під час старту мікроконтролера, відбувається прив'язування сервоприводів до цифрових виходів плати через метод attach(). Крім цього, задається вихідне положення

обох моторів за допомогою методу write(). Далі встановлено затримку delay(3000), щоб пристрій зміг стабілізуватись перед початком активної роботи.

Далі виконання переноситься до функції loop(), що є невід'ємною частиною будь-якої Arduino-програми та виконується циклічно, безперервно. Усередині цього циклу спершу зчитуються аналогові показники з чотирьох фотодатчиків. Ці дані з сенсорів використовуються для аналізу інтенсивності освітлення з різних сторін. Програма визначає середні значення по вертикалі та горизонталі, а також різницю між ними – ці диференціали є основою для прийняття рішень щодо корекції положення пристрою.

Далі, за допомогою умовних операторів if, здійснюється перевірка: якщо різниця в освітленості між верхньою та нижньою частинами, або між лівою та правою сторонами, перевищує заздалегідь визначений поріг (tol), система виконує коригування положення відповідного сервоприводу. Для цього кут повороту змінюється на один градус у необхідному напрямку, після чого положення сервомотора оновлюється через метод write(). Обов'язково здійснюється контроль за тим, щоб нове значення кута не виходило за встановлені межі. Кожна операція супроводжується невеликою паузою delay(20), щоб уникнути надмірного навантаження та вібрації двигуна.

Наприкінці кожної функції циклу відбувається загальна затримка delay(100), що знижує частоту оновлень та стабілізує функціонування системи.

3.5 Тестування роботи датчиків в умовах експлуатації

Для проведення експерименту та тесту необхідно встановити робот на відкриту ділянку де сонце зможе світити на сонячні панелі. Для чистоти експерименту тестування проводилися у різні проміжки часу, аби спостерігати як поводить себе трекер, коли світло відбивається від туману та хмар, розсіюючись по небосхилу, та коли воно напряму падає на фоторезистори.

На рисунку 3.21 можна спостерігати, що трекінгова система повертає панелі приблизно в бік сонця, оскільки сонячні промені ще не прямі і плата керування не може скоригувати точно в який бік мають бути повернені сонячні панелі.

Рисунок 3.21 – Приблизне положення сонячних панелей

Далі, коли сонце трішки піднімається вище, сонячні панелі повертаюсь в бік світла вже більш точно, як зображено на рисунку 3.22.

Рисунок 3.22 – Більш чітке положення сонячних панелей

І коли вже сонячні промені напряму падають на сенсори – фоторезистори, можна побачити, що фокус положення трекера вже дійшов до піку (рис. 3.23).

Рисунок 3.23 – Точне положення сонячних панелей

Те що фокус трекера на сонце вже точний, можна побачити навіть оком, оскільки жодна ділянки поділу фоторезисторів не знаходиться у тіні, як це зображено на рисунку 3.24.

Рисунок 3.24 – Ідеальне положення сонячних панелей

Про те, що все працює і живлення від сонця йди до системи свідчать діоди, які вмикаються, коли на LM2596 надходить напруга (рис. 3.25).

Рисунок 3.25 – Реакція LM2596 на живлення від сонячних панелей

3.6 Теоретичні основи автоматичного управління у системах відстеження положення сонця

Системи автоматичного управління (САУ) є невід’ємною складовою сучасних технічних засобів, що забезпечують точне й ефективне керування процесами без постійного втручання людини. Зокрема, в задачах позиціонування об’єктів або орієнтації в просторі – таких як трекінг для сонячних панелей –

використання методів ТАУ дозволяє досягти підвищення енергоефективності, стабільності та надійності пристроїв.

САУ складається з трьох основних елементів:

– об'єкта керування (у нашому випадку положення сонячних панелей);

– керувального пристрою (Arduino UNO R3, що обробляє сигнали);

– датчиків зворотного зв'язку (фоторезистори, що вимірюють освітлення).

Основне завдання САУ – забезпечити бажану поведінку об'єкта, автоматично компенсуючи зміни зовнішнього середовища (рух сонця протягом дня). У цьому контексті, системи діє за принципом негативного зворотного зв'язку: якщо панель "відхилилася" від напрямку максимального освітлення, зміна сигналів від фоторезисторів викликає відповідне коригування сервоприводів.

У загальному випадку, поведінку системи можна описати диференціальними рівняннями або передаточними функціями. У спрощеному випадку, для лінійної неперервної системи типу "вимірювання-обробка-реакція", передаточна функція має вигляд:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, \tag{3.1}$$

де $W(s)$ – передавальна функція;

$U_{(s)}$ – вхідна дія (різниця сигналів з фоторезисторів);

$Y_{(s)}$ – вихідна дія (кут обертання панелі);

s – комплексна змінна Лаплас-перетворення.

