

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувачка кафедри,
д-р техн. наук, проф.

_____Ірина ЖУРАВСЬКА

«__» _____ 202__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
Система автоорієнтування сонячних панелей
на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач

_____Денис ВАНЖУЛА

підпис

«__» _____ 202__ р.

Керівник канд. фіз.-мат. наук, доцент

_____Сергій ПУЗИРЬОВ

підпис

«__» _____ 202__ р.

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Комп'ютерної інженерії
Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Освітній ступень	Бакалавр
Спеціальність	123 Комп'ютерна інженерія
Освітня програма	Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри комп'ютерної інженерії
_____ Ірина ЖУРАВСЬКА
«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу здобувача

Ванжули Дениса Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система автоорієнтування сонячних панелей на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing

Затверджена наказом по ЧНУ ім. Петра Могили від 30.10.2024 № 297.

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «_____» _____ 20__ р.

3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні

Очікуваним результатом роботи є розроблена та протестована система автоорієнтування сонячних панелей, яка автоматично наводить панелі на джерело світла за допомогою Arduino, Raspberry Pi та середовища Processing для підвищення ефективності збору сонячної енергії.

4. Перелік питань, що підлягають розробці:

- дослідження сучасних рішень щодо систем орієнтування сонячних панелей;
- аналітичний огляд літератури та технологій сонячної енергетики;
- підбір компонентів для побудови системи;
- розробка програмного забезпечення для автоматичного керування системою;
- проектування макету АП комплексу автоорієнтування сонячних панелей на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing.

5. Перелік графічних матеріалів

Презентація (схеми моделювання роботи датчиків, блок–схеми моделювання, код для забезпечення роботи пристрою)

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи

Керівник роботи

Особистий підпис

Сергій ПУЗИРЬОВ

Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Денис ВАНЖУЛА

Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ

Дата видачі завдання « 30 » жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи

Тема: Система автоорієнтування сонячних панелей на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Розробка та затвердження завдання на виконання КБР	20.10.2024	30.10.2024	Виконано
2	Огляд літератури за темою роботи	01.12.2024	27.01.2025	Виконано
3	Складання календарного плану КБР	12.02.2025	14.02.2025	Виконано
4	Аналіз предметної області	03.03.2025	20.04.2025	Виконано
5	Розробка проєктних рішень	03.05.2025	14.05.2025	Виконано
6	Моделювання та конструювання АПЗ	21.05.2025	12.06.2025	Виконано
7	Перевірка працездатності, тестування та апробація розробленого АПЗ, аналіз результатів тестування	06.06.2025	13.06.2025	Виконано
8	Відгук керівника КБР	16.06.2025	16.06.2025	Виконано
9	Оформлення КБР та презентації	27.04.2025	16.06.2025	Виконано
10	Попередній захист	21.05.2025	04.06.2025	Виконано
11	Рецензування	16.06.2025	17.06.2025	Виконано
12	Завершення оформлення КБР та презентації	16.06.2025	16.06.2025	Виконано
13	Захист кваліфікаційної бакалаврської роботи	25.06.2025	25.06.2025	Виконано

Керівник роботи

Особистий підпис

Сергій ПУЗИРЬОВ

Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Денис ВАНЖУЛА

Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ

« ____ » _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної бакалаврської роботи
«Система автоорієнтування сонячних панелей
на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing»

Студент 405 гр.: Ванжула Денис Олександрович

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент Пузирьов Сергій Володимирович

Актуальність у сучасних умовах стрімкого розвитку альтернативних джерел енергії особливу увагу приділяють використанню сонячної енергії як одного з найперспективніших та екологічно чистих ресурсів. Водночас ефективність її перетворення значною мірою залежить від точності орієнтації сонячних панелей щодо положення Сонця на небосхилі. Використання стаціонарних панелей не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал сонячної енергії, оскільки кут падіння променів змінюється впродовж дня та року.

Об'єкт дослідження: система збору сонячної енергії з використанням фотоелектричних панелей, оснащена механізмами орієнтації.

Предмет дослідження: апаратно-програмне забезпечення для автоматичного орієнтування сонячних панелей на джерело світла з використанням сучасних мікроконтролерів, сенсорів освітленості та алгоритмів керування.

Метою роботи є розробити автоматизовану систему автоорієнтування сонячних панелей, яка забезпечує їх точне та ефективне наведення на Сонце впродовж доби з використанням відкритих апаратних платформ Arduino та Raspberry Pi, а також програмного забезпечення Processing для візуалізації та обробки даних.

Запропонована система дозволяє зменшити втрати енергії, пов'язані з фіксованим положенням панелей, і може бути адаптована для широкого спектра застосувань – від невеликих автономних систем електроживлення до освітніх та дослідницьких лабораторій.

Робота поєднує сучасні підходи до енергозбереження з технологіями сенсорного управління та інтерактивної візуалізації. Зокрема, запропоновано інтегроване рішення, що включає в себе апаратну частину для управління положенням панелей та програмну частину для візуального моніторингу і налаштування параметрів у режимі реального часу.

У першому розділі проведено огляд існуючих технічних рішень, проаналізовано їхні переваги та недоліки, а також обґрунтовано вибір апаратних платформ. У другому розділі описано архітектуру системи, схему з'єднання компонентів, принцип роботи сенсорів, сервоприводів і алгоритмів управління. Третій розділ присвячено розробці програмного забезпечення для візуалізації даних у середовищі Processing, налаштування параметрів роботи системи та аналізу ефективності автоорієнтування за результатами тестування.

Робота містить 65 сторінки (без додатків), 4 таблиці, 35 рисунків, 20 джерел посилання та додатки.

Ключові слова: *автоорієнтування, сонячна енергія, Arduino, Raspberry Pi, Processing, сенсори, керування, ефективність.*

ABSTRACT

of the Bachelor's Thesis

"Solar panel auto-orientation system based on Arduino, Raspberry Pi, and Processing"

Student: Denys Vanzhula

Supervisor: Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assoc. Prof. Sergii Puzyrov

The relevance in modern conditions of the rapid development of alternative energy sources, special attention is paid to the use of solar energy as one of the most promising and environmentally friendly resources. At the same time, the efficiency of its conversion largely depends on the accuracy of the orientation of solar panels relative to the position of the Sun in the sky. The use of stationary panels does not allow the full realization of the potential of solar energy, since the angle of incidence of the rays changes throughout the day and year. This makes it urgent to create automatic guidance systems that allow dynamically adapting the position of the panels to changes in solar illumination, significantly increasing the efficiency of the system.

Object of research: solar energy collection system using photovoltaic panels, equipped with orientation mechanisms.

Hardware and software complex for automatic orientation of solar panels to a light source using modern microcontrollers, light sensors and control algorithms.

The aim of the work is to develop an automated system for auto-orientation of solar panels, which ensures their accurate and efficient alignment with the Sun throughout the day using open hardware platforms Arduino and Raspberry Pi, as well as Processing software for visualization and data processing.

The proposed system allows to reduce energy losses associated with a fixed position of the panels and can be adapted for a wide range of applications - from small autonomous power supply systems to educational and research laboratories. Its design is based on inexpensive, accessible open source components, which greatly simplifies implementation and maintenance.

The work combines modern approaches to energy saving with Internet of Things technologies, sensor control and interactive visualization. In particular, an integrated solution is proposed, which includes a hardware part for controlling the position of the panels and a software part for visual monitoring and setting parameters in real time.

The first chapter reviews existing technical solutions, analyzes their advantages and disadvantages, and justifies the choice of hardware platforms. The second section describes the system architecture, component connection diagram, operating principle of sensors, servos and control algorithms. The third section is devoted to the development of software for data visualization in the Processing environment, setting system parameters and analyzing the efficiency of auto-orientation based on the results of testing.

The Bachelor's Thesis contains 65 pages (without appendices), 4 tables, 35 figures, 20 references, and appendices.

Keywords: *auto-orientation, solar energy, Arduino, Raspberry Pi, Processing, sensors, control, efficiency.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП	4
1 ТЕХНОЛОГІЇ АВТООРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ	6
1.1 Значення теми для розвитку відновлюваної енергетики	6
1.2 Сонячні трекери та їх класифікація	11
1.3 Будова сонячного трекера	18
1.4 Вимоги до апаратно-програмного забезпечення	20
Висновки до розділу 1	22
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ	23
2.1 Алгоритм роботи пристрою	23
2.2 Визначення основних функціональних блоків системи	26
2.3 Загальна логіка роботи системи	28
2.4 Апаратна реалізація системи автоорієнтування	31
Висновки до розділу 2	45
3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ТЕСТУВАННЯ	46
3.1 Фоторезистор LDR.....	46
3.2 Побудова системи відстеження сонця	51
3.3 Processing	56
Висновки до розділу 3	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	66
ДОДАТОК А Програмний код для роботи системи.....	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АПЗ	– апаратно-програмне забезпечення
СЕС	– сонячна електростанція
ФЕМ	– фотоелектричний модуль
AADAT	– Azimuth-Altitude Dual Axis Tracker
SPA	– Solar Position Algorithm
TTDAT	– Tip-Tilt Dual Axis Tracker

ВСТУП

Сучасні глобальні тенденції розвитку енергетики спрямовані на широке впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія займає одне з провідних місць. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання сонячних панелей, що можливо лише за умов динамічного орієнтування їх на Сонце. Науково-практичне значення дослідження полягає у створенні доступної автоматизованої системи орієнтації сонячних панелей, яка дозволяє підвищити рівень енергоефективності та автономності сонячних електростанцій завдяки використанню відкритих апаратно-програмних платформ.

Об'єктом дослідження є система збору сонячної енергії, яка функціонує з використанням фотоелектричних панелей.

Предмет дослідження – апаратно-програмне забезпечення (АПЗ) автоматичного орієнтування панелей за положенням Сонця, побудований на основі Arduino, Raspberry Pi та програмного забезпечення Processing.

Метою роботи є підвищення ефективності збору сонячної енергії за рахунок розробки автоматизованої системи автоорієнтування сонячних панелей шляхом поєднання апаратних і програмних засобів керування положенням панелей відносно джерела світла.

Завданнями роботи є:

- дослідження сучасних рішень щодо систем орієнтування сонячних панелей;
- аналітичний огляд літератури та технологій сонячної енергетики;
- підбір компонентів для побудови системи;
- розробка програмного забезпечення для автоматичного керування системою;
- проектування макету АП комплексу автоорієнтування сонячних панелей на базі Arduino, Raspberry Pi та Processing.

Обґрунтування необхідності нової розробки базується на аналізі сучасного стану досліджень у галузі. За даними науково-технічної літератури, більшість розроблених систем автоорієнтування є або комерційно дорогими, або складними у реалізації, що обмежує їх широке впровадження у побуті та навчальних закладах. Провідні компанії, такі як SunPower, LG Solar та Trina Solar, пропонують високотехнологічні рішення з вбудованими трекерами, однак їхня вартість робить їх недоступними для малого споживача. У той час як науковці, зокрема в Іспанії, Німеччині та США, активно досліджують автономні системи позиціонування, залишається актуальним створення бюджетної моделі з відкритою архітектурою для освітніх та дослідницьких цілей. Серед існуючих рішень спостерігається недостатній рівень інтеграції простих апаратних засобів із сучасними програмними платформами для візуалізації та аналізу даних.

Обґрунтування основних проєктних рішень полягає у виборі доступної апаратної платформи Arduino як виконавчого контролера, Raspberry Pi як обчислювального модуля з мережевими можливостями, а також використанні середовища Processing для реалізації інтерфейсу візуалізації. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість і простоту повторного використання системи.

Сфера застосування результатів охоплює автономні малі сонячні установки, навчальні лабораторії, демонстраційні комплекси у сфері відновлюваної енергетики, а також дослідницькі проєкти, пов'язані з оптимізацією енерговикористання. Отримані результати можуть бути використані як основа для створення більш складних систем з додатковими функціями, такими як прогнозування положення Сонця чи мережевий моніторинг ефективності.

1 ТЕХНОЛОГІЇ АВТООРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

1.1 Значення теми для розвитку відновлюваної енергетики

Серед усіх відновлюваних джерел енергії особливу увагу привертає сонячна енергія, яка є доступною та екологічно безпечною. Кліматичні та географічні особливості України створюють сприятливі умови для її ефективного використання протягом усього року. Важливою складовою систем автономного енергозабезпечення на основі сонячної енергії виступають сонячні панелі – пристрої, які складаються з фотоелектричних елементів (модулів) та слугують для перетворення світлового випромінювання в електричну енергію.

Кількість електроенергії, яку генерує сонячна панель, прямо залежить від кількості світлової енергії, що потрапляє на її поверхню. Найвища ефективність досягається тоді, коли світловий потік падає на модулі під прямим кутом. На практиці сонячні панелі зазвичай встановлюють у фіксованому положенні, орієнтуючи їх приблизно в напрямку Сонця, що не завжди дозволяє повною мірою використовувати потенціал світлового випромінювання. Через зміну положення Сонця протягом доби та в різні пори року, кут падіння сонячних променів також змінюється, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії.

Дослідження показують, що при фіксованому розміщенні фотоелементи можуть забезпечувати менше 10 % від максимально можливої потужності, оскільки лише один раз на добу модуль розташовується строго перпендикулярно до напрямку променів. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні технологій, що дозволяють змінювати орієнтацію панелей відповідно до руху Сонця. Найефективнішим рішенням є автоматичне керування положенням сонячних модулів, яке дозволяє підтримувати оптимальний кут нахилу впродовж доби та року.

Енергоефективність. Для максимально ефективного використання сонячної енергії необхідно дотримуватись кількох ключових умов. По-перше,

слід забезпечити повне освітлення поверхні фотоелементів без будь-якого затінення з боку будівель, дерев або інших об'єктів. По-друге, важливо орієнтувати площину сонячних панелей так, щоб кут їхнього нахилу був максимально наближений до перпендикуляра відносно напрямку сонячного випромінювання.

Як правило, з першим завданням не виникає труднощів, оскільки панелі зазвичай встановлюються на відкритих ділянках або дахах будівель. Натомість забезпечення ідеального кута падіння променів упродовж доби та сезону є технічно складнішим завданням. Положення Сонця на небосхилі постійно змінюється, тому для досягнення оптимальної ефективності панель має змінювати свій кут нахилу у режимі реального часу.

У випадках, коли точне орієнтування неможливе, виникає питання: наскільки сильно знижується ефективність роботи панелі в умовах відхилення від ідеального положення. Фотоелектричні модулі можна класифікувати на два типи: стаціонарні (фіксовані) та мобільні (переносні). Хоча мобільні системи стають дедалі популярнішими – особливо серед мандрівників, дослідників, у кемпінгах або на дахах трейлерів, – найбільше поширення мають саме стаціонарні установки.

Стаціонарні панелі монтують:

- на дахах будівель, включаючи навіси та козирки;
- на вертикальних фасадах;
- на спеціальних конструкціях, розміщених на землі.

Кожен варіант має свої плюси та мінуси. Наприклад, наземне розташування дозволяє простіше обслуговувати панелі та є менш затратним у монтажі, але водночас потребує більше простору і може бути обмеженим навколишньою забудовою. Дахові системи складніші у встановленні й технічному обслуговуванні, проте вони менш піддаються ризику механічних пошкоджень.

Стаціонарне закріплення модулів на дахах або фасадах будівель значно обмежує можливості змінювати їхнє положення відповідно до траєкторії

Сонця. Найпростіший варіант – це розміщення панелі у площині даху, особливо якщо скат орієнтований на південь і має оптимальний нахил, наближений до географічної широти місцевості. Такий спосіб є недорогим і зручним, хоча й не забезпечує максимальної продуктивності. Більш вдосконалений підхід – установка панелей на кронштейнах із можливістю змінювати кут нахилу вручну двічі на рік: узимку та влітку.

Найбільш гнучким і функціональним рішенням вважається монтаж панелей на землі. Це забезпечує легкість в обслуговуванні, дешевизну установки та можливість налаштування напрямку і кута нахилу фотоелементів для досягнення найвищої ефективності. Найпростіший варіант – жорстке кріплення панелі під кутом, що дорівнює широті місцевості, з орієнтацією на південь. Якщо конструкція дозволяє вручну змінювати нахил, кут коригують залежно від пори року: навесні та восени – відповідно до широти, взимку – додають 10–15°, а влітку – віднімають ту ж саму кількість.

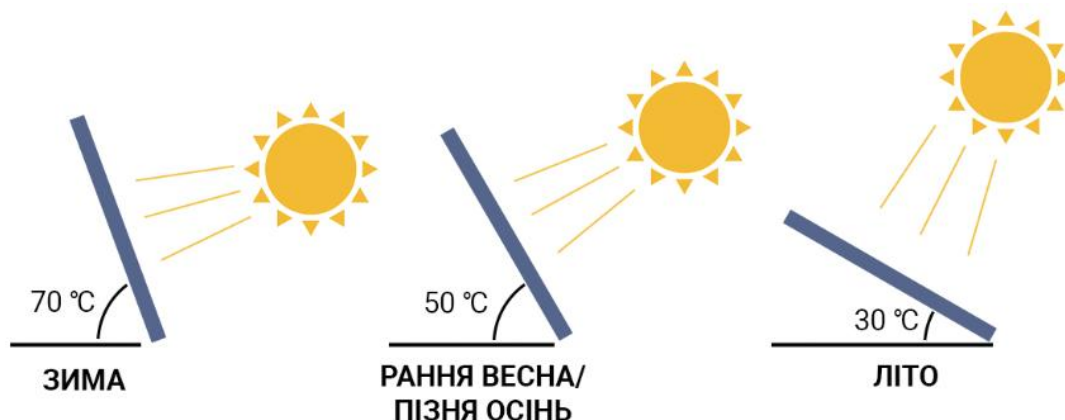


Рисунок 1.1 – Кут нахилу панелей в різні пори року [1]

Додаткового підвищення ефективності роботи сонячних панелей можна досягти за рахунок динамічного орієнтування панелі протягом дня у напрямку руху Сонця. Такий підхід дозволяє значно збільшити кількість зібраної енергії. Однак ручне виконання цього процесу є досить складним і трудомістким. Тому доцільно використовувати спеціалізовані автоматизовані пристрої – сонячні трекири які забезпечують безперервне стеження за положенням Сонця.

Сонячний трекер складається з двох основних підсистем: механічної та електронної. Механічна частина відповідає за фізичне переміщення панелі в потрібному напрямку, що зазвичай реалізується за допомогою електродвигуна. Електронна частина виконує функції керування, аналізуючи зміну інтенсивності освітлення на фотоелементах. Для цього зазвичай застосовуються два фотодіоди. При зміні положення Сонця змінюється рівень освітлення на кожному з них. Контролер фіксує цю різницю та генерує сигнал, що активує двигун до моменту, поки освітлення на обох сенсорах не вирівнюється. При подальшому зміщенні Сонця цикл повторюється, що забезпечує орієнтацію панелі перпендикулярно до сонячних променів протягом усього світлового дня.

У разі доповнення конструкції трекера вузлом, який дозволяє змінювати положення панелі у вертикальній площині, стає можливим повністю автоматизувати орієнтацію в обох координатних напрямках – горизонтальному і вертикальному.

