

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

07.01.2024



Реука Є.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
Кафедра _____ КІТАР
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Реуці Євгену Васильовичу
(шифр і назва)

1. Тема роботи: _____ Розроблення системи позиціонування сонячних панелей
для автономної роботизованої платформи

Затверджена наказом університету від _____ №1288Ст від 03.11.2023

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 11.01.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Система керування на базі PID-регулятора;

3.2 Холосте навантаження 3,5В-6В; 3.3 Отримання корисного навантаження
4В-4,4В;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
методів керування положенням сонячних панелей; 4.3 Аналіз методів
розрахунку та позиціонування сонячних панелей; 4.4 Аналіз залежностей
впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії; 4.5 Розробка
структурної схеми; 4.6 Аналіз та вибір апаратних модулів; 4.7 Розробка
слідкуючої системи керування; 4.8 Розробка цифрової системи регулювання
положення серводвигуна; 4.9 Розробка схеми підключення; 4.10 Розробка
3D моделі макета; 4.11 Збірка макета системи позиціонування сонячних
панелей; 4.12 Аналіз та вибір середовища розробки; 4.13 Розробка алгоритму
керування позиціонуванням сонячних панелей; 4.14 Розробка функцій
розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків
освітленості; 4.15 Розробка функцій розрахунку позиціонування сонячних
панелей на базі PID-регулятора; 4.16 Проведення досліджень та аналіз
отриманих результатів; 4.17 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –12 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних систем керування сонячними станціями	1.09.2023-12.09.2023	виконано
2	Розробка структурної схеми	13.09.2023-15.09.2023	виконано
3	Аналіз та вибір апаратних модулів	16.09.2023-25.09.2023	виконано
4	Розробка слідкуючої системи керування	26.09.2023-10.10.2023	виконано
5	Розробка цифрової системи регулювання положення серводвигуна	10.10.2023-19.10.2023	виконано
6	Розробка схеми підключення	20.10.2023-27.10.2023	виконано
7	Розробка 3D моделі макета	28.10.2023-9.11.2023	виконано
8	Збірка макета системи позиціонування сонячних панелей	10.11.2023-14.11.2023	виконано
9	Аналіз та вибір середовища розробки	15.11.2023-17.11.2023	виконано
10	Розробка алгоритму керування позиціонуванням сонячних панелей	18.11.2023-29.11.2023	виконано
11	Розробка функцій розрахунку положення сонячних панелей	30.11.2023-7.12.2023	виконано
12	Розробка функцій розрахунку позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора	8.12.2023-14.12.2023	виконано
13	Проведення досліджень та аналіз отриманих результатів	15.12.2023-23.12.2023	виконано

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент _____ Реука Є.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Овчаренко В.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 103 с., 12 табл., 25 рис., 4 дод., 14 джерел.

СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, СЛІДКУЮЧА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СЕРВОДВИГУНИ, ARDUINO UNO, ARDUINO IDE, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.

Мета роботи – розроблення системи позиціонування сонячних панелей з використанням PID-регуляторів.

Об'єкт розробки – процес керування сонячними панелями.

Предмет розробки – методи керування позиціонуванням сонячних панелей.

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз методів керування положенням сонячних панелей, проаналізовано методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей та проведено аналіз залежностей впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії. На основі проведеного аналізу було розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням сонячних панелей, проаналізовано та обрано апаратні модулі. Далі було розроблено слідкуючу систему керування, цифрову систему регулювання положення серводвигуна та схему підключення. Розроблено 3D моделі макета, проведено збірку макета системи позиціонування сонячних панелей. Наступним етапом було обрано середовище розробки, розроблено алгоритм керування позиціонуванням сонячних панелей, розроблено функції розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості, розроблено функції розрахунку положення сонячних панелей на базі PID-регулятора. Заключним етапом було проведено дослідження та аналіз отриманих результатів.

ABSTRACT

Explanatory note: 103 pages, 12 tables, 25 figures, 4 app, 14 sources.

SOLAR PANELS, TRACKING CONTROL SYSTEM, SERVO MOTORS, ARDUINO UNO, ARDUINO IDE, SOLAR PANELS POSITIONING CONTROL ALGORITHM.

The purpose of the work is to develop a solar panel positioning system using PID controllers.

The object of development is the process of controlling solar panels.

The subject of development is methods of controlling the positioning of solar panels.

In this qualification work, the methods of controlling the position of solar panels were analyzed, the methods of calculation and positioning of solar panels were analyzed, and the dependence of the influence of the angle of incidence of solar rays on energy production was analyzed. Based on the analysis, a structural diagram of the solar panel positioning control system was developed, hardware modules were analyzed and selected. Next, a tracking control system, a digital servo motor position control system, and a connection diagram were developed. 3D models of the layout were developed, assembly of the layout of the solar panel positioning system was carried out. The next stage was to select a development environment, develop an algorithm for controlling the positioning of solar panels, develop functions for calculating the position of solar panels due to the difference in data from light sensors, and develop functions for calculating the position of solar panels based on a PID controller. The final stage was the research and analysis of the obtained results.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних систем керування сонячними станціями	12
1.1 Методи керування положенням сонячних панелей.....	12
1.2 Методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей	15
1.3 Аналіз залежностей впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії	16
1.4 Постановка задач дослідження.....	18
2 Розробка структури системи керування позиціонуванням сонячних панелей	19
2.1 Розробка структурної схеми	19
2.2 Аналіз та вибір апаратних модулів	21
2.3 Розробка слідкуючої системи керування.....	30
2.4 Розробка цифрової системи регулювання положення (кута) серводвигуна.....	37
2.5 Розробка схеми підключення.....	41
2.6. Розробка 3D моделі макета	44
2.7 Збірка макета системи позиціонування сонячних панелей	49
2.8 Висновки до 2 розділу	53
3 Розробка програми керування позиціонуванням сонячних панелей	55
3.1 Аналіз та вибір середовища розробки	55
3.2 Розробка алгоритму керування позиціонуванням сонячних панелей ...	56
3.3 Розробка функцій розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості (класичний підхід).....	59
3.4 Розробка функцій розрахунку позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора	63