Для систем з Arduino, які керують сервоприводами з певною затримкою та інерційністю, можна умовно вважати модель як аперіодичну ланку першого порядку, для якої:

$$W_{(s)} = \frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}, \tag{3.2}$$

де K – коефіцієнт підсилення системи;

T – стала часу (затримка реакції приводу на зміну сигналу);

s – комплексна змінна Лаплас-перетворення.

Для сервоприводу MG996R:

$K \approx 1$;

T_1 = 0.1 с (інерційність сервоприводу);

T_2 = 0.05 с (додаткові електричні затримки).

Таким чином:

$$w_{(s)} = \frac{1}{(0.1s+1)(0.05s+1)}. \tag{3.3}$$

Для визначення стійкості використаємо алгебраїчні критерії (наприклад, критерій Гурвіца).

Характеристичне рівняння:

$$(0.1s + 1)(0.05s + 1) + K_r = 0, \tag{3.4}$$

де K_r – коефіцієнт регулятора (припустимо $K_r = 1$).

Перемноживши:

$$0.005s^2 + 0.15 + 1 + K_r = 0.005s^2 + 0.15s + 2. \tag{3.5}$$

Коефіцієнти:

$$a_0 = 2 > 0;$$
$$a_1 = 0.15 > 0;$$
$$a_2 = 0.005 > 0.$$

Всі коефіцієнти одно знаку – система стійка.

Таким чином, САУ забезпечує адаптивне орієнтування сонячних панелей з урахуванням динаміки освітлення, компенсуючи зміну положення сонця на небосхилі. Стійкість системи забезпечується тим, що регулювання відбувається поступово, з обмеженням швидкості зміни положення панелей (через обмеження PWM для сервоприводів).

Також для покращення стабільності можуть застосовуватись методи фільтрації сигналів, гістерезис або простий PID-регулятор.

3.7 Охорона праці

На сьогоднішній день більшість людей працюють більшість свого часу на виробничих та в офісних приміщення та створення безпечних і комфортних умов праці є одним із основних питань. Належний рівень освітленості в робочих приміщеннях, який впливає на ефективність та комфорт роботи, відіграє важливу роль. Освітлення значною мірою визначає те, як впливає на зорове сприйняття, здатність зосереджуватись, сприймати дані та загальний емоційний стан робітників. Неправильно організоване освітлення може мати негативні наслідки, перериваючи робочий процес, погіршуючи зір, викликати швидку втому та навіть сприянню розвитку професійних захворювань.

Одним з ключових елементів світлотехнічного проектування є визначення належного рівня освітлення для певного простору. У межах даного підрозділу зосереджено увагу на обчисленні освітленості для приміщення з габаритами 4 м х 5 м, де передбачено розробка макету. Відповідно до державного нормового акту про охорону праці, приміщення має забезпечувати 6 $м^2$ площі і 20 $м^3$ на одне робоче місце з ПК. Площа приміщення 20 $м^2$ і об’ємом 70 $м^3$, отже вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення до вимог ДБН В.25-28-2006 Природне і штучне освітлення. Природне освітлення слід забезпечити через світлові отвори (вікна), що розміщені збоку та зорієнтовані,

здебільшого, на північний чи південно-східний напрям, гарантуючи коефіцієнт природного освітлення (КПО) на рівні не менше ніж 1,5 %.

Перевірка рівня штучного освітлення у приміщенні може здійснюватися із застосуванням методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{s}, \tag{3.6}$$

де W – питома потужність;

S – площа приміщення;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки.

W_{Σ} розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}}, \tag{3.7}$$

де $W_{\text{св}}$ – потужність одного світильника;

$n_{\text{св}}$ – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 1 = 100 \text{ Вт}, \tag{3.8}$$

$$W_{\Sigma} = \frac{100}{20} = 5 \text{ Вт/м}^2. \tag{3.9}$$

Питомій потужності 5 Вт/м^2 відповідає освітленість в 341,5 Лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, в кімнаті створені сприятливі умови за освітленням.

ВИСНОВКИ

У першому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено аналіз наявних сучасних розробок та механізмів функціонування механізмів сонячних трекерів. Розглядались основні типи таких систем, зокрема одновісні та двовісні, одночасним аналізом їх технічних параметрів, здатності відстеження сонячного світла, конструктивної складності та рівня втрат енергії. Акцент було зроблено на зрівнянні переваг двовісних конструкцій у плані досягнення найбільшої ефективності збирання сонячної енергії протягом світлового дня. Також було проведено аналіз сфер використання трекерів: від особистих побутових електричних систем до великомасштабних промислових сонячних електростанцій, охоплюючи портативні рішення ті їх використання в автономних системах. Окремо розглядалася можливість розміщення аналогічних пристроїв у віддалених районах, де відсутнє централізоване електропостачання.