Існує багато варіантів комплектації трекерів. Залежно від призначення та вартості, до їх складу можуть входити:

- опорна база або фундамент;
- рухомі елементи, які забезпечують обертання панелі за однією або кількома осями;
- виконавчі механізми з електродвигунами;
- захисні й допоміжні системи: модулі безпеки, стабілізатори, метеостанції, грозозахист;
- контролери для управління, налаштування та діагностики системи;
- модулі зв'язку (зокрема маршрутизатори) для передавання даних до віддаленого сервера;
- GPS або інші системи позиціонування (зазвичай не використовуються у фіксованих системах).

Однак повна комплектація трекера не завжди доцільна з економічної точки зору, тому для здешевлення конструкції часто використовують лише базові компоненти.

Попри високу ефективність, метод орієнтації панелей із застосуванням трекера має певні недоліки: високу вартість, складність обслуговування та додаткове споживання електроенергії самою системою керування. Проте навіть у найпростіших стаціонарних установках, де панелі орієнтовані на південь і встановлені під кутом, що відповідає географічній широті місцевості, можна досягти до 70–75 % ефективності порівняно з повноцінною системою, оснащеною трекером.

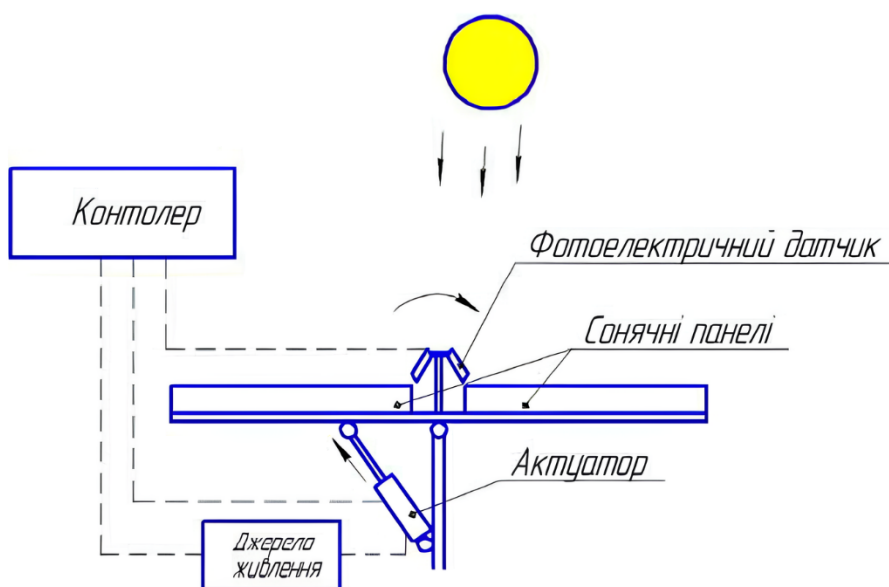


Рисунок 1.2 – Схема конструкції системи сонячної панелі
з трекером [2]

Отже, використання сонячних трекерів дозволяє значно підвищити ефективність роботи фотоелектричних панелей, хоча й потребує додаткових витрат. У спрощених системах, при правильному налаштуванні кута нахилу, також можна досягти високих результатів, що робить їх доцільною альтернативою для невеликих установок.

1.2 Сонячні трекири та їх класифікація

Вибір системи відстеження положення Сонця (трекінгової системи) залежить, перш за все, від умов експлуатації. Ключовими факторами, що впливають на це рішення, є кліматична ситуація регіону, зокрема рівень інсоляції, частота хмарності, сила вітру, а також доступна площа для монтажу обладнання. Крім того, важливу роль відіграє ландшафт місцевості – наявність затінення від будівель, дерев або рельєфу.

На сьогодні ринок пропонує широкий асортимент рішень від українських і закордонних виробників, які реалізують конструкції для встановлення фотоелектричних модулів (ФЕМ) у різних конфігураціях та цінових категоріях. Найбільшу популярність серед них здобули два типи систем: фіксовані (статичні) та рухомі (динамічні).

Статичні установки характеризуються простотою: сонячні панелі кріпляться нерухомо під постійним кутом, зазвичай із орієнтацією на південь. Кут нахилу визначається залежно від географічної широти місця встановлення. Наприклад, для півдня України оптимальний кут становить близько 30–35°. Основними перевагами фіксованих систем є їх надійність, низька вартість монтажу та обслуговування. Проте їх ефективність суттєво знижується вранці, ввечері та взимку, коли кут падіння сонячного випромінювання є менш сприятливим.

Динамічні системи, які в технічній літературі часто називають сонячними трекерами, дозволяють автоматично змінювати положення панелей відповідно до зміни положення Сонця на небосхилі. Вони реалізують постійне наведення на джерело світла за допомогою електронних або термомеханічних механізмів. Завдяки цьому досягається приріст продуктивності системи до 30–45 % у порівнянні з фіксованими панелями.

Існує два основних типи трекерів:

- одноосьові (1D): здійснюють обертання навколо однієї осі, найчастіше – по горизонталі (схід-захід). Це економічно вигідніший варіант,

який забезпечує значне підвищення продуктивності з відносно невеликими витратами.

– двоосьові (2D): дозволяють обертання як по горизонталі, так і по вертикалі (висота Сонця). Такі системи є складнішими і дорожчими, однак вони здатні забезпечити максимальне збирання енергії протягом усього дня і року, незалежно від сезону.

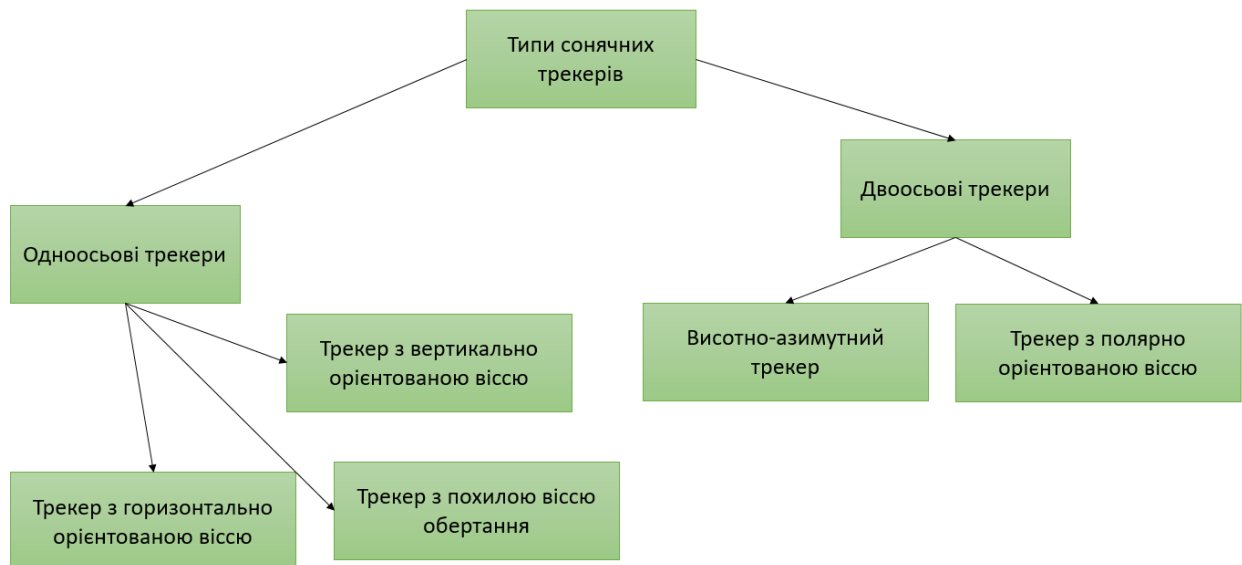


Рисунок 1.3 – Класифікація сонячних трекерів

Класифікація трекерів базується переважно на числі ступенів свободи, орієнтації осей обертання (горизонтальна, вертикальна або комбінована), а також типу приводу (механічний, гідравлічний, електричний). Деякі моделі додатково оснащуються датчиками освітлення, метеостанціями, контролерами з GPS-навігацією, а також засобами дистанційного моніторингу.

1.2.1 Одноосьові трекери

Одноосьові трекери, відомі в технічній літературі як single-axis solar trackers, є найпоширенішим різновидом динамічних систем орієнтування сонячних панелей. Їх популярність пояснюється порівняно простою конструкцією, високою ефективністю та збалансованим співвідношенням

«вартість – продуктивність». Основне призначення таких систем полягає в автоматичному повороті фотоелектричних модулів навколо однієї осі, зазвичай з метою відстеження добового руху Сонця по небосхилу. Це дозволяє значно підвищити ефективність поглинання сонячного випромінювання, а отже й загальний обсяг виробленої електроенергії. У середньому, використання одноосьових трекерів забезпечує приріст енерговіддачі на 15–30 % порівняно зі стаціонарними системами, що особливо помітно у весняно-осінній період та у ранкові й вечірні години.

Принцип роботи одноосьового трекера базується на зміні положення сонячної панелі відповідно до положення Сонця протягом дня. Осі обертання можуть бути розташовані горизонтально, вертикально або під нахилом. Найпоширеніший варіант – горизонтальні трекери (англ. Horizontal Single-Axis Trackers, HSAT), які дозволяють сонячним модулям повертатися у напрямку схід–захід, зберігаючи постійний кут нахилу відносно горизонту. Такі системи ідеально підходять для відкритих площ з рівнинним рельєфом, зокрема сонячних ферм, де можливо встановити велику кількість модулів з однаковим кутом повороту. Вертикальні трекери (англ. Vertical Single-Axis Trackers, VSAT) обертаються по вертикальній осі, що забезпечує зміну орієнтації панелей за азимутом при незмінному нахилі. Вони частіше використовуються в умовах обмеженої території або на дахах будівель, де горизонтальне обертання неможливе. Існують також системи з похилою віссю обертання (англ. Tilted Single-Axis Trackers, TSAT), які встановлюють на осі, нахилені відповідно до географічної широти місцевості, що дозволяє збільшити річну енерговіддачу за рахунок кращого захоплення сонячного світла взимку та влітку.

Особливий тип становлять полярно орієнтовані одноосьові трекери (англ. Polar-aligned Single-Axis Trackers, PSAT), які орієнтовані паралельно осі обертання Землі. Такі системи дозволяють панелі описувати дугу, максимально наближену до видимого шляху Сонця. Їх конструкція складніша

у реалізації, але вони забезпечують високу ефективність за рахунок більш точного слідування траєкторії руху світила протягом доби.

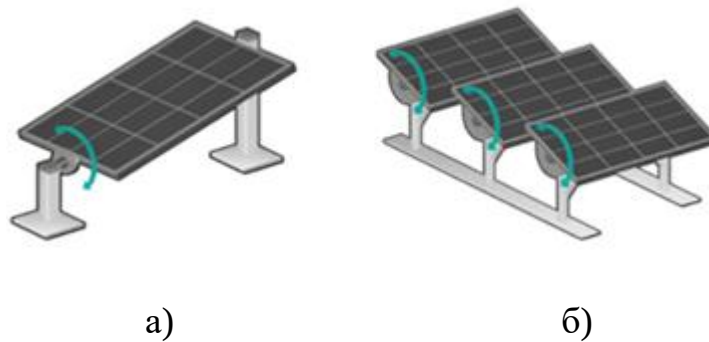


Рисунок 1.4 – Приклад роботи одноосового трекера: а) відстеження на похилій осі; б) відстеження по горизонтальній осі [3]

Керування одноосовими трекерами може реалізовуватися за допомогою різних технологічних підходів. Найпростішим є сенсорний метод, де використовуються фоторезистори або фотодіоди, розміщені на рамці панелі. Різниця в освітленості між датчиками з різних боків викликає сигнал, який запускає обертання панелі у відповідному напрямку до вирівнювання освітлення. Більш просунутий варіант – астрономічний підхід, при якому положення Сонця розраховується на основі часу доби, календарної дати та географічних координат за допомогою спеціальних алгоритмів, наприклад Solar Position Algorithm (SPA). Такий метод є менш чутливим до атмосферних умов і дозволяє точніше передбачати положення Сонця, однак потребує складнішого програмного забезпечення та точного налаштування.

У деяких системах застосовується комбінований підхід, який об'єднує обидві технології – сенсорну та обчислювальну, що дозволяє досягти максимальної точності позиціонування навіть у хмарну погоду або за наявності перешкод.

Механічна частина одноосових трекерів зазвичай включає опорну конструкцію (раму), вузол обертання (вісь, шарніри або підшипники), а також привідний механізм. Для переміщення панелей найчастіше використовуються електродвигуни постійного струму з редукторами, або серводвигуни, які

забезпечують точність позиціонування. У промислових системах можуть застосовуватися гідравлічні приводи для підвищення надійності у важких умовах експлуатації. Системи захисту, такі як обмежувачі ходу або фіксатори вітрового положення, є обов'язковими компонентами для забезпечення безпеки та довговічності пристрою.

До переваг одноосьових трекерів належать значне підвищення ефективності збирання енергії при помірному збільшенні складності системи, а також відносна простота обслуговування у порівнянні з двоосьовими аналогами. Оскільки панелі рухаються лише в одному напрямку, система потребує меншої кількості сенсорів, приводів та менше енергоспоживання для керування. З іншого боку, така конструкція має обмеження в адаптації до сезонних змін кута підйому Сонця над горизонтом, через що річний приріст енергії, хоча й суттєвий, не максимальний.

Незважаючи на це, одноосьові трекери є найпоширенішим вибором для великих фотоелектричних станцій, особливо у регіонах з високим рівнем інсоляції. Завдяки поєднанню надійності, ефективності та економічності доцільності, вони стали стандартом для промислових сонячних електростанцій (SEC) у США, Іспанії, ОАЕ та Китаї. Зокрема, системи компаній NEXTracker, Array Technologies, Arctech Solar, Soltec є лідерами на ринку одноосьових систем, пропонуючи трекери з високим ступенем автоматизації, мережевим управлінням та адаптацією до метеоумов.

1.2.2 Двоосьовий трекер

Двоосьові трекери (англ. Dual Axis Trackers) – це тип динамічних систем, що дозволяють змінювати положення сонячної панелі одночасно у двох площинах: горизонтальній (азимутальній) та вертикальній (висотній). Завдяки цьому панелі можуть точно орієнтуватися перпендикулярно до напрямку сонячного випромінювання в будь-який момент часу незалежно від сезону чи часу доби. Впровадження таких систем забезпечує найвищу ефективність

серед усіх типів установок, дозволяючи збільшити обсяг зібраної енергії на 35–45 % у порівнянні зі стаціонарними системами.

Основна особливість двоосьових трекерів полягає в наявності двох незалежних осей обертання, які працюють узгоджено. Перша вісь (як правило, вертикальна) відповідає за обертання установки за азимутом – з півночі на південь, тоді як друга (горизонтальна) забезпечує зміну нахилу панелі відносно горизонту – з урахуванням кута підйому Сонця. Це дозволяє системі ефективно реагувати як на добові зміни положення Сонця, так і на сезонні коливання, пов'язані зі зміною висоти Сонця на небосхилі.

У сучасній практиці застосовуються два основних конструктивних типи двоосьових трекерів – Tip-Tilt Dual Axis Tracker (TTDAT) і Azimuth-Altitude Dual Axis Tracker (AADAT). Хоча обидва виконують однакову функцію – орієнтацію панелей у двох площинах, вони мають суттєві відмінності у конструкції та принципі розподілу навантаження.

TTDAT – це система, в якій панелі встановлюються на високій опорній колоні або стовпі, до якої кріпляться дві осі повороту. Перша з осей відповідає за обертання панелей зі сходу на захід (азимут), а друга – за нахил у напрямку південь-північ (висота). Конструкція базується на обертовій плиті, до якої приєднано механізм нахилу, а той, у свою чергу, тримає несучу раму з сонячними модулями. Такий трекер вимагає достатньо вільного простору довкола, щоб уникнути затінення між установками, особливо під час низького сонячного кута (вранці та ввечері, взимку). З цією метою сучасні моделі TTDAT можуть бути оснащені сенсорами або алгоритмами компенсації затінення, які дозволяють коригувати кут нахилу панелі ближче до горизонтального, зменшуючи тінь і оптимізуючи вироблення енергії.

AADAT – це інша конструктивна концепція, у якій трекер встановлюється на обертовому кільці або платформі, що лежить на землі або масивній основі. У цій системі вертикальна вісь є основною – вона забезпечує обертання панелі по азимуту, а друга вісь, розміщена перпендикулярно, виконує функцію регулювання кута підйому. На відміну від TTDAT, де весь

тиск і вага панелі припадають на верхню опору, у AADAT навантаження рівномірно розподіляється по всій опорній площині. Це дозволяє встановлювати більшу кількість сонячних модулів на одну конструкцію, що є суттєвою перевагою у масштабних проєктах. Однак, через більший розмір та площу затінення, відстань між такими трекерами повинна бути більшою, аби уникнути втрат енергії через тінь від сусідніх конструкцій.

Системи AADAT зазвичай використовуються у промислових сонячних електростанціях, де є достатньо місця для встановлення потужних платформ з великою кількістю модулів. При цьому сучасні системи такого типу часто інтегруються з метеостанціями, GPS-навігацією, сенсорами освітленості та вітровими датчиками, що дозволяє реалізовувати адаптивні алгоритми керування та забезпечувати захист у разі екстремальних погодних умов. Наприклад, при сильному вітрі система автоматично переміщує панелі у горизонтальне положення для зменшення парусності.

Серед відомих виробників двоосьових трекерів можна виділити такі компанії, як Soltec, SunPower, PVHardware, які спеціалізуються на індустріальних рішеннях для великих сонячних полів. У конструкціях цих компаній реалізовано ефективні системи керування з віддаленим доступом, програмним забезпеченням для моніторингу, та автоматичним плануванням позиціонування панелей з урахуванням погодних умов і прогнозу інсоляції.

Основною перевагою двоосьових систем є їх здатність забезпечувати максимально ефективне орієнтування панелей протягом усього року, що робить їх особливо корисними для автономних систем, розташованих у регіонах з великою кількістю сонячних днів. Недоліками є висока вартість, більші механічні навантаження, складніша система керування, а також потреба у більших відстанях між установками для уникнення затінення.

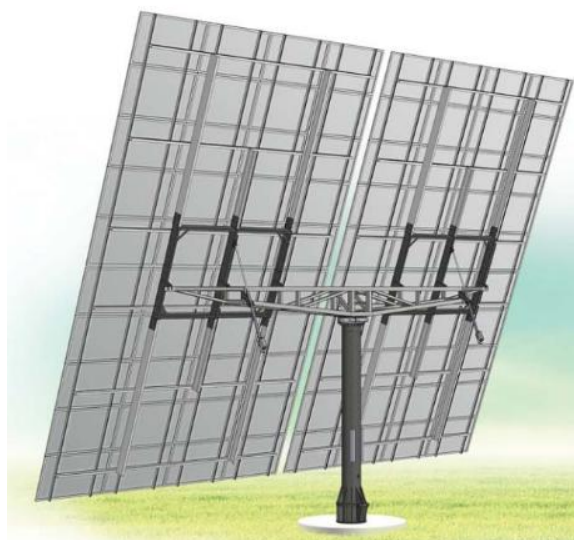


Рисунок 1.5 – Сонячний трекер двоосьовий AS Sunflower 80 [4]

Таким чином, двоосьові трекери – це високотехнологічні рішення, які забезпечують найкращу енергоефективність у сонячній енергетиці, але при цьому потребують ретельного техніко-економічного обґрунтування перед впровадженням. У контексті розробки навчально-дослідної установки, застосування двоосьового трекера має сенс у випадку, коли ставиться завдання дослідити повний потенціал слідкування за Сонцем, протестувати алгоритми позиціонування, або коли необхідна демонстрація максимальної продуктивності системи в змінних умовах освітлення.