3.5 Висновки до 3 розділу	69
4 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.....	71
4.1 Постановка задач експериментів.....	71
4.2 Проведення досліджень та аналіз отриманих результатів.....	72
4.3 Розрахунок освітлення.....	80
4.4 Висновки до 4 розділу	81
Висновки	83
Перелік джерел посилань	84
Додаток А Програма керування позиціонуванням сонячних панелей на основі даних з датчиків освітленості.....	87
Додаток Б Програма керування позиціонуванням сонячних панелей на базі PID-регулятора.....	90
Додаток В Апробація результатів наукових досліджень.....	93
Додаток Г Демонстраційний матеріал	102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- C – перетворювачі;
- CO – Control Object;
- CR – регулятори струму;
- CS – Control System;
- M – двигун;
- S – Sensor;
- SC – регулятор швидкості;
- SS – датчик швидкості;

ВСТУП

Сонячна енергія є однією з найбільш відновлюваних та екологічно чистих джерел енергії. Однак забезпечення ефективного використання сонячних панелей є складним завданням через їхню залежність від сонячної радіації та потребу в постійному позиціонуванні для максимізації збору світла. Сучасні технології робототехніки та штучного інтелекту дозволяють створювати автономні роботизовані платформи, які можуть відстежувати сонячну позицію та оптимізувати роботу сонячних панелей. Це відкриває можливості для покращення ефективності сонячних електростанцій. Розробка системи позиціонування сонячних панелей для автономних роботизованих платформ стає ключовою для вирішення проблем ефективності та стабільності сонячних електростанцій. Така система дозволить панелям автоматично налаштувати своє положення відповідно до сонячної траєкторії, максимізуючи збір сонячної енергії. Це, в свою чергу, підвищить ефективність генерації електроенергії та зробить сонячні електростанції більш конкурентоспроможними.

Розробка системи позиціонування сонячних панелей для автономних роботизованих платформ є актуальною задачею, яка вирішує проблеми ефективності та стабільності сонячних електростанцій. Ця інноваційна технологія може сприяти впровадженню стабільних та екологічно чистих джерел енергії, сприяючи вирішенню енергетичних проблем сучасності та забезпечуючи сталість для майбутніх поколінь.

Мета роботи – розроблення системи позиціонування сонячних панелей з використанням PID-регуляторів.

Об'єкт розробки – процес керування сонячними панелями.

Предмет розробки – методи керування позиціонуванням сонячних панелей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати методи керування положенням сонячних панелей;
- проаналізувати методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей;
- проаналізувати залежності впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії;
- розробити структурну схему;
- проаналізувати та вибрати апаратні модулі;
- розробити слідкуючу систему керування;
- розробити цифрову систему регулювання положення серводвигуна;
- розробити схему підключення;
- розробити 3D моделі макета;
- провести збірку макета системи позиціонування сонячних панелей;
- проаналізувати та вибрати середовище розробки;
- розробити алгоритм керування позиціонуванням сонячних панелей;
- розробити функції розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості;
- розробити функції розрахунку позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора;
- провести постановку задач експериментів;
- провести дослідження та проаналізувати отримані результати.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3]. Результати кваліфікаційної роботи описані в статті, яку можна побачити в гугл академії [4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

1.1 Методи керування положенням сонячних панелей

У дослідженні впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю важливим аспектом є ефективне керування положенням сонячних панелей для оптимізації отримання сонячної енергії. Розглянемо різні методи керування положенням сонячних панелей з метою максимізації збору сонячної енергії:

- подвійна орієнтація, використання двоосевого механізму для точного слідження за сонцем по горизонталі та вертикалі, забезпечуючи максимальне впіймання сонячних променів протягом усього дня;

- фіксована орієнтація з регулюванням кута нахилу, задання фіксованої вертикальної орієнтації панелей з можливістю регулювання кута нахилу в залежності від сезону, щоб компенсувати зміни в зенітному куті сонця;

- попереджувальне керування, тобто використання алгоритмів прогнозування для попередження змін позиції сонця та відповідне налаштування положення сонячних панелей заздалегідь;

- використання датчиків світла та погоди, використання датчиків освітленості та погоди для постійного моніторингу умов та автоматичного коригування положення сонячних панелей;

- використання алгоритмів машинного навчання для аналізу історичних даних та оптимізації положення сонячних панелей в реальному часі;

- інтеграція з іншими джерелами енергії, розробка систем, які можуть автоматично переключатися між сонячною енергією та іншими джерелами в залежності від умов освітленості та погоди;

– керування групами сонячних панелей, розробка методів керування для координованого руху груп сонячних панелей з метою максимізації ефективності збору енергії;

– впровадження додаткових елементів, таких як дзеркальні поверхні або трекеи, для підвищення освітленості та збільшення ефективності сонячних панелей;

– дистанційне керування та діагностика, розробка систем для дистанційного моніторингу та керування положенням сонячних панелей з метою оперативного технічного обслуговування [5].

У кожного методу керування положенням сонячних панелей є свої переваги та недоліки. Проаналізувавши кожен із перерахованих методів, можна підсумувати їх основні характеристики, представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки методів керування сонячними панелями

Методи	Переваги	Недоліки
1	2	3
Подвійна орієнтація	<ul style="list-style-type: none"> – максимальне використання сонячного випромінювання; – висока ефективність у будь-який час доби 	<ul style="list-style-type: none"> – складні та дорогі механізми слідження; – велике споживання енергії на рухливі системи; – потребує точного позиціонування для ефективності
Фіксована орієнтація	<ul style="list-style-type: none"> – простота конструкції та експлуатації; – зменшення витрат на обслуговування 	<ul style="list-style-type: none"> – залежність від сталого кута нахилу панелей; – менша ефективність у зимовий період; – обмежений діапазон регулювання
Попереджувальне керування	<ul style="list-style-type: none"> – адаптація до змін в умовах освітленості; – можливість попереднього коригування положення 	<ul style="list-style-type: none"> – залежність від точності прогнозу погоди; – обмежена реакція на раптові зміни умов; – потребує додаткового обладнання для прогнозу

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Використання датчиків	<ul style="list-style-type: none"> – автоматичне коригування в реальному часі; – ефективне реагування на невеликі зміни умов 	<ul style="list-style-type: none"> – вартість та обслуговування датчиків; – можливі проблеми у складних погодних умовах; – залежність від надійності та точності датчиків
Використання алгоритмів машинного навчання	<ul style="list-style-type: none"> – адаптація до динамічних змін в середовищі; – можливість оптимізації в режимі реального часу; – ефективність збору даних у довгостроковому плані 	<ul style="list-style-type: none"> – потребує великої кількості даних для навчання; – високі витрати на розробку та впровадження
Інтеграція іншими джерелами енергії	<ul style="list-style-type: none"> – збалансоване використання різних джерел енергії; – зменшення залежності від одного джерела; – забезпечення стабільності постачання енергії 	<ul style="list-style-type: none"> – складність інтеграції та управління; – потребує системи комутації між джерелами; – додаткові витрати на інтеграцію компонентів
Керування групами сонячних панелей	<ul style="list-style-type: none"> – можливість оптимізації кута нахилу для групи; – збільшення ефективності збору сонячної енергії; – резервування можливості для часткового використання 	<ul style="list-style-type: none"> – складність синхронізації руху групи; – велике споживання енергії на координацію
Впровадження додаткових елементів	<ul style="list-style-type: none"> – збільшення освітленості та збору енергії; – можливість оптимізації під різні умови 	<ul style="list-style-type: none"> – додаткові витрати на обладнання та обслуговування; – складність управління та синхронізації