У другому розділі було проведено аналіз основних електронних компонентів, необхідних для реалізації двовісного трекера. Було розглянуто варіанти виконавчих механізмів – зокрема сервоприводи, які забезпечують поворот платформи у двох площинах. На основі порівняльної характеристики було обрано модель MG996R як оптимальну за співвідношенням потужність/ціна. Також були проаналізовані типи датчиків освітленості. Для реалізації логіки орієнтації було обрано чотири фоторезистори типу GL5528, які дозволяють визначати напрямок на джерело світла. Проведено аналіз систем живлення, зокрема використання акумуляторів 18650 та зарядних модулів із BMS, стабілізаторів напруги типу LM2596 та MT3608. Досліджено варіанти захисту системи від перенапруги та зворотного струму, зокрема через використання діода Шотткі 1N5819 та TVS-діода 1.5KE12A. Визначено структуру логічного управління на базі мікроконтролера Arduino Uno, як

оптимального варіанту для реалізації циклу зчитування даних та керування сервоприводами.

У третьому розділі було розроблено автоматизовану систему двовісного трекера, яка оптимізує положення сонячних панелей для захоплення максимальної кількості світла. В її основі лежить алгоритм, який оперує даними з чотирьох фоторезисторів, розташованих у вигляді хреста, після чого порівнює освітленість вздовж горизонтальної та вертикальних осей. На основі результатів аналізу формуються сигнали керування для сервоприводів, які коригують положення панелей. Було розроблено програмний код на мові C++ в програмному середовищі Arduino IDE у вигляді циклічного скетчу з реалізацією порогових значень для запобігання помилкам, обмежень кута повороту сервоприводів та плавності зміни положення.

Спершу, схемі з'єднання всіх деталей було зібрано у програмі Fritzing з виправленням недоліків, що виявилися, та вже згодом перенесено на реальний макет. Конструкція трекера передбачає обертання по двох осях, де сервоприводи фізично сполучені з обертовими рамами. Компоненти змонтовані з урахуванням міцності, стійкості та мінімізації навантаження на осі сервоприводів.

В процесі тестування трекер показав стабільну роботу в різним умовах освітлення. Результати продемонстрували високу точність позиціювання та ефективне стеження за сонцем з мінімальним споживанням енергії та без перевантаження механіки.

Унікальність розробки полягає у реалізації повністю автономної двовісної системи, яка працює без підключення до електромережі та здатна заряджати зовнішні пристрої через порт USB. Енергосистема із захистами дозволяє одночасно живити керуючу логіку, серво та забезпечувати заряд мобільного телефону. Завдяки використанню простих, доступних, але ефективних компонентів, система легко повторюється та масштабована.

Отримані в процесі реалізації знання та навички формують фундамент для подальшої розробки більш складних енергетичних систем автоматичного

позиціонування. Запропонований підхід може бути адаптований для промислових або польових застосувань, а також у сфері відновлюваної енергетики, мобільних зарядних станцій, освітлювальних систем або автономного обладнання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.

3. Аграрна енергетика в XXI сторіччі: досягнення і перспективи розвитку [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_agrar_energ_14.12.22.pdf#page=59.

4. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.

5. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. – Т. : ТНТУ, 2013. – Том І : Природничі науки та інформаційні технології. – С. 53.

6. Arduino [Електронний ресурс] Режим доступу: www / URL: https://www.arduino.cc.

7. TowerPro MG996R [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://torqpro.com/product/mg996r-robot-servo-180x-rotation.

8. LM2596S [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://store.arduino.cc/collections/accessories/products/dc-dc-converter-with-adjustable-1-5-35v-output.

9. LM2596S Datasheet [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf.

10. 1.5KE12A Datasheet [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://www.littelfuse.com/assetdocs/tvs-diodes-1?assetguid=9d02c7d2-86a5-4bff-9251-966d6af02bf7.

11. Fritzing [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://www.littelfuse.com/assetdocs/tvs-diodes-1?assetguid=9d02c7d2-86a5-4bff-9251-966d6af02bf7.

12. Servo Library [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://docs.arduino.cc/libraries/servo.

13. Харківський національний університет радіоелектроніки [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam.

14. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: https://tapr.nure.ua.

15. Основи охорони праці: Підручник./ К.Н.Ткачук, М.О.Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В.Зеркалов, Р.В.Сабарно, О.І.Полукаров, В.С.Коз'яков, Л.О.Митюк; За ред. К.Н.Ткачука і М.О. Халімовського. – К.: Основа, 2003 – 180-285 с.