1.3 Будова сонячного трекера

Сонячний трекер – це комплексний пристрій, що забезпечує автоматичне слідкування за положенням Сонця з метою оптимального розташування фотоелектричних модулів. Його конструкція поєднує механічні, електронні та програмні компоненти, які функціонують узгоджено для досягнення максимальної енергоефективності. Від правильної побудови системи трекінгу залежить не лише продуктивність сонячної установки, а й її надійність, довговічність і стійкість до зовнішніх чинників.



Рисунок 1.6 – Приклад звичайного двовісного трекера [5]

Основними елементами конструкції сонячного трекера є:

1) несуча конструкція (каркас): цей елемент виконує функцію основи, на якій закріплюються всі інші частини трекера, включно з сонячними панелями. Каркас виготовляється з металу (найчастіше алюмінію або оцинкованої сталі) та повинен витримувати вагу модулів, динамічні навантаження від вітру, снігу тощо. Його форма та розміри залежать від типу трекера (одно- або двоосьового) та кількості встановлених модулів;

2) осі обертання: у одноосьовому трекері використовується одна вісь – зазвичай горизонтальна або похила, тоді як двоосьовий трекер має дві осі: горизонтальну (для зміни кута підйому панелей) і вертикальну (для зміни азимуту). Вісь забезпечується підшипниковим вузлом і має точку фіксації для двигуна або приводу. Важливим параметром є кут обертання, який визначає, наскільки широко панель може змінювати своє положення;

3) привідна система: виконує роль виконавчого механізму для переміщення панелей. У найпростіших трекерах використовуються серводвигуни, крокові двигуни або редукторні мотор-редуктори. У промислових системах іноді застосовують гідравлічні чи лінійні приводи. Двигуни мають бути достатньо потужними для переміщення каркасу з панелями, а також оснащені обмежувачами ходу та датчиками зворотного зв'язку (енкодерами або потенціометрами);

4) сенсорна система: для визначення положення Сонця трекер використовує оптичні датчики освітленості (фоторезистори, фотодіоди), або ж астрономічні алгоритми, які розраховують позицію Сонця залежно від координат і часу. У деяких випадках поєднуються обидва підходи – сенсорний та програмний;

5) мікроконтролер/система керування: у системі зазвичай використовується Arduino, ESP32 або інша відкрита платформа для керування привідною частиною на основі даних із сенсорів. У більш складних системах застосовується Raspberry Pi або промислові контролери PLC, які також відповідають за обробку даних, інтерфейс користувача, моніторинг і віддалене керування;

6) система живлення: може включати акумуляторну батарею, стабілізоване джерело живлення на 12 В або безпосереднє підключення до основної електромережі. Також часто використовується окрема сонячна панель для живлення самої системи трекера.

7) захисні елементи: до них відносяться обмежувачі кута обертання, захист від вітру (положення фіксації при сильному вітрі), блоки ручного управління, а також засоби захисту електроніки (запобіжники, стабілізатори напруги, грозозахист).

Отже, сонячний трекер оптимізує енергоефективність, відстежуючи Сонце. Якісні механічні, електронні та програмні компоненти, міцний каркас, точні осі, надійні приводи, сенсори, керування та захист забезпечують продуктивність і довговічність.

1.4 Вимоги до апаратно-програмного забезпечення

У процесі розробки системи автоматичного орієнтування сонячних панелей ключовим етапом є визначення вимог до АПЗ. Це забезпечує ефективну, надійну та енергоефективну роботу установки в умовах змінного освітлення та навколишнього середовища. Враховуючи специфіку експлуатації, система повинна бути адаптована до роботи в автономному

режимі, мати можливість віддаленого моніторингу та бути стійкою до зовнішніх впливів.

Основу апаратної частини складає мікроконтролер, наприклад, Arduino Uno, який забезпечує обробку сигналів від сенсорів освітленості та керування виконавчими механізмами. Для точного визначення напрямку на Сонце використовуються фоторезистори (англ. Light Dependent Resistor, LDR), розміщені на панелі в конфігурації, що дозволяє виявляти зміну освітленості з різних напрямків. Це дозволяє системі реагувати на зміну положення Сонця та відповідно коригувати орієнтацію панелі.

Виконавчі механізми представлені сервоприводами або кроковими двигунами, які забезпечують обертання панелі по двох осях: азимутальній та висотній. Це дозволяє точно слідкувати за рухом Сонця протягом дня та року, максимізуючи вироблення електроенергії. Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно враховувати механічні обмеження, такі як граничні кути обертання та захист від перевантажень.

Живлення системи здійснюється від стабілізованого джерела напругою 12 В, з можливістю підключення акумуляторної батареї для забезпечення автономної роботи в умовах відсутності сонячного світла. Це особливо важливо для забезпечення безперервної роботи системи в нічний час або під час похмурої погоди.

Програмне забезпечення мікроконтролера повинно забезпечувати зчитування даних з фоторезисторів, аналіз отриманої інформації та формування команд для виконавчих механізмів. Алгоритм роботи повинен враховувати порогові значення освітленості для уникнення надмірної чутливості до незначних змін освітлення, а також реалізовувати функцію повернення панелі у початкове положення при відсутності сонячного світла.

Для візуалізації та моніторингу роботи системи може використовуватися мікрокомп'ютер, наприклад, Raspberry Pi, який забезпечує збір та обробку даних, а також відображення інформації про стан системи через вебінтерфейс або спеціалізоване програмне забезпечення. Це дозволяє

здійснювати віддалений контроль за роботою установки та оперативно реагувати на можливі збої.

Загальна архітектура системи повинна забезпечувати модульність, що дозволяє легко адаптувати її до різних умов експлуатації та масштабувати при необхідності. Це включає можливість додавання нових сенсорів, розширення функціональності програмного забезпечення та інтеграцію з іншими системами енергозабезпечення.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану використання сонячної енергії та особливостей побудови систем фотоелектричного перетворення. Розглянуто як загальні принципи роботи сонячних панелей, так і технічні аспекти їх встановлення, орієнтації та енергоефективності в реальних умовах експлуатації. Основна увага була приділена впливу кута нахилу та орієнтації панелей на рівень виробництва електроенергії, а також технічним рішенням, які дозволяють підвищити їхню продуктивність.

Як показано в аналізі, фіксовані сонячні панелі, незважаючи на простоту та доступність, мають обмежений потенціал через незмінний кут нахилу, що не враховує добові та сезонні зміни траєкторії Сонця. Унаслідок цього зменшується кількість світлової енергії, яка потрапляє на поверхню фотоелементів, що, своєю чергою, призводить до втрати частини виробничого потенціалу системи – інколи до 30 % і більше. Навіть у разі правильного розташування панелей на південь і під оптимальним кутом, у найкращому разі вдається досягти лише 70–75 % ефективності від максимально можливої. Цей факт обґрунтовує необхідність впровадження технологій, які дозволяють відстежувати рух Сонця і відповідно коригувати положення модулів.

Також було проаналізовано різні принципи керування трекерами – від сенсорних рішень із фотодіодами до астрономічних алгоритмів, що враховують географічне розташування та дату.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, ЩО РОЗРОБЛЯЄТЬСЯ

Проектування системи автоорієнтування сонячних панелей є ключовим етапом у розробці апаратно-програмного забезпечення, що забезпечує ефективне використання сонячної енергії. У розділі розглядається розробка математичних моделей, алгоритмів керування та вибору технічних засобів, необхідних для реалізації автоматичної орієнтації панелей.

2.1 Алгоритм роботи пристрою

Розроблений пристрій призначений для забезпечення найбільш точного та постійно коректного розташування сонячних панелей відносно джерела світла – Сонця. Це дає можливість покращити використання відновлюваних джерел енергії та забезпечити найбільш високу віддачу всієї системи.

Основою пристрою є спеціалізований алгоритм, який постійно відстежує рух сонячного диска по небосхилу та коригує розташування панелей у просторі. Це досягається завдяки використанню набору датчиків освітленості, сервоприводів та блоку керування на базі Arduino. Весь процес від розуміння поточного розташування сонця до точно позиціонування платформи відбувається в автоматичному циклі та без втручання людини.

Принцип роботи системи

1) Робота пристрою розпочинається з ініціалізації всієї системи (рис. 2.1). Мікроконтролер Arduino завантажує програму та готовий до прийому сигналів від підключених до нього датчиків. В цей момент серводвигуни встановлюються у нейтральне положення, щоб розпочати відлік із відправних точок.

2) Датчики освітленості розташовуються по чотирьох кутах сонячної панелі. Вони постійно фіксують рівень освітленості кожної із цих точок. Різниця показань між ними дає розуміння про розташування джерела світла відносно платформи.

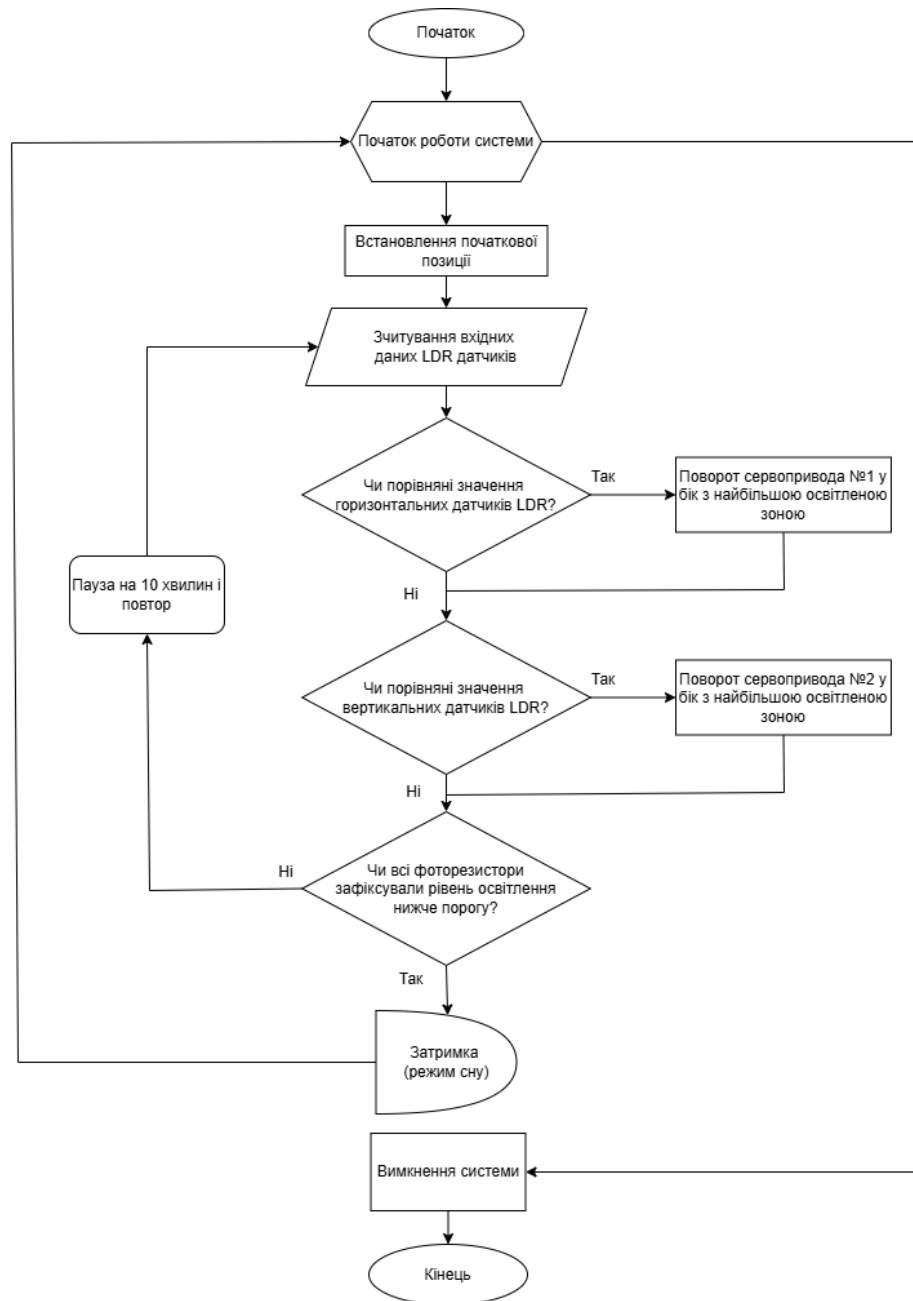


Рисунок 2.1 – Блок-схема прийняття рішень у автоматичному трекері

3) Зчитування даних із датчиків. Контролер постійно опитує кожний із чотирьох світлочутливих резисторів. Це відбувається за допомогою аналогових входів Arduino. Результати кожного такого опитування записуються у спеціальні змінні та тимчасове сховище.

4) Основне завдання на цьому кроці – найбільш точно визначити співвідношення освітленості між кожними парами датчиків. Це дасть можливість розуміти, у який бік необхідно розвертати сонячну панель, щоб найбільш повно використати сонячну радіацію.

5) Обробка інформації та прийняття рішень. Отримані показники освітленості аналізуються алгоритмом, записаним у програмі Arduino. В алгоритмі розраховується середнє кожної пари показань (північ-південь та схід-захід) та визначається найбільш освітлена сторона.

6) Далі алгоритм порівнює ці показники із раніше завданими опорними рівнями та приймає рішення про необхідність зміни кута повороту платформи. Це забезпечує найбільш точне розташування сонячних панелей відносно джерела світла та покращує коефіцієнт корисної діяльності системи.

7) У результаті прийнятого розв'язку Arduino генерує спеціалізовані управляючі сигнали та надсилає ці сигнали на сервоприводи. В результаті платформа розвертається у найбільш освітлений бік – по горизонталі (азимут) та по вертикалі (зеніт).

Таким способом забезпечується найбільш точне розташування сонячних панелей, щоб вони завжди розташовувалися перпендикулярно сонячних променів.

Збереження історії показань та віддалений моніторинг. Додатково до вищеописаного алгоритму, всі показники освітленості та кути повороту записуються у пам'ять пристрою (або на карту пам'яті, підключену до Raspberry Pi). Це дає можливість аналізувати історію руху платформи та покращувати алгоритми управління.

Raspberry Pi, завдяки своїм розширеним можливостям, забезпечує можливість віддаленого підключення до системи та дистанційно спостерігати за станом пристрою. Це особливо корисно у великих сонячних станціях та дає можливість швидко виявляти можливі несправності.

Циклічне повторення алгоритму. Система працює циклічно, постійно перевіряючи показники освітленості та коригуючи розташування платформи кожні 5–10 секунд. Це дає можливість забезпечувати найбільш точне розташування сонячних панелей в міру руху сонця по небосхилу та покращувати використання відновлюваного джерела енергії.

Таким чином, розроблена система забезпечує найбільш точне відстеження руху сонця та дає можливість покращити використання відновлюваного джерела енергії, що є особливо важливим в умовах постійно зростаючих цін на електрику та скорочення природних ресурсів.

2.2 Визначення основних функціональних блоків системи

Для забезпечення ефективної роботи системи автоорієнтування сонячних панелей необхідно виділити її основні функціональні блоки, кожен з яких виконує певну роль у загальному процесі роботи пристрою. Ці блоки мають взаємодіяти між собою як єдина система, реагуючи на зміну зовнішніх умов (зокрема – положення Сонця) та відповідно коригуючи положення сонячної панелі.

Першим ключовим елементом є блок зчитування рівня освітленості, побудований на базі чотирьох світлочутливих сенсорів типу LDR, розташованих на панелі у формі квадрата (рис. 2.2). Така конфігурація дозволяє фіксувати напрямок, у якому інтенсивність світла найвища. Кожен сенсор реагує на освітленість у своєму секторі, і завдяки фізичному бар'єру між ними досягається краща точність у виявленні переваги одного напрямку над іншим.

Отримані від сенсорів аналогові сигнали передаються до обчислювального блоку, яким у даній системі виступає мікроконтролер Arduino. Основним завданням цього блоку є порівняння рівнів освітлення з кожного сенсора та прийняття рішення щодо напрямку повороту панелі. На основі різниці в інтенсивності світла Arduino визначає, чи необхідно змінювати положення сонячної панелі, і якщо так – у який саме бік. Простота цієї логіки дозволяє досягнути надійності при мінімальних обчислювальних витратах.

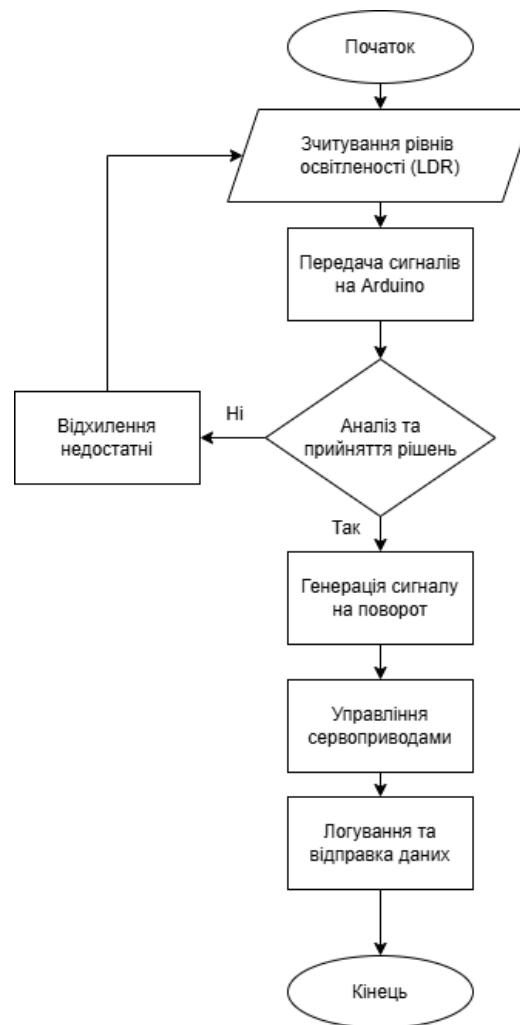


Рисунок 2.2 – Діаграма функціональних блоків системи

Коли рішення прийнято, Arduino формує керуючі сигнали, які подаються на приводний блок, що складається з сервоприводів або крокових двигунів. Саме цей блок виконує фізичну дію – змінює положення панелі у горизонтальній площині (азимут) або, за потреби, у вертикальній (кут нахилу). Такий підхід дозволяє системі постійно стежити за положенням Сонця, забезпечуючи орієнтацію панелі під максимально прямим кутом до джерела світла.

Допоміжну роль у системі виконує блок контролю та логування, який реалізується на основі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi. Цей модуль отримує дані з Arduino, зберігає статистику, може відображати інформацію у вигляді графіків або таблиць, а також забезпечує зручний інтерфейс для

користувача. У майбутньому його можна доповнити вебінтерфейсом або системою віддаленого керування.

Останнім важливим елементом логіки є механізм циклічного оновлення, який дозволяє системі з певним інтервалом перевіряти стан сенсорів та оновлювати положення панелі. Затримка між циклами (напр., 5–10 с) дає змогу уникнути постійних незначних рухів та знижує зношування механічних частин.