У результаті проведеного аналізу можна зробити висновки, що найкращими методами керування сонячними панелями є подвійна орієнтація, яка забезпечує максимальну ефективність у будь-який час доби, використання інтелектуальних алгоритмів, що надає можливість оптимізації в реальному часі та ефективність збору даних у довгостроковому плані та

синергетичні системи, які забезпечують збалансоване та стабільне використання різних джерел енергії [6].

1.2 Методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей

В сучасному світі, де збільшення виробництва енергії з відновлюваних джерел стає необхідністю, сонячна енергія виступає як ключовий джерело чистої та доступної енергії. Ефективність сонячних панелей прямо залежить від їх позиціонування відносно сонця та кута падіння променів.

Один із фундаментальних методів розрахунку – це використання географічних розрахунків для визначення сонячних траєкторій. Застосування географічних координат та точних часових параметрів дозволяє точно визначити кут падіння сонячних променів у будь-який момент часу та на будь-якій точці на земній поверхні. Це надає основні величини для подальших розрахунків.

Оптимальне позиціонування сонячних панелей включає розрахунок кута нахилу та азимутального напрямку. Кут нахилу визначається врахуванням географічного положення та сезонних змін, що дозволяє встановлювати оптимальний нахил для максимального збору сонячної енергії впродовж року. Азимутальне позиціонування визначає напрямок, до якого повинні бути обернуті сонячні панелі, забезпечуючи оптимальний прихід сонячних променів. Для досягнення максимальної ефективності використовуються системи трекінгу. Двоосевий трекінг автоматично коригує положення сонячних панелей у всіх площинах, слідкуючи за рухом сонця в реальному часі. Це дозволяє панелям завжди залишатися в оптимальному положенні, максимізуючи збір сонячної енергії [7].

Моделювання та симуляції є необхідним етапом для точного розрахунку ефективності сонячних панелей. Спеціалізовані програми дозволяють враховувати всі параметри, такі як географічне положення, кут

нахилу, азимутальний напрямок та погодні умови, що сприяє точним та надійним розрахункам. Інтеграція із метеорологічними даними визначається прогнозами погоди. З використанням цих даних можливо вдосконалити розрахунки, враховуючи зміни в умовах погоди та адаптуючи позиціонування панелей в реальному часі.

Оптимізація систем керування включає в себе розробку алгоритмів, що дозволяють автоматично налаштовувати положення сонячних панелей для досягнення максимальної ефективності. Використання генетичних алгоритмів або методів штучного інтелекту дозволяє системі адаптуватися до змінних умов та максимізувати збір сонячної енергії в реальному часі. Симуляція тіньових об'єктів враховує вплив тіней від будь-яких об'єктів, які можуть затінити сонячні панелі. Такий аналіз дозволяє уникнути тінів та забезпечити найоптимальніше положення панелей. Останнім етапом є технічне обслуговування та моніторинг. Встановлення систем віддаленого моніторингу дозволяє не лише стежити за роботою сонячних панелей, а й вчасно виявляти та вирішувати можливі поломки чи несправності [8].

Усі ці методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей працюють разом, створюючи систему, яка максимізує збір сонячної енергії. Це не тільки сприяє стійкості постачання енергії, а й зменшує вплив на довкілля, роблячи виробництво енергії з сонця більш сталим та ефективним.

1.3 Аналіз залежностей впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії

В час зростаючого інтересу до відновлюваних джерел енергії, сонячні панелі стали ключовим компонентом виробництва електроенергії. Однією з найважливіших характеристик їх ефективності є кут падіння сонячних променів. Кут падіння сонячних променів є ключовим фактором, оскільки від нього залежить кількість енергії, яка досягає поверхні сонячної панелі. У

міру того як сонце рухається по небесному своду, змінюється і кут його променів, відсутній прямий світловий потік. Коли сонячні промені падають під прямим кутом до панелі, ефективність збору енергії досягає свого піку. Проте, при зміні кута падіння, промені проходять більше атмосферного шару, що може призвести до втрат енергії в результаті розсіювання та поглиблення. Такі втрати відбуваються, коли сонячні промені падають під гострим кутом, зменшуючи ефективність сонячної панелі.

Оптимізація кута падіння сонячних променів досягається за допомогою регулювання нахилу та орієнтації сонячних панелей. Узгоджене налаштування дозволяє максимально використовувати сонячне випромінювання протягом усіх годин доби та різних сезонів. Вплив кута падіння сонячних променів на вироблення енергії може бути визначений за допомогою математичних розрахунків та експериментальних досліджень. Загалом, можна визначити, що існує оптимальний діапазон кутів падіння для досягнення максимальної ефективності [9].

Для того щоб враховувати зміни кута падіння протягом доби та року, розробляються інтелектуальні системи керування, які автоматично адаптують положення сонячних панелей. Ці системи можуть використовувати алгоритми прогнозування, аналіз погодних умов та навіть штучний інтелект для оптимізації положення панелей в реальному часі. Враховуючи розвиток технологій, у сучасних сонячних системах також застосовуються адаптивні механізми трекінгу, які дозволяють панелям постійно слідкувати за рухом сонця. Це надає можливість підтримувати оптимальний кут падіння протягом усього дня.

У висновку, аналіз впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю вказує на важливість оптимізації положення панелей для максимізації ефективності. Здійснюючи точні розрахунки та використовуючи розвинуті системи керування, можна досягти оптимального використання сонячного потенціалу та забезпечити стабільний

вироблення енергії, сприяючи переходу до сталої та екологічно чистої енергетики [10].

1.4 Постановка задач дослідження

В ході проведеного аналізу було виявлено, що тема даного дослідження є актуальною.