Усі ці блоки разом формують повноцінну систему автоматичного керування орієнтацією сонячної панелі, що є простою у реалізації, надійною в експлуатації й відкритою до подальших вдосконалень. Саме така структура була обрана для реалізації у межах даного дипломного проєкту.

2.3 Загальна логіка роботи системи

Система автоорієнтування сонячних панелей розроблена з метою забезпечити найбільш повне та стабільне використання сонячної радіації протягом світлового дня. Її головне завдання полягає в постійному відстеженні руху Сонця по небосхилу та точному розташуванні сонячних панелей під найбільш вигідних кутів. Це дає можливість покращити ефективність перетворення сонячної енергії в електрику та забезпечити найбільш високу віддачу всієї системи.

Основна ідея ґрунтовно спирається на використання світлочутливих резисторів (LDR), розташованих у чотирьох точках – північ, південь, схід та захід. Вони постійно фіксують рівень освітленості кожної із цих зон. На підставі цих показників спеціалізований алгоритм визначає найбільш освітлену ділянку та дає команду на поворот платформи у цьому напрямку.

У цьому процесі головну роль покладається на використання контролера Arduino, який аналізує інформацію від сенсорів та генерує керуючі сигнали для сервоприводів. В результаті такого точного позиціонування сонячних панелей покращується використання сонячної енергії та підвищується загальний коефіцієнт корисної діяльності системи.

Raspberry Pi використовується як допоміжний пристрій, завдяки якому забезпечується можливість віддаленого моніторингу та управління системою, а також збереження історії показників освітленості та кута повороту.

Деталізований алгоритм роботи системи

1) Ініціалізація системи: Після ввімкнення джерела живлення відбувається процес ініціалізації кожного із компонентів системи – світлочутливих резисторів, сервоприводів, а також контролера Arduino та допоміжного Raspberry Pi. Це дає можливість забезпечити готовність до коректної роботи та точних розрахунків.

2) Зчитування даних з сенсорів: Чотири LDR розташовуються у вигляді квадрату та постійно вимірюють рівень освітленості кожного із своїх секторів (північ, південь, схід, захід). Ці дані дають точне розуміння розподілу сонячних променів у просторі.

3) Обробка інформації: Arduino розраховує середнє освітлення кожної пари протилежних світлочутливих резисторів (наприклад, північ-південь та схід-захід) та визначає найбільш освітлений напрямок. Це дає можливість зрозуміти, куди саме необхідно розвертати сонячну панель.

4) Прийняття рішення: В разі, якщо різниця між рівнями освітленості перевищує задіяний поріг (англ. threshold), алгоритм приймає розв'язок про необхідність зміни кута повороту платформи. Це забезпечує точне відстеження руху сонця та покращує ефективність використання сонячних ресурсів.

5) Керування приводами: На підставі прийнятого рішення Arduino генерує управляючі сигнали та надсилає їх сервоприводам. В результаті платформа розвертається у найбільш освітлений бік, покращуючи тим самим поглинання сонячних променів.

6) Пауза: Після кожного повороту система деякий час чекає (наприклад, 5–10 с) для стабілізації та забезпечення точних показників, щоб уникати постійних дрібних рухів, що швидко зношують механіку.

7) Циклічне повторення: Після цієї паузи алгоритм знову звертається до даних із світлочутливих резисторів, щоб визначити новий найбільш освітлений напрямок та за необхідності відкоригувати розташування сонячних панелей. Цей процес триває безперервно поки є сонячне світло.

Таким чином, розроблена система забезпечує найбільш точне відстеження руху сонця та дає можливість покращити використання відновлюваного джерела енергії, що є особливо важливим в умовах постійно зростаючих цін на електрику та скорочення природних ресурсів.

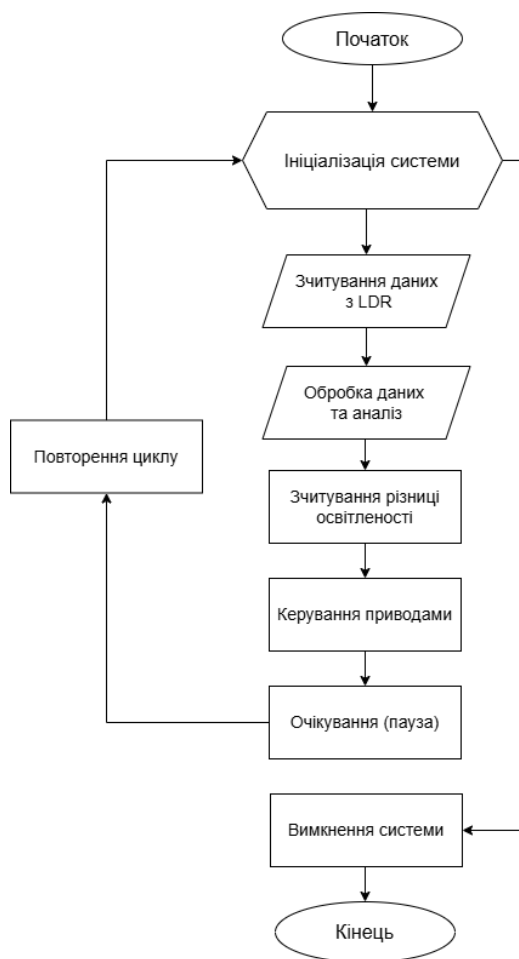


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму роботи системи

Таким чином, алгоритм роботи системи автоорієнтування побудований на простій, але ефективній логіці: виявлення максимального рівня освітленості, прийняття рішення на основі порівняння сенсорних даних та відповідне керування приводами панелі. Завдяки циклічному принципу

роботи забезпечується постійне коригування положення панелі протягом усього світлового дня без потреби втручання з боку користувача.

2.4 Апаратна реалізація системи автоорієнтування

Реалізація апаратної складової системи орієнтації сонячних панелей є одним із найбільш критичних та відповідальних етапів розробки такого пристрою. Від правильно підібраних електронних компонентів, розроблених схем підключення та точно виконаного монтажу безпосередньо залежить стабільність, точність позиціонування, а також термін служби всієї установки. У цьому розділі розглянуто головні аспекти розробки апаратних засобів, що забезпечують повноцінну роботу системи.

Основні завдання розробки апаратної частини

1) Вибір електронних компонентів: в цьому проєкті використано найбільш розповсюджені та економічно вигідні пристрої, що забезпечують необхідний рівень точності та швидкість реакції системи на зміну освітленості. Це дає можливість досягти стабільних результатів за розумну ціну.

2) Схема підключення та розташування компонентів: всі модулі та деталі розташовуються таким чином, щоб забезпечити найбільш раціональне розведення провідників, покращити швидкість реакції та спростити можливість обслуговування системи в разі необхідності.

3) Забезпечення стабільності та точності: в процесі розробки було звернуто особливу увагу на забезпечення точних вимірювань рівнів освітленості та правильне позиціонування сонячних панелей. Це досягається завдяки використанню резистивних поділювачів напруги та алгоритмів фільтрації результатів вимірювання.

4) Довговічність та надійність: всі використані пристрої розраховані на безперервну роботу у зовнішніх умовах та відрізняються підвищеною міцністю, термостійкістю та стабільними електричними характеристиками,

що дає змогу забезпечити безперебійну роботу системи впродовж багатьох років.

Вибір найбільш доцільних рішень. У розробці апаратної платформи було зроблено акцент на використанні найбільш розповсюджених, перевірених часом та легкодоступних електронних компонентів. Це дає можливість швидко розгортати виробництво такого пристрою, забезпечувати легкість в обслуговуванні та розширенні системи за необхідності, а також знижувати загальні витрати на розробку та експлуатацію.

Таким чином, розроблена апаратна платформа забезпечує всі необхідні умови для точного відстеження положення сонячних панелей, тим самим покращуючи ефективність використання сонячної енергії та забезпечуючи найбільш повне використання відновлюваного джерела електроживлення.

2.4.1 Фоторезистори як сенсори освітленості

У сучасних енергетичних проєктах дедалі більшого поширення набувають системи активного орієнтування сонячних панелей, що дозволяють збільшити ефективність поглинання енергії за рахунок динамічного відстеження положення Сонця.

В рамках аналізу було розглянуто прототип системи сонячного трекера, реалізованої на платформі Arduino, що використовує чотири фоторезистори (LDR), два серводвигуни та систему логічного порівняння освітленості. Принцип роботи такої системи полягає в тому, що мікроконтролер зчитує аналогові значення з фоторезисторів, які розміщені по діагоналях хрестоподібного корпусу. У випадку виявлення нерівномірності освітлення (тобто одного напрямку з більшою інтенсивністю світла), контролер подає команди на відповідні серводвигуни для корекції положення панелі.

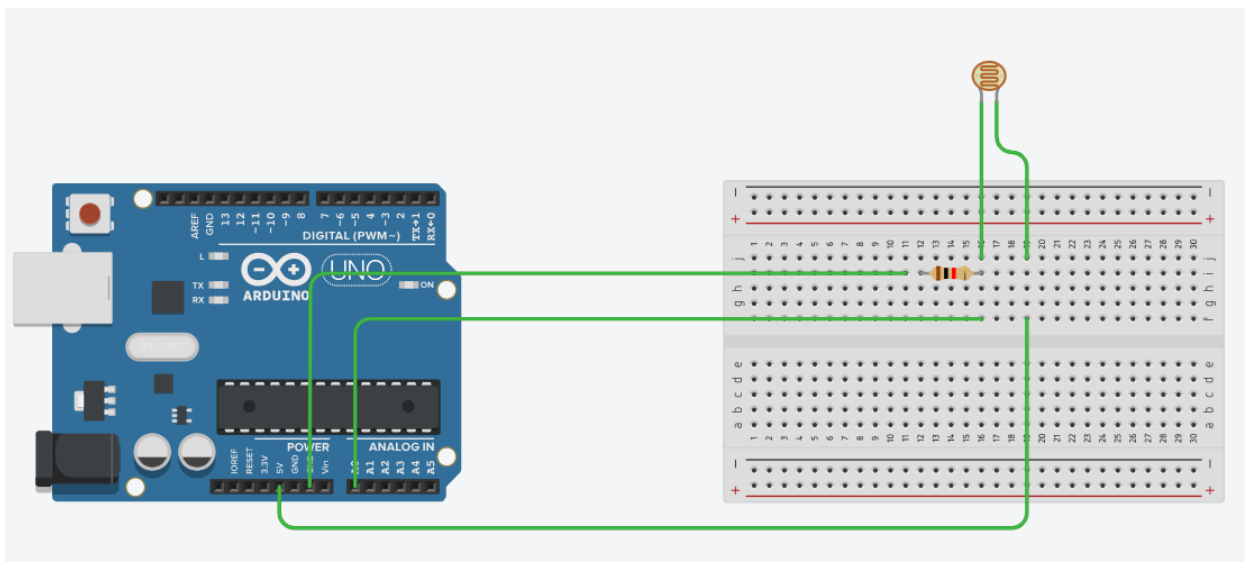


Рисунок 2.4 – Приклад простої схеми з LDR датчиком,
який реагує на наявність світла

Щоб уникнути перешкод, спричинених розсіяним світлом, між фоторезисторами встановлюються вертикальні перегородки, які формують своєрідні «тунелі», що пропускають світло лише з певного напрямку. Це дозволяє більш точно оцінювати, з якого боку падає світло найсильніше.

Ця схема демонструє базове підключення фоторезистора (LDR) до аналогового входу мікроконтролера Arduino. Фоторезистор змінює свій опір залежно від інтенсивності світла, що дозволяє Arduino зчитувати рівень освітленості та відповідно керувати сервоприводами для орієнтації сонячної панелі. Для реалізації двовісної системи орієнтування можна використовувати чотири LDR, розташовані по кутах хрестоподібного корпусу, що дозволить точно визначати напрямок на джерело найбільшої освітленості.

2.4.2 Вибір Arduino як керуючого модуля

Центральним координатором всієї системи було обрано мікроконтролер Arduino Uno. Вибір цієї плати обумовлений цілим комплексом переваг, завдяки чому цей пристрій найбільш повно відповідає поставленим завданням. По-перше, Arduino Uno характеризується високою стабільністю та надійністю в процесі роботи, що є критично важливим у системах, де точно визначається

положення сонячних панелей у просторі. По-друге, цей контролер містить достатню кількість аналогових входів, що дає можливість підключати всі необхідні фоторезистори та забезпечувати точне вимірювання рівнів освітленості.

Додатковою перевагою Arduino є зручне програмне забезпечення та розвинена спільнота розробників, завдяки чому існує велика кількість готових алгоритмів та навчальних матеріалів, що істотно спрощують розробку та налагодження системи. Це дає можливість швидко перейти від розробки концепції до практичної реалізації пристрою.

Arduino Uno це мікроконтролерна плата, яка базується на 8-бітному мікроконтролері ATmega328 виробництва компанії Atmel. Цей контролер працює з тактовою частотою 16 МГц, що забезпечує досить високу швидкість обробки команд і сигналів, необхідних для точного керування пристроями та збору даних у реальному часі. Висока тактова частота дозволяє системі швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі, що особливо важливо для систем відстеження положення сонця, де час реакції впливає на ефективність роботи.

Плата Arduino Uno оснащена 14 цифровими лініями вводу-виводу, які можуть працювати як на прийом, так і на передачу сигналів. З цих 14 ліній шість підтримують широтно-імпульсну модуляцію, що дає змогу здійснювати більш точне керування зовнішніми пристроями, наприклад, регулювати яскравість світлодіодів або швидкість двигунів. Ця можливість дуже корисна при управлінні позиціонуванням сонячних панелей, оскільки PWM дозволяє плавно налаштовувати параметри без ривків.

Для роботи з аналоговими сигналами плата має 6 аналогових входів. Вони використовуються для підключення різноманітних датчиків, зокрема фоторезисторів, які вимірюють рівень освітленості. Аналогові входи перетворюють змінні напруги з датчиків у цифрові значення, що дозволяє мікроконтролеру обробляти інформацію про інтенсивність світла з високою точністю.

Внутрішня пам'ять Arduino Uno поділена на три основні типи:

- Flash-пам'ять обсягом 32 кбайт використовується для збереження основної програми та алгоритмів, які запускаються під час роботи пристрою;
- SRAM обсягом 2 кбайт служить для тимчасового збереження даних, які потрібні в процесі виконання програми (наприклад, поточні показники датчиків, проміжні обчислення);
- EEPROM обсягом 1 кбайт це енергонезалежна пам'ять, яка зберігає дані навіть при вимкненому живленні. Вона використовується для збереження допоміжної інформації, такої як історія показників або налаштування системи.

Живлення плати Arduino Uno рекомендується подавати в діапазоні від 7 до 12 В. При цьому пристрій може безпечно працювати навіть при напрузі від 6 до 20 В, що дає гнучкість у виборі джерела живлення. Це особливо важливо для автономних систем, які можуть живитися від акумуляторів, сонячних панелей або зовнішніх адаптерів, забезпечуючи стабільну роботу за різних умов.

Щодо навантаження, кожен цифровий вивід здатен пропускати струм до 40 мА, що достатньо для підключення більшості сенсорів та невеликих виконавчих пристроїв. Вивід з напругою 3,3 В може видавати до 50 мА, що дозволяє ефективно жити низьковольтні периферійні модулі.

Плата має роз'єми для комунікаційних інтерфейсів SPI та I²C, які дають змогу легко підключати додаткові модулі – наприклад, бездротові модулі (Wi-Fi, Bluetooth), датчики руху, температури, вологості та інші. Це розширює функціональні можливості системи, дозволяючи будувати комплексні пристрої для автоматичного відстеження положення сонця, керування механізмами повороту та збору великого обсягу даних для аналізу.

Завдяки цим особливостям Arduino Uno є ідеальною платформою для розробки автономних систем контролю, таких як трекери сонячних панелей, що оптимізують кут нахилу для максимальної ефективності сонячної енергії.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Arduino Uno

Характеристики	Дані
Контролер	ATmega328
Робоча напруга, В	5
Рекомендований діапазон напруги живлення, В	7–12
Межі напруги джерела, В	6–20
Кількість цифрових ліній вводу/виводу, шт	14 (6 із можливістю PWM-модуляції)
Аналогові канали, шт	6
Максимальний струм на кожному виводі, мА	до 40
Вихідний струм лінії 3,3 В, мА	до 50
Пам'ять програми (Flash), кбайт	32 (0,5 кбайт відведено завантажувачем)
Оперативна пам'ять (SRAM), кбайт	2
Енергонезалежна пам'ять (EEPROM), кбайт	1
Тактова швидкість процесора, МГц	16
Роз'єми підключення	USB-B, роз'єм постійного струму
Розміри плати, мм	68,58 × 53,34
Маса, г	приблизно 25
SPI-інтерфейс	підтримується
I ² C-інтерфейс	підтримується
Рівень логіки, В	5

Основний принцип роботи системи ґрунтовний на зчитуванні рівнів напруги з фоторезисторів за допомогою *analogRead()*. В результаті цієї операції контролер отримує інформацію про освітленість кожного фоторезистора та на підставі цих даних розраховує найбільш точне положення сонячної панелі у просторі. Це дає можливість забезпечити найбільш повне використання сонячної радіації та підвищити загальний коефіцієнт корисної діяльності установки.

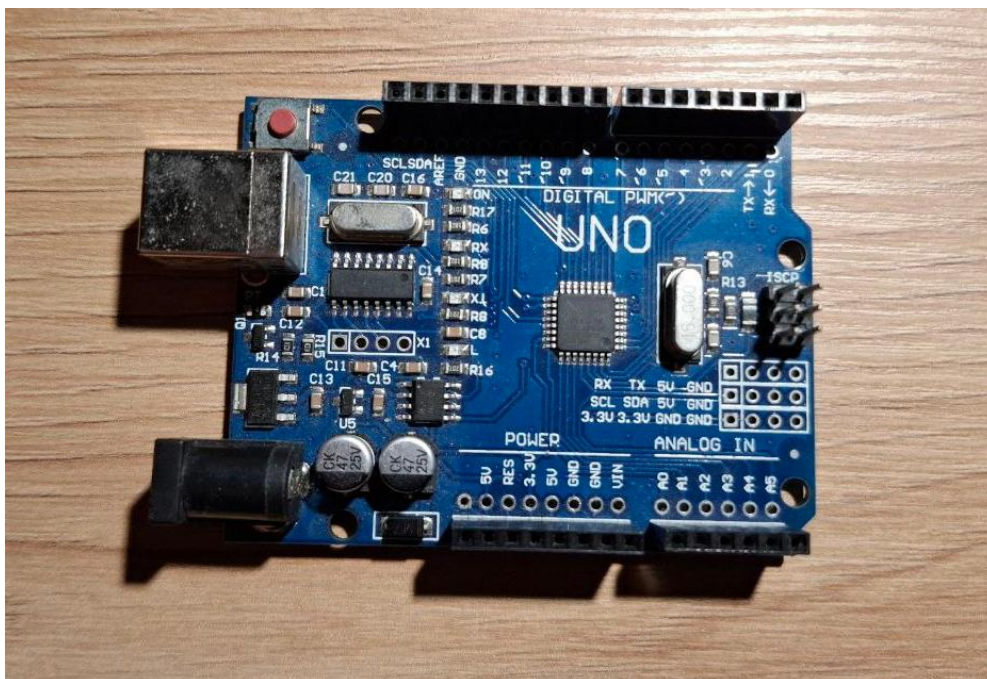


Рисунок 2.5 – Arduino Uno

До кожного фоторезистора підключений спеціально розроблений резистивний поділювач напруги, завдяки чому рівень напруги завжди залишається в безпечних та стабільних межах, що дає можливість точно та без завад проводити аналогові виміри. Зчитування кожного каналу проводиться декілька разів із подальшим усередненням результатів. Така процедура дозволяє нейтралізувати вплив випадкових флуктуацій напруги та забезпечити найбільш точну та стабільну інформацію про рівень освітленості кожної ділянки сонячної панелі.