Метою даної роботи є розроблення системи позиціонування сонячних панелей з використанням PID-регуляторів. Об'єктом дослідження є процес керування сонячними панелями, предметом дослідження є методи керування позиціонуванням сонячних панелей, методами дослідження є теорія автоматичного керування, PID-регулятори, методи трьохвимірної побудови та методи аналізу експериментальних досліджень. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити структурну схему;
- проаналізувати та вибрати апаратні модулі;
- розробити слідкуючу систему керування;
- розробити цифрову систему регулювання положення серводвигуна;
- розробити схему підключення;
- розробити 3D моделі макета;
- провести збірку макета системи позиціонування сонячних панелей;
- проаналізувати та вибрати середовище розробки;
- розробити алгоритм керування позиціонуванням сонячних панелей;
- розробити функції розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості;
- розробити функції розрахунку позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора;
- провести постановку задач експериментів;
- провести дослідження та проаналізувати отримані результати.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

2.1 Розробка структурної схеми

Відповідно до проведеного аналізу аналогічних рішень, в рамках даних досліджень пропонується наступна структурна схема системи керування позиціонуванням сонячними панелями, яка представлена на рисунку 2.1.

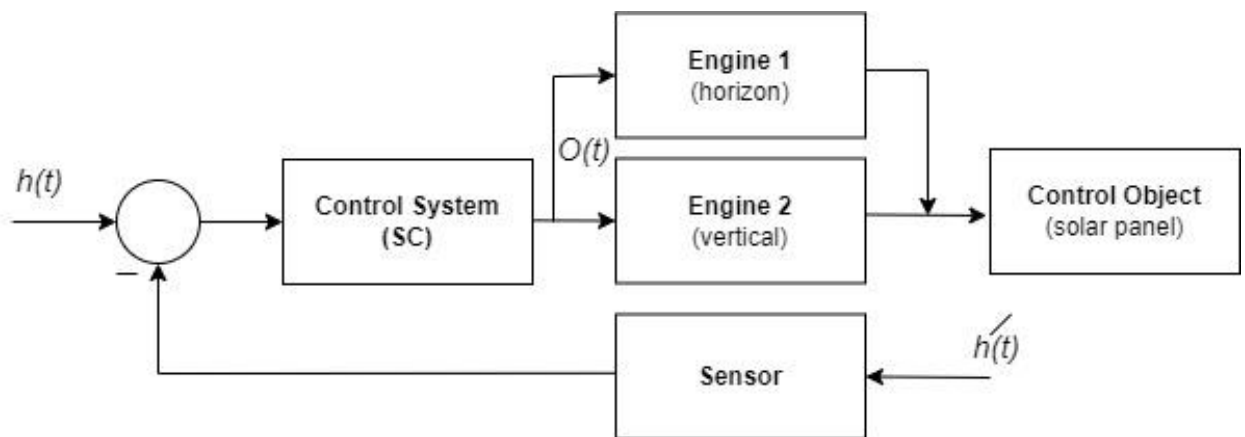


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування позиціонуванням сонячними панелями

Запропонована структурна схема керування містить наступні елементи, які виконують такі функції. Control System (CS) – виконує наступні функції:

- обробка сигналу: Отримані дані від датчиків проходять через обробку сигналу, де вони аналізуються та інтерпретуються для визначення оптимального положення сонячних панелей. Ця функція включає обчислення поточного положення сонця, враховуючи географічні координати та часові параметри;

- керування рухом панелей: На основі оброблених даних система керування видає команди до приводів або двигунів, які відповідають за рух

сонячних панелей. Ця функція забезпечує плавний і точний рух панелей для досягнення оптимального положення щодо сонця;

– компенсація похибок: Система керування може включати алгоритми компенсації похибок, які враховують різні фактори, такі як похибки вимірювання, вплив вітру або нерівномірності панелей. Ці алгоритми коригують положення панелей для забезпечення оптимального виробництва енергії.

Engine 1 (horizon) та Engine 2 (vertical) – модулі двигунів, які використовуються для позиціонування сонячними панелями, відповідно до горизонтальної та вертикальної площини.

Sensor (S) – датчик або модуль датчиків дозволяє виконувати наступні функції в рамках розроблювальної системи:

– вимірювання освітленості: Датчик освітленості міряє рівень світла, що падає на нього. Він перетворює цей фізичний параметр на відповідний електричний сигнал, який може бути інтерпретований системою керування;

– передача даних системі керування: Датчик освітленості передає виміряні дані про освітленість системі керування позиціонуванням сонячних панелей. Це дозволяє системі аналізувати дані та приймати рішення щодо оптимального положення панелей в залежності від інтенсивності світла.

Control Object (CO) – об'єкт керування, яким виступають сонячні панелі та точність їх позиціонування відповідно до рівня освітленості.

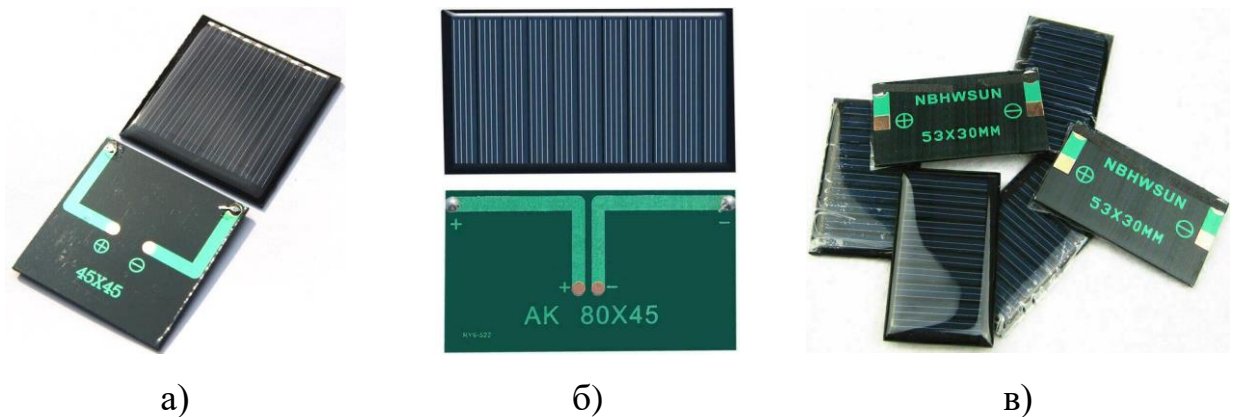
$h'(t)$ – рівень освітленості, на даний момент часу.

$h(t)$ – вхідний сигнал;

$O(t)$ – цифровий сигнал керування (команди керування engine 1 (horizon) та engine 2 (vertical)) для налаштування кутів позиціонування сонячних панелей [10].

2.2 Аналіз та вибір апаратних модулів

Виходячи з вимог, які вказані в технічному завданні, а це: V_{oc} (максимальна напруга) – $\sim 5 \div 7\text{В}$; I_{mp} (максимальний струм) – $\sim 1 \div 1,5\text{А}$; E (коефіцієнт перетворення енергії) $\sim 10 \div 20\%$, було проведено аналіз доступних для придбання сонячних панелей для реалізації макета. Результат проведеного аналізу приведено на рисунку 2.2, а в таблиці 2.1 приведено порівняння технічних характеристик сонячних панелей.



- а) Micro Mini Small Power Solar Cells Panel;
 б) Mini Solar Panel AK8045 (модель RY6-522);
 в) Mini Solar Panel (модель NBHWSUN)

Рисунок 2.2 – Загальний вид сонячних панелей

Таблиця 2.1 – Порівняння технічних характеристик сонячних панелей

Параметр	Micro Mini Small Power Solar Cells Panel	AK8045 модель RY6-522	Mini Solar Panel модель NBHWSUN
1	2	3	4
Voltage (В)	5	5	5
Ефективність (%)	12	15	11
Потужність (Вт)	2	2,5	2
Тип	Полікристалічна	Полікристалічна	Полікристалічна
Розміри (мм)	45x45	80x45	53x30
Вага (г)	7	10	8
Ціна (\$)	~1,7	~1,42	~1

Всі моделі сонячних панелей: Mini Solar Panel AK8045 (модель RY6-522), Micro Mini Small Power Solar Cells Panel та Mini Solar Panel (модель NBHWSUN), можуть мати свої переваги залежно від потреб. Але є наступні чинники, чому Mini Solar Panel AK8045 є кращим для рішення поставленої задачі, порівняно з моделлю NBHWSUN та micro Mini Small Power Solar Cells Panel:

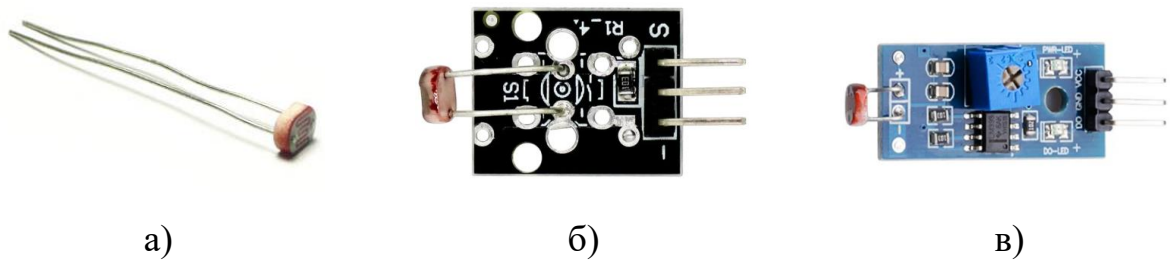
- ефективність: Mini Solar Panel AK8045 зазвичай має вищу ефективність перетворення сонячної енергії в електрику. Завдяки передовим технологіям та матеріалам, вона може більш ефективно використовувати доступне сонячне випромінювання, що призводить до більш високого виробництва енергії. Це може бути особливо важливо, якщо вам потрібна максимальна кількість енергії для зарядки ваших пристроїв;

- компактність та портативність: Якщо вам важлива переносимість та легкість перенесення, Mini Solar Panel AK8045 може бути бажанішою. Вона зазвичай має компактний розмір, що робить її зручною для перевезення під час подорожей та активного відпочинку. Модель NBHWSUN може бути більш об'ємною або важкою, що може створювати незручності при перенесенні;

- якість та надійність: Mini Solar Panel AK8045 зазвичай виготовляється з високоякісних матеріалів та пропонує надійність та стабільну роботу. Ви можете бути впевнені, що панель буде довговічною та зможе працювати в різних умовах. Важливо відзначити, що якість та надійність можуть варіюватись в залежності від виробника, тому рекомендується ознайомитись з відгуками користувачів та звернути увагу на репутацію виробника;

- вартість: Ціна може бути ще одним фактором, який варто врахувати при виборі сонячної панелі. В залежності від ринкових умов та конкретного продавця, Mini Solar Panel AK8045 та модель NBHWSUN можуть мати різну ціну.

Для отримання $h'(t)$ рівню освітленості на даний момент часу (рис. 2.1), пропонується використовувати датчик, заснований на принципі фотоелектричного ефекту. Для цього проведемо аналіз та оберемо датчики, які можна використовувати для системи керування позиціонуванням сонячних панелей. На рисунку 2.3 приведено порівняльний аналіз існуючих сенсорів, заснованих на базі фотоелектричного ефекту.



а) датчик освітленості GL5516;

б) модуль KY-018;

в) модуль з фоторезистером цифровий

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд сенсорів заснованих на базі фотоелектричного ефекту

Проведемо порівняльний аналіз технічних характеристик сенсорів, заснованих на базі фотоелектричного ефекту, та його результати представимо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння технічних характеристик сенсорів заснованих на базі фотоелектричного ефекту

Параметр	Датчик освітленості GL5516 [11]	Модуль KY-018 [12]	Модуль з фоторезистером цифровий [13]
1	2	3	4
Вимірювальний діапазон	3 лк - 65 000 лк	50 лк - 100 000 лк	Залежно від резистора
Вихідний сигнал	Аналоговий	Цифровий	Цифровий
Чутливість	Висока	Низька	Залежно від резистора

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
Інтерфейс підключення	Аналоговий	Цифровий (використовуючи пін D0)	Цифровий (використовуючи піни SDA, SCL)
Напруга живлення	3,3 В або 5 В	3,3 В або 5 В	3,3 В або 5 В
Стабільність вимірювання	Висока	Середня	
Потужність споживання	Низька	Низька	Низька
Можливості калібрування	Ні	Ні	Так
Маса(г)	2	10	10
Ціна	~ 0,1\$	~ 0,6\$	~ 0,6\$

Як можна бачити з таблиці 2.2, датчик освітленості GL5516 є кращим вибором для розробки системи керування позиціонуванням сонячних панелей з кількох причин:

- широкий діапазон вимірювання: датчик освітленості GL5516 має великий вимірювальний діапазон від 3 лк до 65 000 лк. Це дозволяє точно виміряти рівень освітленості в різних умовах, навіть при зміні від яскравого сонячного світла до темряви. Для системи керування позиціонуванням сонячних панелей важливо точно визначати рівень освітленості, щоб оптимально налаштувати панелі для максимального збору сонячної енергії;

- аналоговий вихідний сигнал: датчик GL5516 має аналоговий вихідний сигнал, який можна зручно інтерпретувати в мікроконтролері або іншому пристрої. Це дозволяє легко обробляти дані про освітленість і виконувати потрібні обчислення для налаштування позиціонування сонячних панелей;