2.4.3 Серводвигуни як виконавчі пристрої

В системі автоорієнтації сонячних панелей основним елементом механізму повороту виступають сервоприводи. Їхнє застосування є найбільш раціоналізаційно обґрунтованим та технічно доцільно точно завдяки можливості забезпечити високу точність, швидкість та плавність руху платформи із сонячними панелями в просторі. Це дає можливість найбільш повно використати сонячну радіацію та покращити рівень генерації електричної енергії.

Сервоприводи дозволяють змінювати положення панелі у двох координатах – по горизонталі та по вертикалі – тим самим забезпечують точне відстеження руху Сонця та найбільш вигідний кут падіння сонячних променів. Це дає можливість покращити продуктивність установки до 30 % у порівнянні зі статично розташованою сонячною панеллю.

Для реалізації двовимірного орієнтування використовується два серводвигуни із робочим кутом повороту до 180°. Перший сервопривод відповідає за поворот платформи в горизонтальній площині (азимут) – він забезпечує точне наведення системи в напрямку джерела світла від сходу до заходу. Другий сервопривод відповідає за нахил панелі по вертикалі (кут висоти) – завдяки цьому платформа може змінювати своє положення вгору та вниз, щоб найбільш повно вловлювати сонячну радіацію, яка постійно змінюється протягом дня та за порами року. Така конструкція дає можливість системі швидко та з високою точністю відслідковувати рух сонячного диска та підтримувати найбільш прийнятний кут розташування сонячних батарей.

Керування сервоприводами відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції – найбільш розповсюдженого та точного методу позиціонування сервомеханізмів. Контролер Arduino генерує серії прямокутних імпульсів із певною завчасно розрахованою тривалістю, кожний із яких відповідає необхідному куту повороту сервомотора. В результаті вал сервопривода зміщується у бажане положення. Перед кожною командою контролер перевіряє, чи новий кут не виходить за механічно допустимий діапазон руху – це дає можливість уникати механічних пошкоджень, руйнації та перевантажень, забезпечуючи тим самим стабільну та безпечну роботу системи в цілому.

Для цієї системи найчастіше застосовуються найбільш розповсюджені серводвигуни типу SG90 та MG996R, що поєднують у собі високу точність, потужний крутний момент та економне споживання електроенергії – ці показники є вирішальними при розробці автономних, малопотужних систем відстеження сонячних панелей.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики серводвигунів

Характеристика	SG90	MG996R
Тип	Мікросерводвигун	Металевий серводвигун
Робоча напруга, В	4,8 – 6,0	4,8 – 7,2
Робочий кут повороту, °	0 – 180	0 – 180
Крутний момент, кг·см	1,8 (при 4,8 В)	9,4 (при 6 В)
Швидкість повороту, с	0,1 с/60° (при 4.8 В)	0,15 с/60° (при 6 В)
Вага, г	приблизно 9	приблизно 55
Розміри, мм	22,2 × 11,8 × 31	40,7 × 19,7 × 42,9
Зубчаста передача	Пластик	Метал
Вказані роз'єми, шт	3 (Vcc, GND, PWM)	3 (Vcc, GND, PWM)
Управління	PWM (ШІМ)	PWM (ШІМ)
Споживання струму, мА	100–250	до 500
Реалізація зворотнього зв'язку	Внутрішній потенціометр	Внутрішній потенціометр
Внутрішній кут роздільності, °	0,1	0,1
Реакція на команду	швидка, точна	швидка, точна
Ресурс та термін служби	до 500'000 циклів	до 500'000 циклів



Рисунок 2.6 – Серводвигун SG90

Основні переваги використання сервоприводів:

- висока точність позиціонування (роздільна здатність до $0,1^\circ$);
- мала вага та розміри, що дає можливість застосовувати ці пристрої в легких конструкціях;
- енергоощадне споживання: завдяки цьому вся система може працювати від автономних джерел електроживлення;
- високий крутний момент, що дає можливість повертати досить великі сонячні панелі;
- внутрішній зворотний зв'язок забезпечує точне позиціонування та швидкість реакції на зміну розташування джерела світла.

Дані серводвигуни завдяки своїм характеристикам забезпечують точне та стабільне відстеження руху сонця, покращують виробіток електроенергії та підвищують загальний ККД сонячних станцій. Вказані пристрої характеризуються міцною конструкцією, великим терміном служби та легкістю в управлінні завдяки стандартно розповсюдженим алгоритмам PWM.

2.4.4 Raspberry Pi для контролю і логування

У розробленій системі використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B, завдяки чому розширюються можливості та забезпечується висока гнучкість всієї установки. Основне завдання Raspberry Pi полягає у прийомі й обробленні інформації, яка надходить від контролера Arduino, а також у збереженні історії зміни положення сонячних панелей та інших пов'язаних із цим даних. Це дає можливість проводити аналіз результатів та покращувати алгоритми позиціонування у міру необхідності.

Raspberry Pi забезпечує зручний інтерфейс для віддаленого доступу до накопичених даних, завдяки чому користувач може спостерігати за історією руху сонячних панелей та станом системи в цілому. Це особливо корисно під час профілактики, покращення точності позиціонування та розробки нових алгоритмів управління.

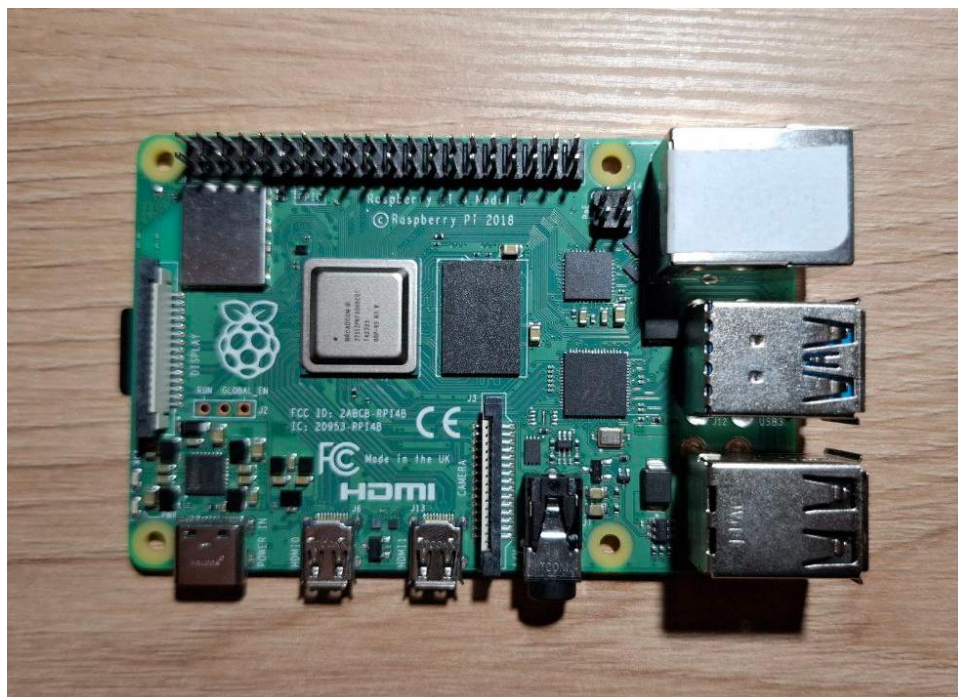


Рисунок 2.7 – Raspberry Pi 4 Model B

З'єднання між Raspberry Pi та Arduino здійснюється за допомогою інтерфейсу USB або послідовного каналу UART. В цьому випадку Raspberry Pi виступає в ролі допоміжного пристрою-монітора, який не втручається у процес безпосереднього керування механікою установки, а лише збирає інформацію та дає можливість здійснювати аналітику та покращувати алгоритми на підставі історичних даних.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики Raspberry Pi 4 Model B

Характеристика	Дані
Процесор	4-ядерний ARM Cortex-A72 (BCM2711)
Тактова частота, ГГц	1,5
Оперативна пам'ять (RAM), ГБ	2, 4 або 8 LPDDR4
Графіка	Відеоядро VideoCore VI
Відео	2 роз'єми micro HDMI
Бездротовий зв'язок	Вбудований WiFi 802.11ac, Bluetooth 5.0
Дротовий зв'язок, Мбіт/с	Ethernet (10/100/1000)
USB-порти	2 × USB 2.0 + 2 × USB 3.0
Слот карт пам'яті	microSD

Характеристика	Дані
GPIO, шт	40 роз'ємів вводу-виводу
Живлення, В, А	5, 3 (USB Type-C)
Розміри, мм	85,60 × 56,50
Операційна система	Raspberry Pi OS (або інші Linux-на базі)

Переваги використання Raspberry Pi 4 Model B:

- висока продуктивність: завдяки потужному 4-ядерному процесору та розширюваній оперативній пам'яті пристрій швидко опрацьовує інформацію та забезпечує швидкість реакції всієї системи.
- гнучкість: завдяки роз'ємам GPIO, розширювальному слоту microSD та роз'ємам USB ви можете легко підключати додаткові пристрої – датчики, модулі розширення, веб-камери тощо.
- широке співтовариство: Raspberry Pi підтримується великим співтовариством розробників, завдяки чому ви завжди можете розраховувати на готові розв'язання, навчальні матеріали та допомогу.
- універсальність: цей комп'ютер можна використати в найрізноманітніших проєктах – від розумних будинків до систем автоматизації виробництва.
- дистанційний доступ: завдяки бездротовому зв'язку ви можете підключатися до пристрою віддалено та аналізувати історичну інформацію, покращувати алгоритми та проводити профілактику системи без виїзду на місце установки.

Недоліки використання Raspberry Pi 4 Model B:

- споживання електроенергії: Raspberry Pi споживає більше електроенергії, ніж деякі спеціалізовані контролери (наприклад, Arduino), що може бути критично для автономних систем із сонячними батареями.
- складність програмування: розробка програм для Raspberry Pi вимагає знань Linux, Python та інших технологій, що дещо підвищує поріг входу.

– вразливість до відмови: використання повноцінної операційної системи збільшує ймовірність помилки програми, зависань та інших програмних збоїв, що необхідно враховувати під час розробки системи з високою надійністю.

Raspberry Pi 4 Model B є потужною та універсальною платформою, що підходить для реалізації складних проєктів з підключенням різноманітних периферійних пристроїв. Водночас, використання цього мікрокомп'ютера потребує вищого рівня технічної підготовки та ретельного врахування енергоспоживання й стабільності системи.

2.4.5 Фоторезистори і їх характеристики

Фоторезистор є одним із найважливіших компонентів системи автоорієнтації сонячних панелей. Завдяки своїй чутливості до освітлення він дає можливість визначати рівень освітленості та розташування джерела світла – тобто сонця – та забезпечувати точне позиціонування платформи.

Фоторезистор змінює свій опір залежно від інтенсивності світлового потоку: чим він вище, тим менший опір. Це дає можливість за допомогою аналогового входу Arduino визначати рівень освітлення кожного з розташованих фоторезисторів та розуміти, куди саме треба розвертати сонячну панель.



Рисунок 2.8 – Обраний фоторезистор

Фоторезистори зазвичай виготовляються із напівпровідникового матеріалу – сульфіду кадмію – завдяки чому вони характеризуються високою чутливістю у видимому діапазоні світла (400–700 нм). Їх опір може змінюватись у дуже широкому діапазоні – від декількох Ом при яскравому освітленні до декількох мегаом у повній темряві. Це дає можливість точно розрізняти рівень освітлення та швидко реагувати на зміну умов.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики фоторезистора

Характеристика	Дані
Матеріал	сульфід кадмію (англ. Cadmium Sulfide, CdS)
Діапазон опору, Ом, МОм	від приблизно 100 (при яскравому світлі) до 10 (в повній темряві)
Чутливий до світла, нм	видиме світло (400–700)
Швидкість реакції, мс	від 20 до 50
Робоча напруга, В	до 150 В
Робочий струм	до декількох міліампер
Діапазон температур, °С	від -30 до +70
Сфера застосування	детектори освітлення, світлові автомати, системи відстеження джерел світла

Фоторезистори є найбільш бюджетними, точними та надійними світлочутливими датчиками, що знайшли широке застосування в системах відстеження сонячних панелей та інших пристроях, де необхідно визначати рівень освітлення.

Використана конфігурація дає змогу створити ефективну, недорогу та легко масштабовану систему орієнтації. Завдяки використанню компонентів, що широко доступні, проєкт може бути реалізований як для дослідницьких цілей, так і для практичного використання у побуті або малому бізнесі. Всі елементи працюють узгоджено, забезпечуючи високу точність наведення панелі на джерело світла. Гнучкість програмного забезпечення та наявність додаткового контролера (Raspberry Pi) відкриває перспективи для подальшого

розвитку проєкту – наприклад, впровадження метеосенсорів, GPS-модуля чи бездротового моніторингу.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було виконано комплексне проєктування системи автоорієнтування сонячних панелей, що є основою для її подальшої апаратно-програмної реалізації. Розроблено загальний алгоритм роботи пристрою, визначено послідовність дій, які забезпечують безперервне відстеження положення Сонця, а також здійснено функціональне розбиття системи на ключові апаратні модулі.

На основі аналізу вимог до пристрою було обґрунтовано вибір технічних засобів, зокрема: використання LDR-сенсорів для зчитування освітленості, мікроконтролера Arduino як основного керуючого елемента, сервоприводів для виконання фізичного обертання панелі та одноплатного комп'ютера Raspberry Pi для моніторингу й логування. Усі компоненти обрано з урахуванням доступності, функціональності, енергоефективності та простоти інтеграції.

Деталізований алгоритм роботи системи дозволив побудувати логіку керування, що базується на обробці сенсорних даних, прийнятті рішень та відповідному керуванні приводами з урахуванням заданих порогових значень. Результати проєктування дозволяють перейти до наступного етапу – практичного втілення системи, її програмування, складання та тестування.

3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ТЕСТУВАННЯ

3.1 Фоторезистор LDR

Фоторезистор є одним із найпростіших та найбільш розповсюджених світлочутливих компонентів, який використовується в системах автоматики та розумних пристроях. Принцип його роботи ґрунтується на явищі фотопровідності: під дією світлового потоку опір фоторезистора зменшується, а за відсутності освітлення – збільшується.

У розробленій системі автоорієнтування сонячних панелей саме фоторезистори дають можливість визначати рівень освітленості кожного із чотирьох секторів. В результаті аналізу цих показників контролер Arduino приймає найбільш точне та швидке рішення про поворот платформи у найбільш освітлений бік.

Принцип роботи фоторезистора

Основа роботи фоторезистора ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекта у напівпровідниковому матеріалі, з якого він виготовлений (найчастіше сульфіді кадмію). В результаті потрапляння світлового потоку фотони збуджують електрони, переводять деяких із них із валентної зони у зону провідності, тим самим збільшують провідність матеріала та знижують його опір. Це явище є повністю оборотно: після припинення освітлення провідність вертається до попереднього рівня.

Таким чином, фоторезистор є резистором із змінюваним опором, який дає можливість перетворювати рівень освітлення у електричний сигнал – напругу, яка потім може бути проаналізована контролером Arduino.

Основні галузі застосування фоторезисторів

Фоторезистори знайшли широке застосування в найрізноманітніших галузях завдяки своїй точності, швидкості реакції та можливості легко інтегруватись у електронні схеми. Зокрема:

- в системах розумного освітлення: для ввімкнення світла ввечері та вимкнення його вдень;
- в сигналізації та системах безпеки: для детектування руху, вторгнень тощо;
- в робототехніці: для розпізнавання рівнів освітлення та прийняття рішень на цьому ґрунті;
- в сонячних станціях: для точно точного визначення розташування джерела світла та забезпечення найбільш вигідного кута установки сонячних панелей.

Вибір фоторезистора та розташування

У розробленій системі використано чотири фоторезистори марки **LDR** (Light Dependent Resistor). Вони розташовуються по кутах сонячної панелі у вигляді квадрата. Це дає можливість найбільш точно визначати найбільш освітлений бік та повертати платформу у цьому напрямку, покращуючи тим самим коефіцієнт корисної діяльності сонячних панелей.

У кожний із цих фоторезисторів включений резистор постійного опору (для утворення резистивного ділення напруги), щоб сформувати напругу, яка потім вимірюється аналоговими входами Arduino. Реалізація такого резистивного ділення дозволяла найбільш просто перейти від зміни освітлення до зміни рівня напруги, яку можна проаналізувати в програмі:

- електрична схема підключення
- схему підключення фоторезистора до Arduino ви можете побачити на цьому фрагменті:
 - фоторезистор підключений одним кінцем до джерела напруги (+5V).
 - другий кінець фоторезистора поєднується з резистором постійного опору (10 кОм).
 - в точці між фоторезистором та резистором утворюється роздільник напруги.
 - цю точку підключаємо до аналогового входу Arduino (A0).

Таким способом напруга на вході буде змінюватись в міру зміни освітлення, що дасть можливість програмно визначати рівень освітленості.

Принцип програмування та алгоритм роботи

Основний алгоритм роботи з фоторезистором досить простий:

- вказати пін підключення фоторезистора та світлодіода.
- в ініціалізації (*setup*) перевести піни в правильний стан.
- в головному циклі (*loop*) постійно зчитувати рівень освітленості за допомогою `analogRead`.
- вказати деяке порогове значення, наприклад 300, щоб розділити «темно» та «світло».
- вмикати світлодіод, якщо освітлення недостатнє.

Таким способом можемо швидко та просто перевести рівень освітлення у дискретний сигнал, який потім використовується в алгоритмі керування поворотом сонячних панелей.