- висока чутливість: датчик освітленості GL5516 має високу чутливість до зміни рівня освітленості. Він може точно реагувати на навколишнє світло і швидко передавати зміни рівня освітленості в систему керування позиціонуванням. Це особливо важливо для швидко змінних умов

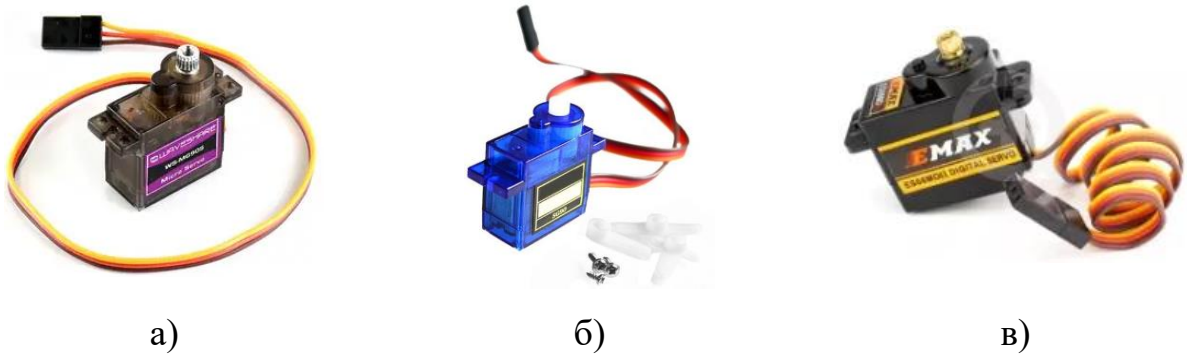
освітленості, наприклад, коли хмари перекривають сонце або коли сонячне світло проходить через перешкоди;

– сумісність з Arduino та іншими мікроконтролерами: датчик освітленості GL5516 часто використовується з Arduino та іншими мікроконтролерними системами, що робить його легким у використанні та інтеграції в систему керування позиціонуванням сонячних панелей.

Хоча модуль KY-018 та модуль з фоторезистором цифровим також можуть використовуватись для вимірювання освітленості, датчик освітленості GL5516 зазвичай має більші переваги у вимірюванні точної освітленості в широкому діапазоні та забезпеченні високої чутливості для швидко змінних умов.

Наступним кроком необхідно обрати апаратні модулі Engine 1 (horizon) та Engine 2 (vertical) для реалізації можливості точного позиціонування сонячних панелей в просторі. Відповідно до параметрів обраної Mini Solar Pane AK8045 (модель RY6-522) з параметрами: розміром 80x45мм та вагою ~7 г на кожну панель, для зарядки блока живлення буде потрібно мін 2 панелі або мах 3 панелі. Внаслідок цього, маса панелей буде вагатися від ~14 грам до 22 грам. Виходячи з цього, необхідно обрати цифровий двигун, який має наступні обмеження: незначну масу, невеликі розміри, напруга живлення від 4,8 В до 6 В, сигнал до керування підтримує PWM.

Відповідно до розробленої структурної схеми системи керування позиціонуванням сонячними панелями буде потрібно 2 двигуна, щоб забезпечити коректне позиціонування сонячними панелями по горизонтальній та вертикальній площини. Для цього проведемо аналіз існуючих серводвигунів, загальний вигляд яких представлено на рисунку 2.4.



а)

б)

в)

а) сервопривід MG90S Servo;

б) мікросерводвигун 9 г 6CH RC SG90;

в) Emax EMAX ES08MD Mini Metal Digital Servo;

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд серводвигунів для позиціонування сонячними панелями

Проведемо порівняльний аналіз технічних характеристик серводвигунів для позиціонування сонячними панелями та його результати представимо в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння технічних характеристик серводвигунів

Характеристика	Сервопривід MG90S	Мікросерводвигун 9 г 6CH RC SG90	Emax EMAX ES08MD
1	2	3	4
Напруга живлення	4,8 - 6 В	4,8 - 6 В	4,8 - 6 В
Ширина імпульсу	500 - 2400 мкс	500 - 2400 мкс	500 - 2400 мкс
Кут обертання	0 - 180 градусів	0 - 180 градусів	0 - 180 градусів
Швидкодія	0,11 с/60°	0,12 с/60°	0,12 с/60°
Силевий момент	2 кг·см	1,8 кг·см	1,5 кг·см
Робочий струм	0,1 - 0,2 А	0,2 - 0,4 А	0,2 - 0,4 А
Робоча температура	0 - 55 °С	0 - 55 °С	0 - 55 °С
Розміри	23 мм х 12 мм х 29 мм	23 мм х 12 х мм 29 мм	23 мм х 12 мм х 29 мм
Вага	13,4 г	9 г	13 г
Ціна	~ 3-3,5\$	~ 1,5-2\$	~ 10-12\$

Як можна бачити з таблиці 2.3, для розробки системи позиціонування сонячними панелями кращим вибором є використання мікросерводвигуна 9 г 6CH RC SG90 з кількох причин:

- кут обертання: SG90 має широкий кут обертання від 0 до 180 градусів, що дозволяє точно налаштувати положення сонячних панелей для оптимального збору сонячної енергії. Широкий кут обертання забезпечує більшу гнучкість при налаштуванні позиції панелей;

- швидкодія: SG90 має відносно швидку швидкодію – 0,12 секунди на 60 градусів. Це дозволяє швидко реагувати на зміни умов освітленості та ефективно вирішувати завдання позиціонування панелей;

- силовий момент: SG90 має силовий момент 1,8 кг·см, що забезпечує достатню силу для позиціонування невеликих сонячних панелей. Це особливо важливо, якщо панелі потрібно переміщати проти сили тяжіння або механічного опору;

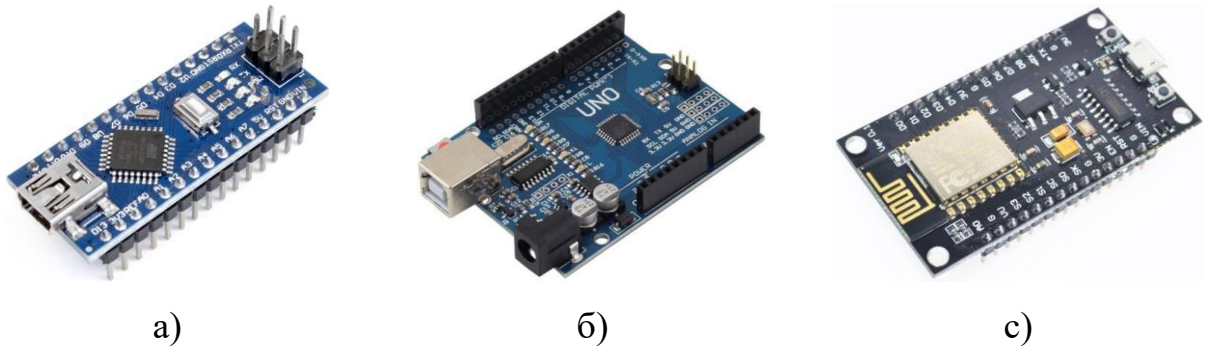
- розмір та вага: SG90 має компактні розміри та легку вагу, що робить його зручним для використання в системах з обмеженим простором або на механічних конструкціях, де вага важлива;

- сумісність та доступність: SG90 є популярним мікросерводвигуном, який широко використовується в різних проектах Arduino та інших мікроконтролерах. Це означає, що ви зможете знайти багато ресурсів, прикладів і бібліотек для легкої інтеграції з системою позиціонування сонячних панелей;

- також, обраний мікросерводвигун 9 г 6CH RC SG90 має приємну ціну, в порівнянні з аналогічними серводвигунами.

Останнім елементом, який необхідно обрати відповідно до розробленої структурної схеми системи керування позиціонуванням сонячними панелями (рис. 2.1) – це апаратний модуль, який буде виконувати обов'язки Control System (SC). Проведемо аналіз та обмеження на модуль SC. Відповідно до параметрів обраного датчика освітленості GL5516 потрібно, щоб апаратний

модуль SC підтримував аналоговий вхід, а також було як мінімум 2 цифрових входу/виходу та підтримка роз'ємів VCC та GND. Виходячи з цього, проведемо аналіз існуючих апаратних модулів для реалізації SC, загальний вигляд модулів представлено на рисунку 2.5.



а)

б)

в)

а) Arduino Nano V3;

б) Arduino UNO R3 (ch340);

в) NodeMCU V3 ESP8266 (CH340);

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд апаратних модулів для реалізації SC

Проведемо порівняльний аналіз технічних характеристик апаратних модулів для реалізації SC, та його результати представимо в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняння технічних характеристик апаратних модулів для реалізації SC

Характеристика	Arduino Nano V3	Arduino UNO R3 (ch340)	NodeMCU V3 ESP8266 (CH340)
1	2	3	4
Мікроконтролер	ATmega328P	ATmega328P	ESP8266
Частота процесора	16 МГц	16 МГц	80 МГц
Напруга живлення	5 В	5 В	3,3 В
Цифрові входи/виходи	14/8	14/6	11
Аналогові входи	8	6	-
Вбудована пам'ять Flash	32 КБ	32 КБ	4 МБ
Вбудована пам'ять SRAM	2 КБ	2 КБ	80 КБ

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4
USB інтерфейс	Mini USB	USB-B	Micro USB
Вбудований Wi-Fi	-	-	так
Розміри	45 мм x 18 мм	68,6 мм x 53,4 мм	49 мм x 24 мм
Вага	7г	25г	5г
Ціна	~ 3-3,5\$	~ 5-6\$	~ 3-3,5\$

Як можна бачити з таблиці 2.4, для розробки системи керування позиціонуванням сонячними панелями в рамках даних досліджень буде використовуватися Arduino UNO R3 з таких причин:

- більше цифрових входів/виходів: Arduino UNO R3 має більшу кількість цифрових входів/виходів порівняно з Arduino Nano V3 та NodeMCU V3 ESP8266. Більша кількість цифрових портів дозволяє підключати більше датчиків та пристроїв, що може бути корисним при системі позиціонування сонячних панелей, де можуть бути потрібні додаткові вхідні та вихідні сигнали;

- більше аналогових входів: Arduino UNO R3 також має більше аналогових входів, порівняно з Arduino Nano V3 та NodeMCU V3 ESP8266. Це важливо, якщо потрібно виміряти аналогові сигнали з датчиків освітленості GL5516;

- розповсюдженість використання: Arduino UNO R3 є одним з найпопулярніших та найбільш поширених моделей Arduino, що означає, що ви зможете знайти багато ресурсів, прикладів, бібліотек та підтримки спільноти. Це полегшує розробку, налагодження та розширення системи позиціонування сонячних панелей;

- більший розмір та платформа розширення: Arduino UNO R3 має більший розмір порівняно з Arduino Nano V3 та NodeMCU V3 ESP8266, що може бути вигідним для проектів, де потрібно більше місця для розміщення додаткових модулів або датчиків. Крім того, Arduino UNO R3 підтримує

широкий спектр додаткових модулів та платформ розширення, що дозволяє легко розширити можливості системи позиціонування сонячних панелей.

2.3 Розробка слідкуючої системи керування

Для розробки слідкуючої системи керування позиціонуванням сонячних панелей, пропонується ввести наступні скорочення:

G – вхідний вплив;

W_{reg} ($W_{regulator}$) – передатна функція регулятора;

W_{re_b} ($W_{regulatory_body}$) – передавальна функція регулюючого органу;

W_{co} ($W_{control_object}$) – передатна функція об'єкта керування;

W_{di} ($W_{disturbing_in}$) – передатна функція впливу, що збуджує;

W_{se} (W_{sensor}) – передатна функція датчика;

G_{int} – вхідний сигнал на об'єкт керування;

G_{dis} – збуджуючий вплив;

G_{out} – вихідний вплив.

Представимо її у вигляді наступної структурної схеми слідкуючої системи керування позиціонуванням сонячних панелей, на рисунку 2.6.