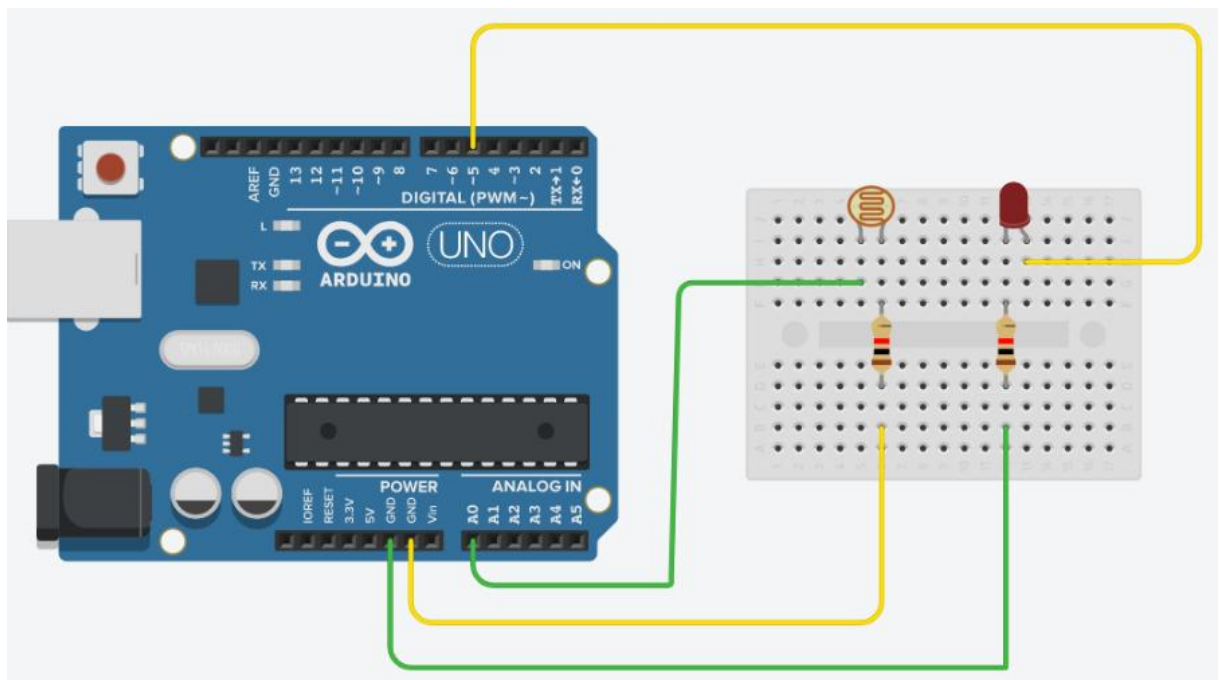


Рисунок 3.1 – Проста схема підключення фоторезистора

Опис програмного коду

У програмі спочатку проводиться ініціалізація (рис. 3.2).

```
const int led = 13;
const int sensorPin = A0;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(led, OUTPUT);
    pinMode(sensorPin, INPUT);
}
```

Рисунок 3.2 – Програмний код ініціалізації

У головному циклі алгоритм постійно зчитує рівень освітлення та на основі цих даних приймає рішення (рис. 3.3).

```
void loop()
{
    int sensorValue = analogRead(sensorPin);

    Serial.print("Рівень освітлення: ");
    Serial.println(sensorValue);

    if (sensorValue < 300) {
        digitalWrite(led, HIGH);
        Serial.print("Датчик зафіксував недостатнє освітлення\n");
    } else {
        digitalWrite(led, LOW);
        Serial.print("Датчик показує достатнє освітлення\n");
    }

    delay(500);
}
```

Рисунок 3.3 – Програмний код роботи головного алгоритму

Таким способом Arduino постійно аналізує рівень освітлення та за необхідності дає сигнал на ввімкнення світлодіода, який говорить про недостатнє освітлення. В умовах недостатнього освітлення алгоритм міг би повертати сонячну панель у найбільш освітлений бік, покращуючи тим самим рівень генерації електроенергії (рис. 3.4, 3.5).

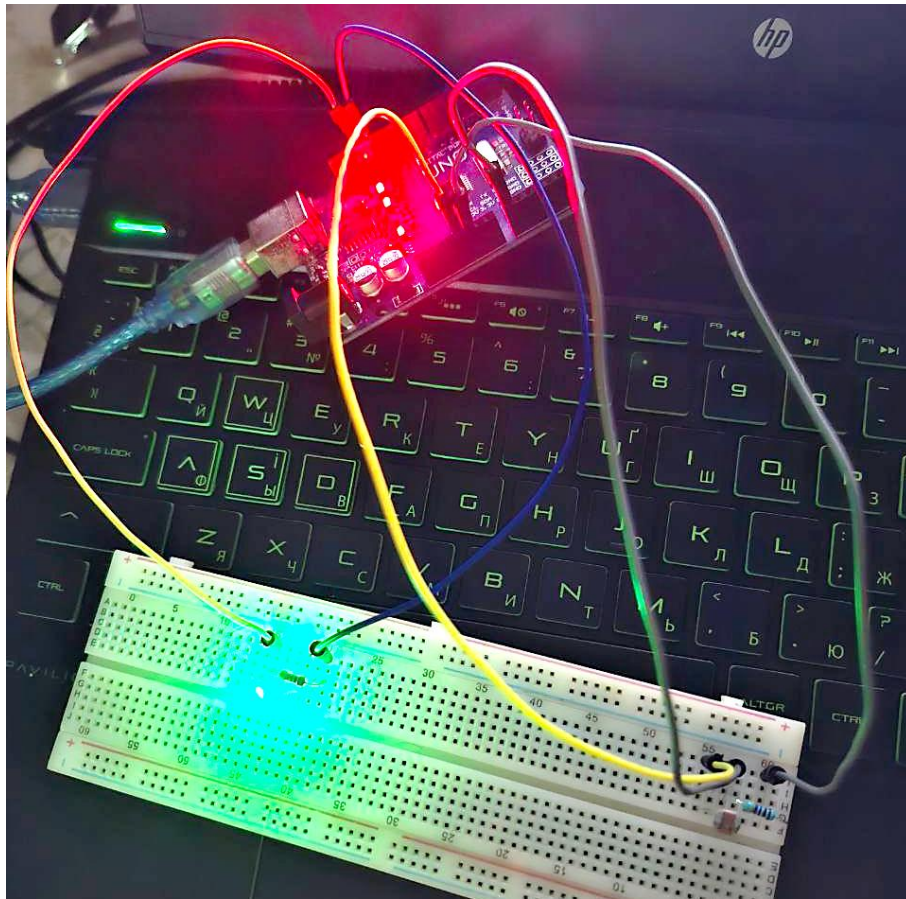


Рисунок 3.4 – Реакція фоторезистора на відсутність світла

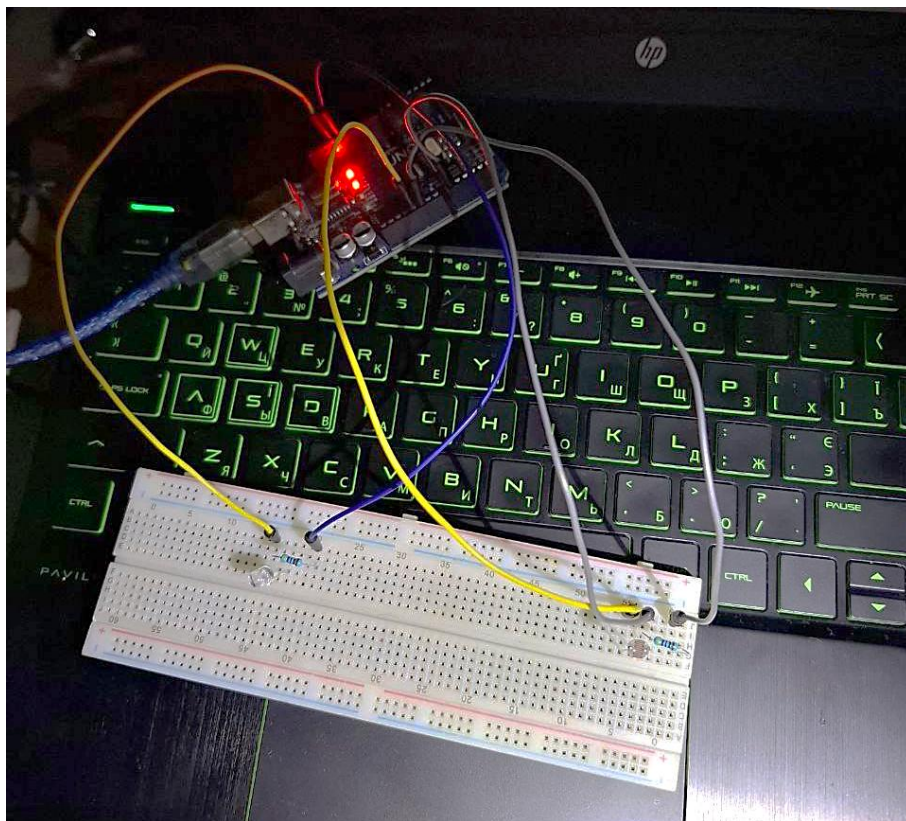


Рисунок 3.5 – Реакція фоторезистора на наявність світла

У розробленому пристрої використано чотири фоторезистори, розташовані по кутах платформи (північ, південь, схід та захід). Це дає можливість найбільш повно відсліджувати розподіл освітлення та швидко визначати найбільш освітлену сторону, щоб розвертати сонячну панель у цьому напрямку.

Таким способом забезпечується точне та постійне відстеження руху сонця, покращується використання сонячної радіації та підвищується загальний коефіцієнт корисної діяльності системи.

3.2 Побудова системи відстеження сонця

У цьому розділі розглядається апаратне забезпечення та принцип роботи системи відстеження сонячних панелей, розробленої на базі Arduino та світлочутливих резисторів.

Система складається з двох світлочутливих резисторів, розташованих поруч, кожен із яких реагує на рівень освітленості. В результаті такого розташування можна визначати найбільш освітлений бік та повертати сонячну панель у цьому напрямку.

Основну обробку сигналів від LDR забезпечує контролер Arduino, який постійно аналізує показники кожного резистора. На підставі цієї інформації він генерує керуючий сигнал для сервоприводу, що змінює кут розташування панелі.

Таким чином, завдяки цьому алгоритму забезпечується найбільш точне відстеження джерела світла та покращується використання сонячної радіації. В результаті підвищується загальний коефіцієнт корисної діяльності системи та забезпечується найбільш повне використання відновлюваних джерел енергії.

Основа системи та використані компоненти

Система відстеження сонця складається із таких основних компонентів:

- контролер Arduino UNO: головний керуючий пристрій системи.
- сервоприводи (SG90): забезпечують поворот платформи із сонячними панелями у двох площинах: по горизонталі та по вертикалі.

- фоторезистори: світлочутливі резистори, що постійно відслідковують рівень освітленості кожної із зон.
- резистори: застосовуються для створення напруги, яка змінюється в міру зміни освітленості фоторезистора.
- макетна плата (breadboard): використовується для швидкого та зручного з'єднання компонентів.
- джерело живлення: забезпечує напругу 5 В для Arduino та сервоприводів.

Основну обробку сигналів від LDR забезпечує контролер Arduino, який постійно аналізує показники кожного резистора. На підставі цієї інформації він генерує керуючий сигнал для сервоприводу, що змінює кут розташування панелі. Це дає можливість покращити використання сонячної радіації та підвищити загальний коефіцієнт корисної діяльності системи.

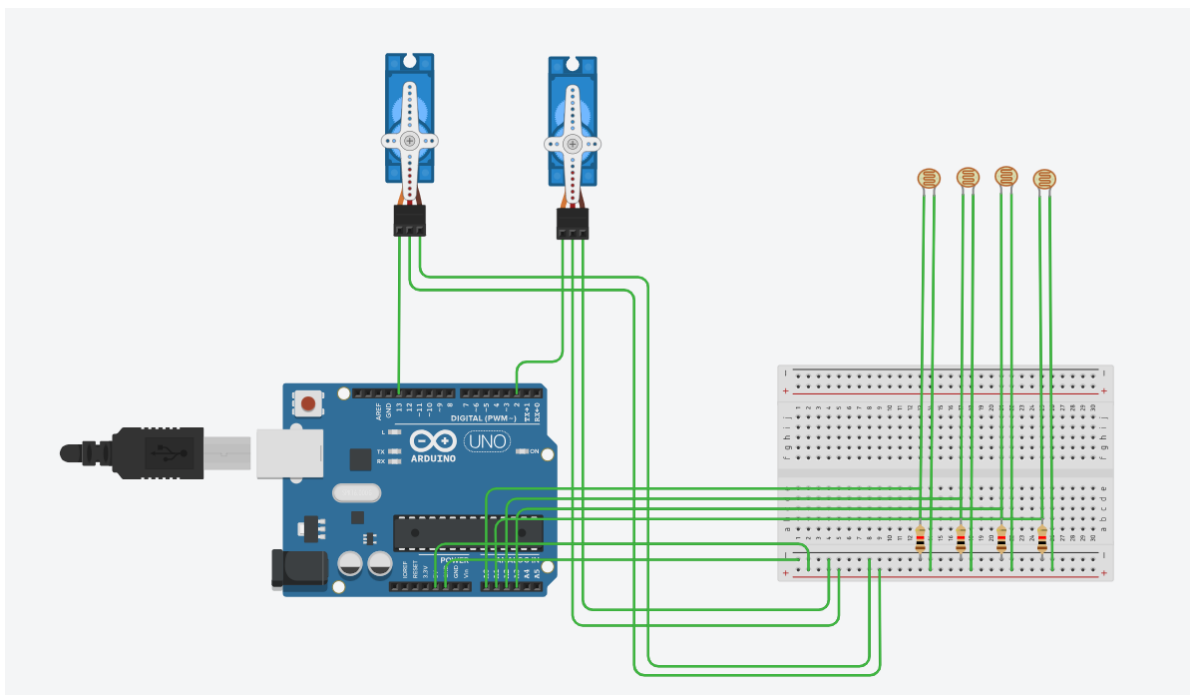


Рисунок 3.6 – Схема відстеження сонця

Ініціалізація змінних і пристроїв

На початку коду створюються два об'єкти типу Servo, які відповідають за керування горизонтальним (horizontal) і вертикальним (vertical) сервоприводами. Також оголошуються змінні, які зберігають поточні кути

повороту для кожного привода та граничні обмеження для їхнього руху (рис. 3.7).

```
int servohori = 180;  
int servohoriLimitHigh = 175;  
int servohoriLimitLow = 5;
```

Рисунок 3.7 – Частина коду керування горизонталлями та вертикалями

Фоторезистори підключаються до аналогових входів А0–А3. Вони розміщені по діагоналях платформи (верхні та нижні, ліві та праві), що дозволяє точно визначити напрямок на максимальне освітлення.

Також запускається серійний порт *Serial.begin(9600)*, який використовується для передачі даних до комп'ютера – наприклад, для візуалізації у середовищі Processing. Частота 9600 є стандартною для комунікації між Arduino та комп'ютером і дозволяє безперебійно надсилати дані про поточне положення сервоприводів (рис. 3.8).

```
Serial.begin(9600);  
  
horizontal.attach(2);  
vertical.attach(13);  
  
horizontal.write(servohori);  
vertical.write(servovert);  
  
delay(2000);
```

Рисунок 3.8 – Частина коду передачі даних

У цьому фрагменті також виконується ініціалізація сервоприводів та встановлення початкового положення платформи. Важливо зазначити, що на початку роботи Arduino потрібно трохи часу (затримка у 2 секунди), щоб сервомотори змогли фізично повернутися до початкових позицій без ривків чи нестабільної поведінки.

Після завершення ініціалізації система переходить у основний цикл роботи, де відбувається безперервне зчитування сигналів з фоторезисторів. Ці

дані використовуються для обчислення освітленості у кожній частині площини.

```
int lt = analogRead(ldr1t);  
int rt = analogRead(ldr1r);  
int ld = analogRead(ldr2l);  
int rd = analogRead(ldr2r);
```

Рисунок 3.9 – Частина коду зчитування фоторезисторів

Зчитування здійснюється через аналогові входи, оскільки фоторезистори формують змінну напругу, що прямо залежить від рівня освітлення. Значення, яке повертає *analogRead()*, лежить у діапазоні від 0 до 1023. Далі обчислюються середні значення по вертикалі та горизонталі.

```
int avt = (lt + rt) / 2;  
int avd = (ld + rd) / 2;  
int avl = (lt + ld) / 2;  
int avr = (rt + rd) / 2;
```

Рисунок 3.10 – Обчислення значень по вертикалі і горизонталі

Цей підхід дозволяє системі не реагувати на одиничні локальні відхилення освітлення, а визначати загальний напрямок на джерело світла. Це значно покращує стабільність системи й уникає «тремтіння» платформи.

Наступним кроком система визначає, чи потрібно змінювати положення панелі. Для цього використовується різниця між значеннями освітлення з різних сторін.

```
int dvert = avt - avd;  
int dhoriz = avl - avr;
```

Рисунок 3.11 – Різниця між значеннями в коді

Ці значення порівнюються з наперед визначеним порогом чутливості – толерантністю (*tol*). Якщо різниця перевищує цей поріг, відбувається регулювання положення сервоприводів.

```
if (abs(dvert) > tol) {  
  if (avt > avd) {  
    servoverv++;  
    if (servoverv > servovervLimitHigh) servoverv = servovervLimitHigh;  
  } else {  
    servoverv--;  
    if (servoverv < servovervLimitLow) servoverv = servovervLimitLow;  
  }  
  vertical.write(servoverv);  
}
```

Рисунок 3.12 – Логіка вертикального повороту сервоприводу

```
if (abs(dhoriz) > tol) {  
  if (avl > avr) {  
    servohori--;  
    if (servohori < servohoriLimitLow) servohori = servohoriLimitLow;  
  } else {  
    servohori++;  
    if (servohori > servohoriLimitHigh) servohori = servohoriLimitHigh;  
  }  
  horizontal.write(servohori);  
}
```

Рисунок 3.13 – Логіка горизонтального повороту сервоприводу

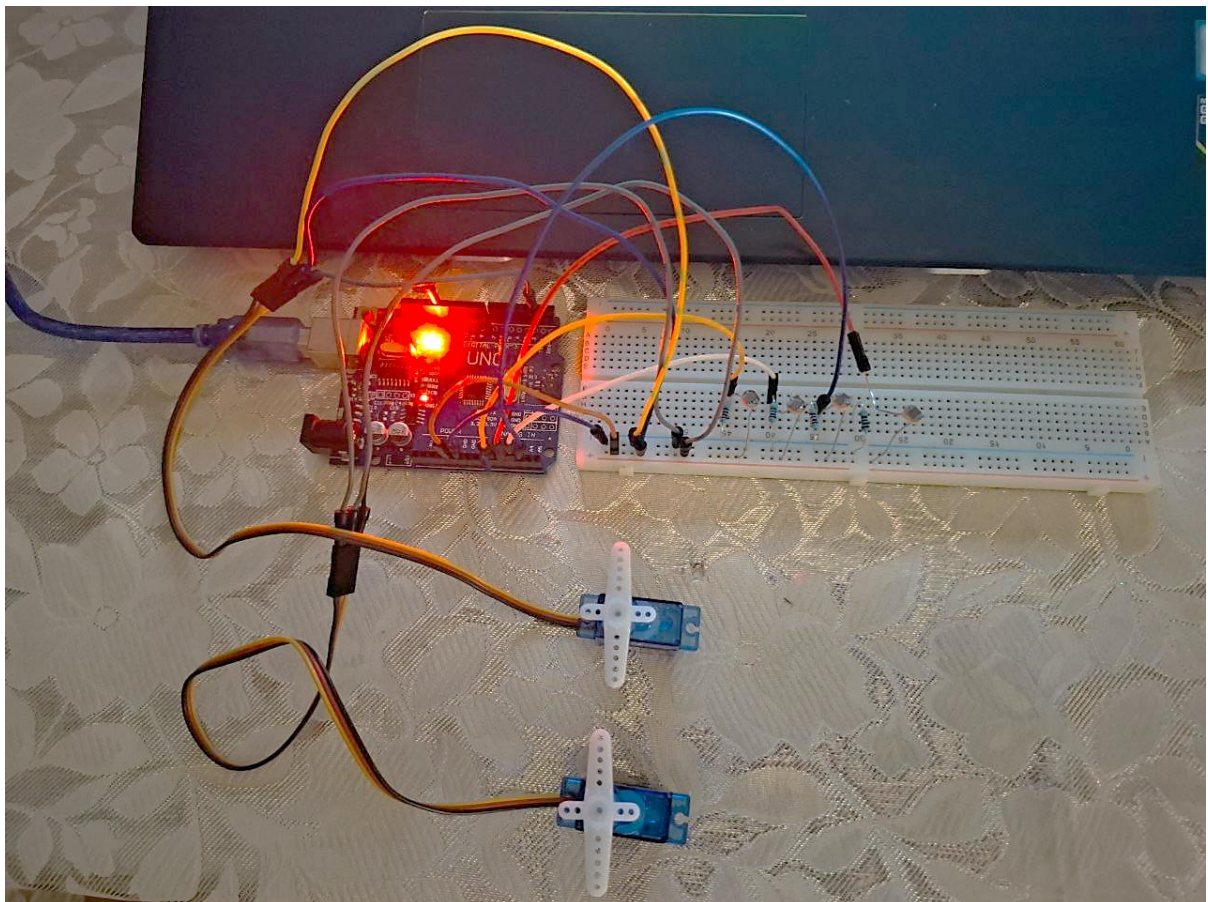


Рисунок 3.14 – Реалізація схеми відстеження сонця

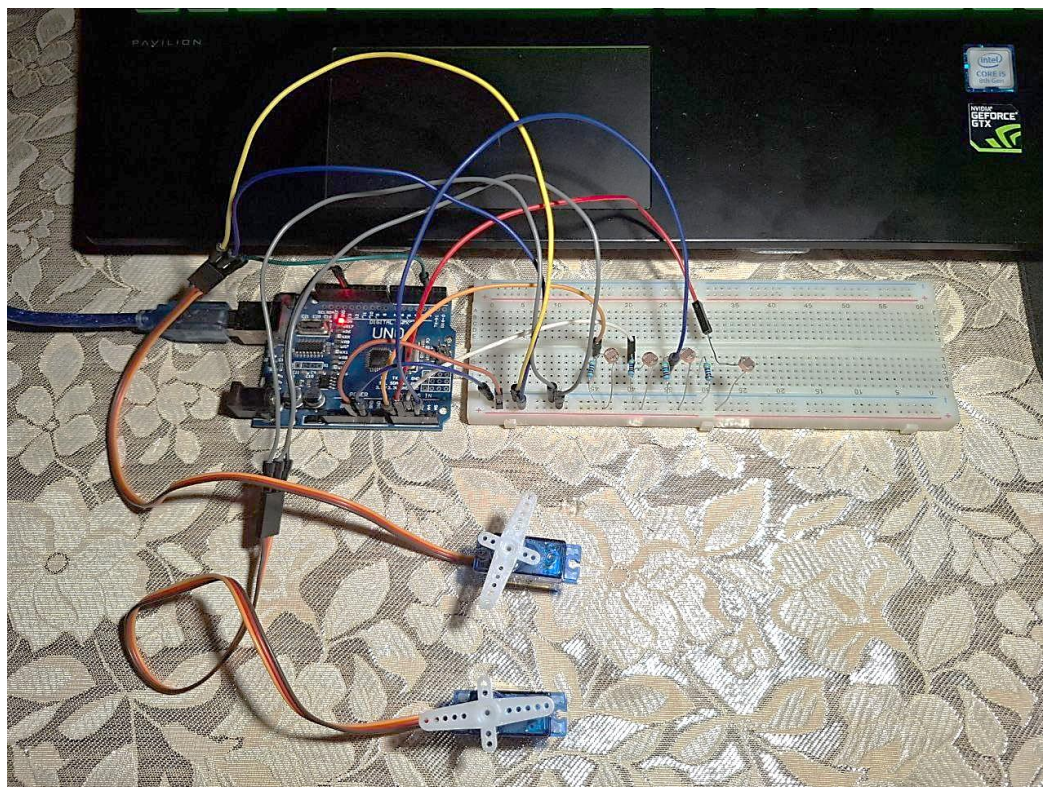


Рисунок 3.15 – Реакція на наявність світла та робота фоторезисторів та серводвигунів

У результаті реалізований алгоритм на Arduino забезпечує ефективне відстеження положення Сонця шляхом динамічного керування положенням сонячної панелі за допомогою сервоприводів. Завдяки використанню чотирьох фоторезисторів система реагує на зміни освітлення в реальному часі, а передача даних через послідовний порт дозволяє не лише проводити візуалізацію у Processing, але й відстежувати ефективність роботи трекера. Такий підхід демонструє просте, але надійне рішення для автоматизованого сонячного орієнтування.

3.3 Processing

У рамках створення системи відстеження положення Сонця було вирішено реалізувати програмну візуалізацію, яка дозволяє спостерігати за поведінкою сонячної панелі в режимі реального часу. Це стало можливим завдяки використанню середовища Processing – зручної, кросплатформної

мови програмування та середовища розробки, яка ідеально підходить для створення інтерактивної графіки.

3.3.1 Призначення візуалізації

Основною метою використання Processing є створення зручного інтерфейсу, який дозволяє в реальному часі відображати положення платформи з сонячною панеллю. Оскільки система обладнана двома сервоприводами (горизонтальним і вертикальним), які змінюють своє положення залежно від рівня освітлення, що надходить із чотирьох фоторезисторів, виникла потреба у способі зручного візуального контролю цих змін. Це особливо корисно у процесі налаштування, тестування або навчання, коли фізичний доступ до пристрою обмежений або недоцільний.

Передача інформації від Arduino до комп'ютера відбувається через послідовний порт (*Serial*). У програмі Arduino реалізована передача значень кутів обертання сервомеханізмів у текстовому форматі – два числа, що відповідають горизонтальному та вертикальному кутам, розділені комою. Ці дані зчитуються програмою в середовищі Processing і використовуються для побудови віртуальної моделі панелі, яка обертається відповідно до отриманих значень.

3.3.2 Передача даних з Arduino

Щоб забезпечити роботу з візуалізацією, в код Arduino необхідно додати функцію передачі актуальних значень кутів обертання. Для цього у функції `loop()` реалізовано виведення даних у форматі:

```
Serial.print("H:");  
Serial.print(servohori);  
Serial.print(" V:");  
Serial.println(servovert);  
  
delay(dtime);
```

Рисунок 3.16 – Введення даних

Такий підхід дозволяє формувати рядок, наприклад, 110,75, де перше число – кут повороту горизонтального сервопривода, а друге – вертикального. Ці значення легко інтерпретуються у Processing, оскільки структура повідомлень чітка та незмінна.

Паралельно в *setup()* потрібно ініціалізувати послідовний порт:

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  |  
  horizontal.attach(2);  
  vertical.attach(13);  
  
  horizontal.write(servohori);  
  vertical.write(servovert);  
  
  delay(2000);  
}
```

Рисунок 3.17 – Послідовні порти

Цього достатньо, аби налаштувати комунікацію та забезпечити стабільне надходження інформації до програми-візуалізатора.

3.3.3 Обробка даних у Processing

З боку обчислювальної системи (комп'ютера) роботу з даними виконує скетч, написаний у середовищі Processing. Ця програма відкриває з'єднання з вказаним СОМ-портом, очікує надходження даних, а потім перетворює їх у кути обертання 3D-об'єкта – віртуальної сонячної панелі. Код також реалізує інтерфейс, в якому об'єкт плавно обертається у просторі відповідно до положення справжньої платформи.

```
void setup() {
  size(600, 600, P3D);
  println(Serial.list());

  String portName = Serial.list()[0];
  myPort = new Serial(this, portName, 9600);
  myPort.bufferUntil('\n');
}

void draw() {
  background(255);
  lights();

  camera(width/2, height/2, 500, width/2, height/2, 0, 0, 1, 0);
  textSize(18);
  fill(0);
  text("Горизонтальний кут: " + angleH, 20, 30);
  text("Вертикальний кут: " + angleV, 20, 60);

  translate(width/2, height/2, 0);
  rotateY(radians(map(angleH, 0, 180, -45, 45)));
  rotateX(radians(map(angleV, 0, 100, -30, 30)));

  fill(150, 200, 255);
  stroke(0);
  box(200, 20, 100);
}

void serialEvent(Serial myPort) {
  input = myPort.readStringUntil('\n');
  if (input != null) {
    input = trim(input);

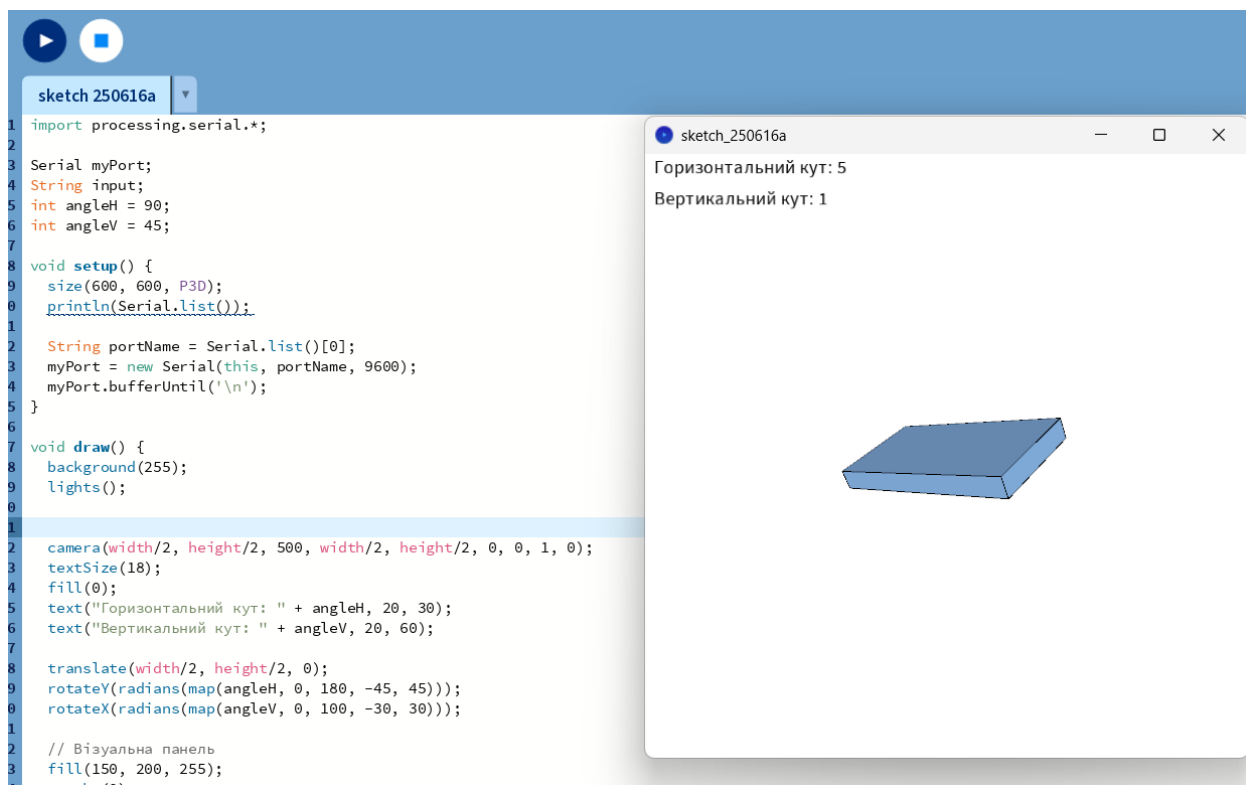
    if (input.startsWith("H:")) {
      String[] parts = splitTokens(input, ": V");
      if (parts.length == 3) {
        angleH = constrain(int(parts[1]), 0, 180);
        angleV = constrain(int(parts[2]), 0, 100);
      }
    }
  }
}
```

Рисунок 3.18 – Код Java для візуалізації сонячної панелі

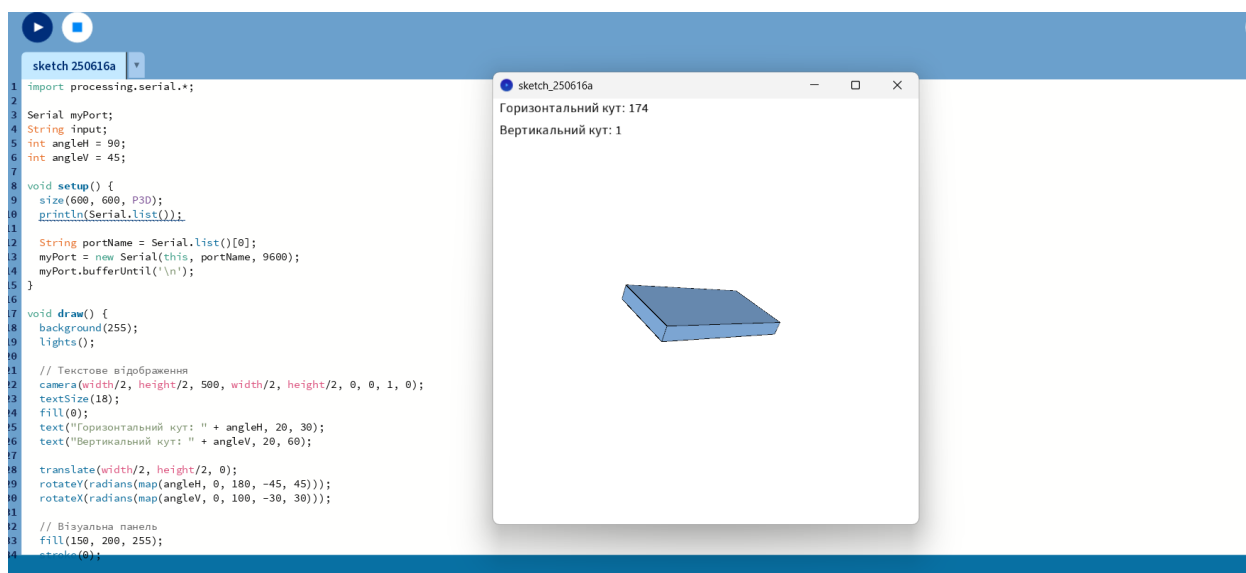
Важливою частиною є команда *Serial.list()*, яка дозволяє отримати список доступних портів. У графічному вікні зображено прямокутну панель, яка обертається навколо двох осей: горизонтальної (X) та вертикальної (Y). Повороти симулюють реальні рухи платформи, що приводиться у дію сервомеханізмами на фізичній моделі. Оскільки панель має лише два ступені свободи, тривимірна візуалізація повністю охоплює всі можливі її положення.

Команди *rotateX()* та *rotateY()* реалізують обертання об'єкта у 3D-просторі. Для підвищення реалістичності також використовується освітлення (*lights()*), яке створює ефект тіні та глибини. Колір панелі задано у відтінках синього для кращого візуального сприйняття. Завдяки цьому підходу вдається

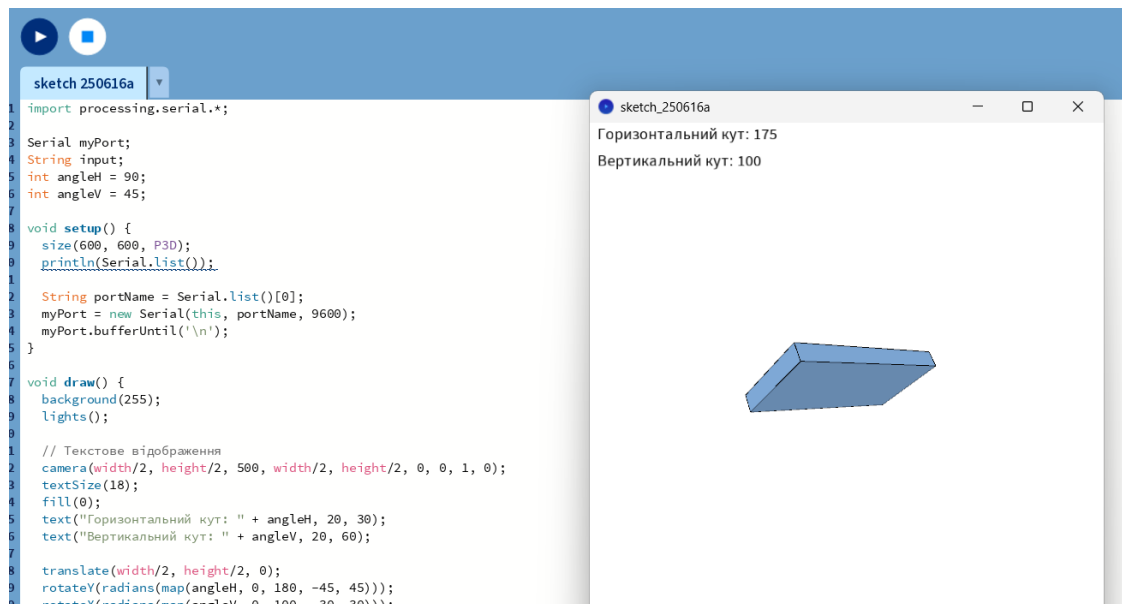
досягти плавної, зрозумілої візуалізації без необхідності складних графічних бібліотек або зовнішніх модулів (рис. 3. 19).



a)



б)



в)

Рисунок 3.19 – Візуалізація положення сонячної панелі:

а) стандартного положення панелі; б) зміна положення панелі;

в) положення панелі відносно джерела світла

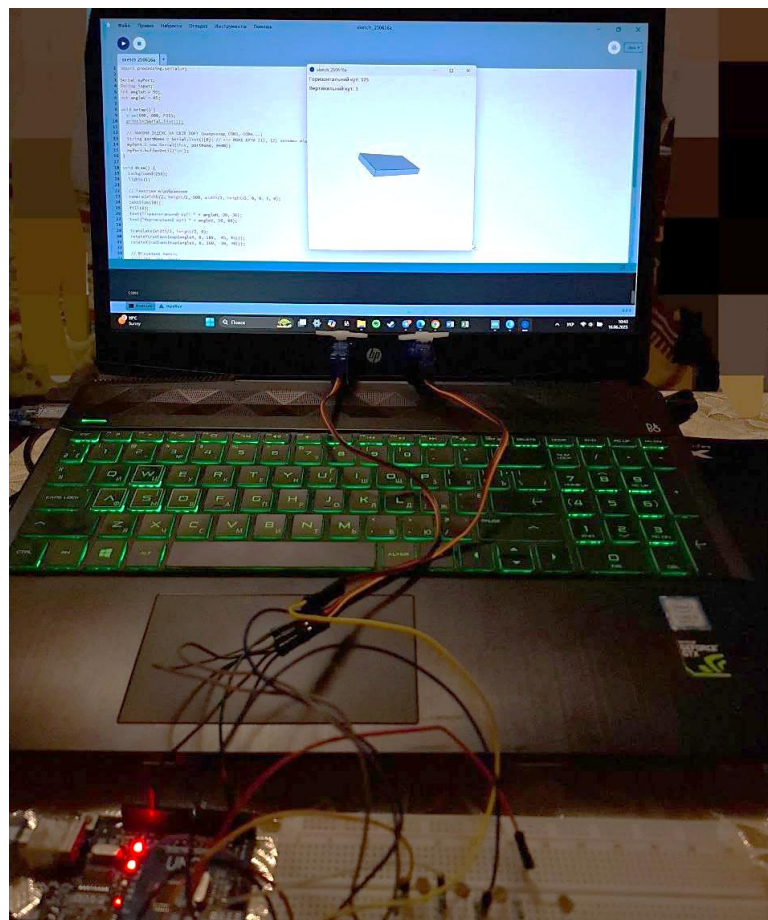
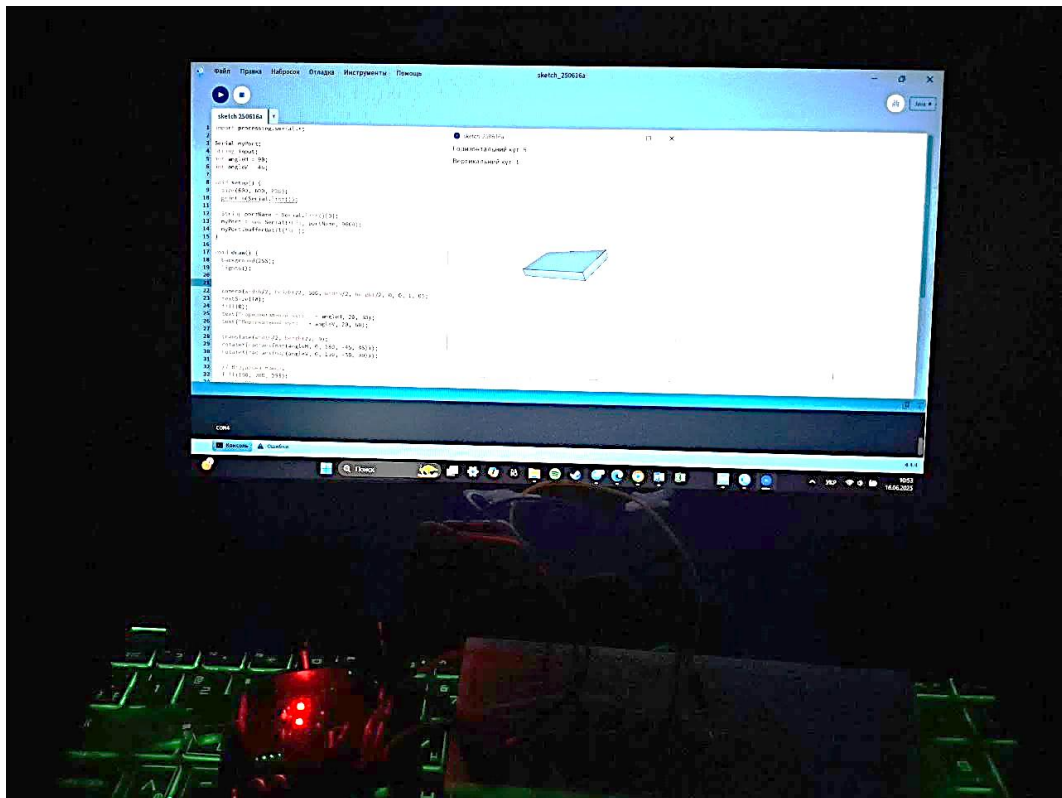
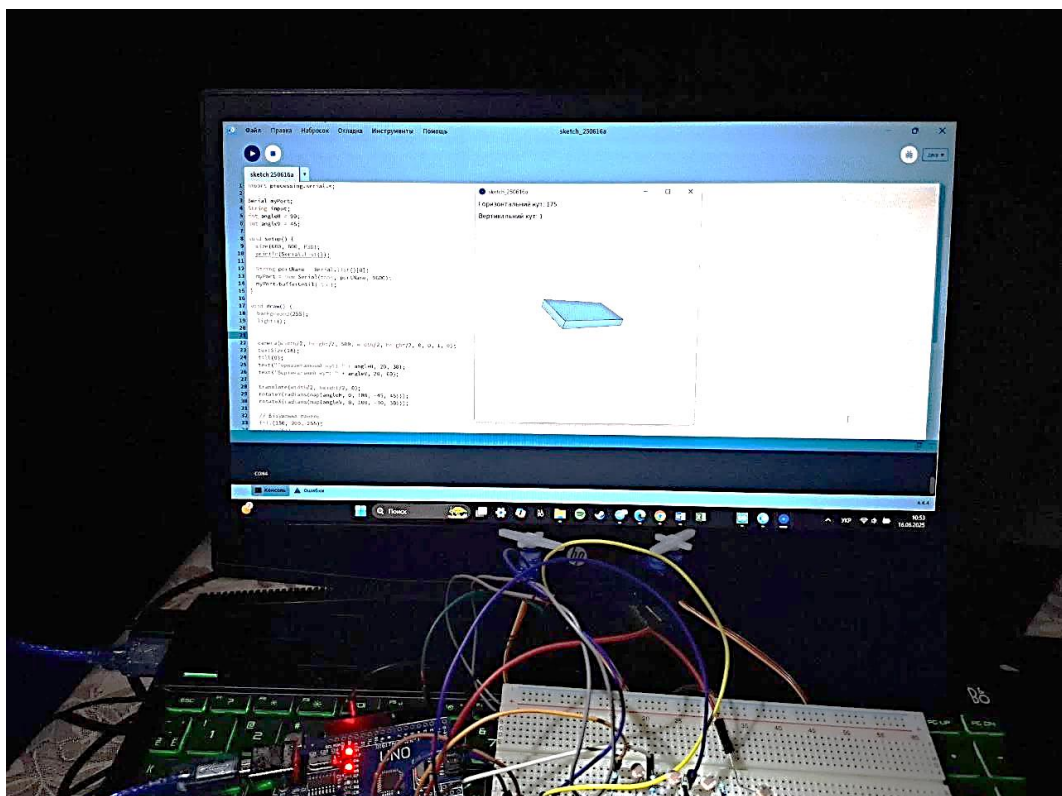


Рисунок 3.20 – Фото підключеної схеми



a)



6)

Рисунок 3.21 – Тестування роботи системи: а) положення панелі в темноті;
б) зміна положення панелі із-за появи джерела світла

Створення інтерактивної візуалізації значно підвищує рівень зрозумілості роботи системи. Користувач має змогу одразу бачити, як пристрій реагує на зміни у зовнішньому середовищі – зміщення сонячного світла, появу тіні або нерівномірне освітлення.

Окрім цього, візуалізація може слугувати навчальним інструментом у курсах з робототехніки, мікроконтролерів або автоматизації, де студенти можуть побачити результат роботи без потреби в складному апаратному оснащенні.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було здійснено повну реалізацію системи сонячного трекера, що поєднує електронну, механічну та програмну компоненти. Було зібрано функціональну модель, яка здатна автоматично орієнтувати сонячну панель у напрямку найбільшого освітлення завдяки показникам чотирьох фоторезисторів. Реалізація алгоритму керування на платформі Arduino забезпечила надійне функціонування двох сервоприводів, що відповідають за поворот панелі у горизонтальній та вертикальній площинах.

Окрему увагу було приділено візуалізації роботи системи. За допомогою середовища Processing реалізовано графічний інтерфейс, який у реальному часі відображає положення панелі відповідно до даних, що надходять із мікроконтролера. Це не лише полегшило процес тестування й налагодження, але й надало можливість візуального контролю за роботою системи без необхідності постійного доступу до фізичної моделі.

Загалом, розділ демонструє, що створена система є функціональною, надійною та придатною до подальшого вдосконалення. Вона може бути використана як у навчальних цілях, так і як основа для побудови реальних енергетичних рішень на базі відновлюваних джерел енергії.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було реалізовано базову версію автоматизованої системи автоорієнтування сонячних панелей, яка спрямована на підвищення ефективності збору сонячної енергії шляхом динамічного регулювання положення фотомодуля відповідно до зміни положення Сонця. Для цього було здійснено комплекс досліджень, аналіз сучасних технологій, розробку програмного забезпечення та побудову робочого макета системи на основі платформи Arduino з елементами візуалізації у середовищі Processing.

У першому розділі було проведено аналітичний огляд сучасних рішень щодо реалізації трекерів сонячного світла, розглянуто їх конструктивні особливості, класифікацію, переваги та недоліки. Особливу увагу приділено аналізу технологій одно- та двоосьового орієнтування, а також їх впливу на ефективність роботи фотоелектричних систем.

У другому розділі виконано дослідження принципів роботи фоторезисторів, сервомеханізмів та мікроконтролерів, а також розглянуто перспективи використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi у подібних системах. Попри те, що Raspberry Pi не був використаний у практичній частині, проведений аналіз дозволив оцінити його потенційні переваги (висока обчислювальна здатність, можливість підключення до мережі, збереження даних у хмарі тощо) і обмеження (вища вартість, складніша інтеграція з низькорівневими сенсорами порівняно з Arduino).

У третьому розділі було спроектовано та зібрано апаратний макет двоосьового трекера з використанням мікроконтролера Arduino, чотирьох фоторезисторів, двох сервоприводів та додаткових елементів. Було розроблено програмне забезпечення для управління положенням панелі відповідно до освітленості, а також створено інструмент візуалізації у середовищі Processing, який у реальному часі відображає положення панелі, що значно спрощує моніторинг та налагодження роботи системи.

Таким чином, усі основні завдання, поставлені в дипломній роботі, були успішно виконані: здійснено аналіз сучасних підходів до орієнтування сонячних панелей, обґрунтовано вибір компонентів, реалізовано алгоритми керування та створено робочий макет. Запропоноване рішення демонструє простий, доступний та ефективний спосіб підвищення продуктивності сонячних систем і може бути основою для подальшого вдосконалення, зокрема інтеграції з Raspberry Pi, розширення можливостей зберігання та обробки даних, а також використання IoT-технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Оптимальний кут для сонячних панелей. *Сонячна енергія – Інтернет-магазин силових електротехніки*. URL: https://sun-energy.com.ua/articles/kut_paneli (дата звернення: 15.04.2025).
2. Данко В. М., Смутко С. В., Поліщук О. С. Розробка конструкції трекерної системи для сонячних панелей // *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький : ХНУ, С. 1–5. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d647bffe-ef8e-474c-8e17-df45bf17153d/content> (дата звернення: 16.04.2025).
3. Як працює сонячна панель. *Leader NRG Ukraine – блог*. URL: <https://leader-nrg.com.ua/ru/blog/kak-rabotaet-solnechnaya-panel-ru/> (дата звернення: 25.04.2025).
4. Сонячний трекер двоосьовий AS Sunflower 20. *Eco-Tech Ukraine – обладнання для сонячних електростанцій*. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/p548614402-solnechnyj-treker-dvuhosnyj.html?srsId=AfmBOor9ygmzlecNP0bIOi2HeTH5bUt8LT0S7x0fslC0yucG4msKs6ru> (дата звернення: 01.05.2025).
5. Жолубак І. М., Матвієць В. Ю. Трекер для сонячних електростанцій // *Computer Systems and Networks*. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 37–41. DOI: 10.23939/csn2022.01.037.
6. Перспективи розвитку сонячної енергії: Аналіз тенденцій та прогнози щодо майбутнього розвитку ринку сонячних панелей. *Unisolar Energy Blog*. URL: <https://unisolar.energy/blog/perspektivi-rozvitku-sonyachnoyi-energiyi-analiz-tendencij-ta-prognozi-shhodo-majbutnogo-rozvitku-rinku-sonyachnih-panelej/> (дата звернення: 12.04.2025).
7. Saadun M. N., Kumar S. N., Che Sidik N. A. Design and Implementation of a Smart Solar Tracker using Arduino for Enhanced Energy Efficiency. *Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 26–34. DOI: 10.37934/arefmht.18.1.2634.

8. Казіміров О. О., Власов К. В., Оніпченко П. М., Костенко І. Л. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Вип. 1, № 63. С. 45–48. DOI: 10.26906/SUNZ.2021.1.045.
9. Жолубак І. М., Матвієць В. Ю. Трекер для сонячних електростанцій. *Computer Systems and Networks*. 2022. Вип. 4, №. 1. С. 37–48. DOI: 10.23939/csn2022.01.037.
10. Одноосьові трекери підвищують ефективність сонячної станції на 15–17% / *US Solar*. *US Solar*. URL: <https://ussolar.systems/ua/news/6-odnoosnye-trekery-povyshayut-effektivnost-solnechnoy-stantsii-na-15-17> (дата звернення: 05.05.2025).
11. Setiyono S., Wibowo K. Solar Tracker Prototype Based on Arduino Uno. *Jurnal EcoTIPE*. 2024. Vol. 11, № 1 (April). P. 38–45. DOI: 10.33019/jurnalecotipe.v11i1.4481.
12. Orro A., Correa N. M., Maturell Á., Santamaría M. 100W Solar Tracker with Arduino MKR1000 (Preliminary Results). 2023 *IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*. November 2023. DOI: 10.1109/CONESCAPAN60431.2023.10328413.
13. Трекер для фотоелектричних установок. *SolarSoul*. URL: <https://solarsoul.net/treker-dlya-fotoelektricheskix-ustanovok/> (дата звернення: 10.05.2025).
14. Harjono P., Marlin S., Setiawan A. Solar Panel Tracker Bidirectional Microcontroller Based On Arduino Uno. *Asian Journal of Engineering, Social and Health*. 2023. Vol. 2, No. 7 (July). –. DOI: 10.46799/ajesh.v2i7.80.
15. Система орієнтування на Сонце. *Avislab Blog*. URL: <https://blog.avislab.com/solar-tracker/> (дата звернення: 14.05.2025).
16. Данко В. М., Смутко С. В., Поліщук О. С. Розробка конструкції трекерної системи для сонячних панелей. Хмельницький національний університет. 2023. URL: <https://maees.khmnpu.edu.ua/Statti-patenti/СТАТТИ,%20ПАТЕНТИ,%20МЕТОД,%20ПОЛІЩУК/Данко%20В.М.,>

%20Смутко%20С.В.,%20Поліщук%20О.С.%20Розробка%20конструкції%20трекерної%20системи%20для%20сонячних%20панелей.pdf (дата звернення: 21.05.2025).

17. Ahmad S., Razali A. N., Misrun M. I. Effective and Low-Cost Arduino-based Dual-Axis Solar Tracker. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1878, No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1878/1/012049.

18. Gaeid K. S., Mohmmoud O. N., Uddin M. N. Design and Implement of Dual Axis Solar Tracker System Based Arduino. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2020. Vol. 27, No. 2. DOI: 10.25130/tjes.27.2.09.

19. Prospero M. R., Balba N. P., Bustamante R. V., Muya G. Solar Energy Harnessing Optimization Algorithm in a Robotic Solar Tracker with Arduino Based Monitoring System. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 8, No. 10. P. 1275–1279. DOI: 10.35940/ijitee.I7541.0881019.

20. Жолубак І. М., Матвієць В. Ю. Трекер для сонячних електростанцій. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2022. Вип. 4, № 1. С. 37–46. DOI: 10.23939/csn2022.01.037.

21. Solar Tracker Using Arduino and Raspberry Pi 3 / BlueClaw7 // Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Solar-Tracker-Using-Arduino-and-Raspberry-Pi-3/> (Last accessed: 27.05.2025).

22. Saadun M. N., Kumar S., Che Sidik N. A. Design and Implementation of a Smart Solar Tracker using Arduino for Enhanced Energy Efficiency. *Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 2025. Vol.18, No. 1. P. 26–34. DOI: 10.37934/arefmht.18.1.2634.

23. How to make a solar tracking system using Arduino step by step. *SriTu Hobby*. URL: https://srituhobby.com/how-to-make-a-solar-tracking-system-using-arduino-step-by-step/?srsltid=AfmBOoryVhpD3ztFNriNBjFAUO8ucTVMln9_1UNSsBqzF5BZDMA6Bpbg (Last accessed: 01.06.2025).

ДОДАТОК А

Програмний код для роботи системи

Програмний код Arduino для роботи схеми фоторезистора

```
const int ledPin = 13;
const int ldrPin = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(ldrPin, INPUT);
}

void loop() {
  int ldrStatus = analogRead(ldrPin);
  //check if the LDR status is <= 300
  //if it is, the LED is HIGH
  if (ldrStatus <= 300) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    Serial.println("LDR is DARK, LED is ON");
  }
  else {
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    Serial.println("-----");
  }
}
```

Програмний код Arduino для роботи схеми автоорієнтації за сонцем

```
#include <Servo.h>

Servo horizontal;
Servo vertical;

int servohori = 180;
int servohoriLimitHigh = 175;
int servohoriLimitLow = 5;

int servovert = 45;
int servovertLimitHigh = 100;
int servovertLimitLow = 1;

int ldr1t = A0; // Верхній лівий
int ldr1r = A3; // Верхній правий
```

```
int ldrld = A1; // Нижній лівий
int ldrrd = A2; // Нижній правий

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    horizontal.attach(2);
    vertical.attach(13);

    horizontal.write(servohori);
    vertical.write(servovert);

    delay(2000);
}

void loop() {
    // Зчитування LDR
    int lt = analogRead(ldrld);
    int rt = analogRead(ldrrd);
    int ld = analogRead(ldrld);
    int rd = analogRead(ldrrd);

    int dtime = 10;
    int tol = 90;

    int avt = (lt + rt) / 2;
    int avd = (ld + rd) / 2;
    int avl = (lt + ld) / 2;
    int avr = (rt + rd) / 2;

    int dvert = avt - avd;
    int dhoriz = avl - avr;

    // Вертикальне керування
    if (abs(dvert) > tol) {
        if (avt > avd) {
            servovert++;
            if (servovert > servovertLimitHigh) servovert = servovertLimitHigh;
        } else {
            servovert--;
            if (servovert < servovertLimitLow) servovert = servovertLimitLow;
        }
    }
}
```

```
    }  
    vertical.write(servover);  
}  
  
if (abs(dhoriz) > tol) {  
    if (avl > avr) {  
        servohori--;  
        if (servohori < servohoriLimitLow) servohori = servohoriLimitLow;  
    } else {  
        servohori++;  
        if (servohori > servohoriLimitHigh) servohori = servohoriLimitHigh;  
    }  
    horizontal.write(servohori);  
}  
  
Serial.print("H:");  
Serial.print(servohori);  
Serial.print(" V:");  
Serial.println(servover);  
  
delay(dtime);  
}
```

Програмний код Processing для візуалізації положення сонячної панелі

```
import processing.serial.*;  
  
Serial myPort;  
String input;  
int angleH = 90;  
int angleV = 45;  
  
void setup() {  
    size(600, 600, P3D);  
    println(Serial.list());  
  
    String portName = Serial.list()[0];  
    myPort = new Serial(this, portName, 9600);  
    myPort.bufferUntil('\n');  
}  
  
void draw() {  
    background(255);
```

```
lights();

camera(width/2, height/2, 500, width/2, height/2, 0, 0, 1, 0);
textSize(18);
fill(0);
text("Горизонтальний кут: " + angleH, 20, 30);
text("Вертикальний кут: " + angleV, 20, 60);

translate(width/2, height/2, 0);
rotateY(radians(map(angleH, 0, 180, -45, 45)));
rotateX(radians(map(angleV, 0, 100, -30, 30)));

fill(150, 200, 255);
stroke(0);
box(200, 20, 100);
}

void serialEvent(Serial myPort) {
  input = myPort.readStringUntil('\n');
  if (input != null) {
    input = trim(input);

    if (input.startsWith("H:")) {
      String[] parts = splitTokens(input, ": V");
      if (parts.length == 3) {
        angleH = constrain(int(parts[1]), 0, 180);
        angleV = constrain(int(parts[2]), 0, 100);
      }
    }
  }
}
```