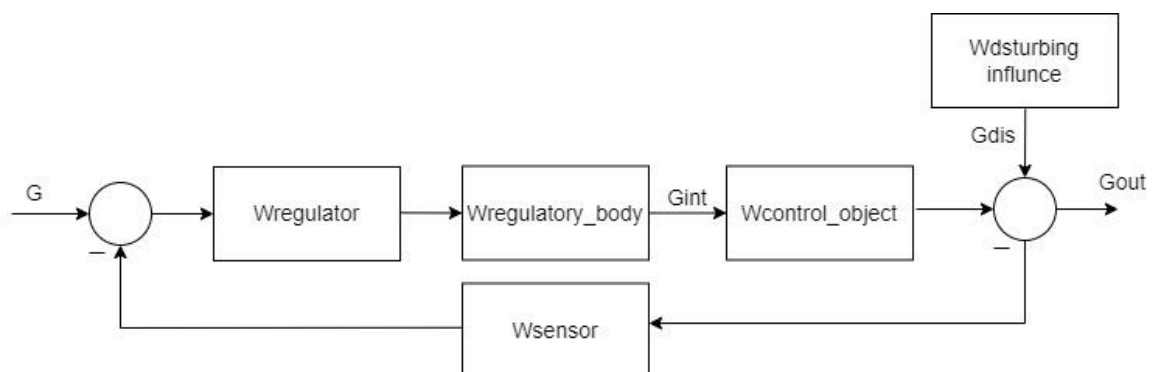


Рисунок 2.6 – Структурна схема слідкуючої системи керування позиціонуванням сонячних панелей [10]

Виходячи з цього, для точного позиціонування сонячних панелей, необхідно провести дослідження $W_{regulatory_body}$ – серводвигуна. Для цього представимо $W_{regulatory_body}$ як наступну функціональну схему електричного серводвигуна (рис. 2.7).

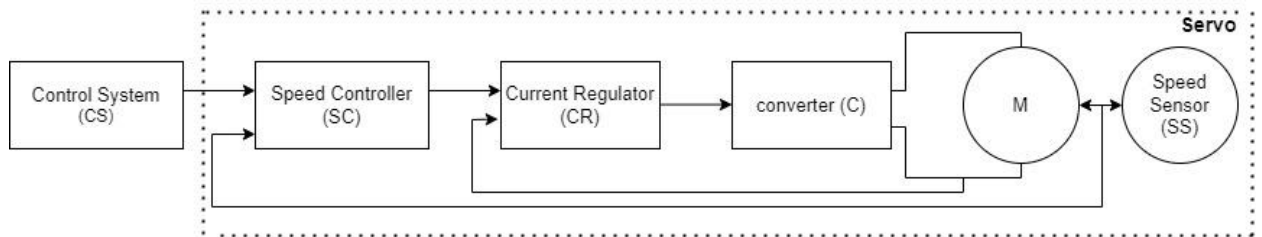


Рисунок 2.7 – Функціональна схема електричного серводвигуна

Control System (CS) – в нашому випадку це система керування серводвигуном на базі модуля Arduino Uno або nano.

Speed Controller (SC) – регулятор швидкості.

Current Regulator (CR) – регулятори струму.

Converter (C) – перетворювачі.

M – двигун.

Speed Sensor (SS) – датчик швидкості.

Ця функціональна схема електроприводу є аналого-цифровою системою автоматичного управління. У ній поєднуються переваги комбінованої аналогової системи, що працює за принципом триконтурної системи підпорядкованого регулювання, з перевагами цифрової системи (висока точність цифрових датчиків, зручність програмування роботи і т.д.). Як Current Regulator (CR) та Speed Controller (SC) використовуються найчастіше аналогові операційні підсилювачі, за допомогою яких легко реалізується необхідний закон управління. Speed Sensor (SS) може бути як аналоговим, і цифровим. У нашому випадку застосування датчика швидкості взагалі недоцільно, оскільки сигнал про зміну швидкості може бути

обчислений в цифровому регуляторі положення, шляхом диференціювання сигналу датчика кута.

Загалом, система управління електроприводу Converter (C) складається з трьох контурів регулювання (див. рис. 2.6: струму, швидкості та положення (кута повороту θ). Кожен із контурів є системою автоматичного управління. Існують різні варіанти побудови цих систем, тобто різні контури можуть бути як аналоговими, так і цифровими.

В рамках даних досліджень з розробки слідкуючої системи керування позиціонуванням сонячних панелей розробимо варіанти функціональної схеми приводу системи регулювання струму та швидкості – аналогові, а система регулювання кута – цифрова.

Таким чином, структурна схема двоконтурної системи регулювання (сервоприводу) на базі теорій автоматичного керування буде мати наступний вигляд, як представлено на рисунку 2.8.

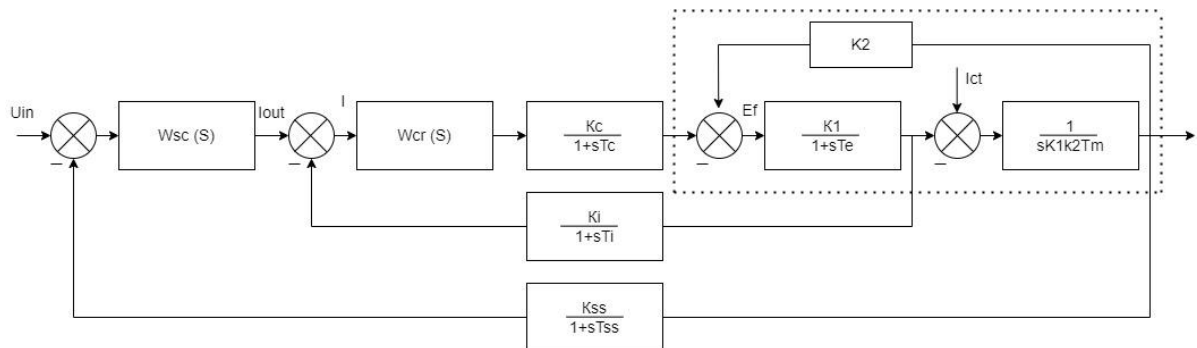


Рисунок 2.8 – Структурна схема двоконтурної системи регулювання (сервоприводу)

Для зручності розрахунків вона представлена у вигляді двох блоків, що описують електричні (з постійного часу T_e) та електромеханічні (з постійного часу T_m) властивості двигуна та блоку зворотного зв'язку з коефіцієнтом посилення k_2 , який враховує вплив зміни моменту навантаження на валу двигуна на зміну струму якоря. Постійна часу T_m

також враховує інерційні властивості об'єкта (маніпулятора). Через I_{ct} позначений струм, зумовлений статичним навантаженням.

Точність визначається шляхом коефіцієнтів помилок. Відповідно до цього методу, помилка $\varepsilon(t)$ в режимі ε_{yct} , що встановився в системі, представлений на рис. 2.7, визначається виразом:

$$\varepsilon_{yct} = \varepsilon_{uyct} + \varepsilon_{fct} \quad , \quad (2.1)$$

де ε_{uyct} – помилка, що встановилася від сигналу уставки $u(t)$;

ε_{fct} – помилка, що встановилася від збурення $f(t)$.

Помилка, що встановилася від сигналу уставки ε_{uyct} визначається співвідношенням (2.2)

$$\varepsilon_{uyct} = C_0 u(t) + \frac{C_{1u}}{1!} \frac{du(t)}{dt} + \frac{C_{2u}}{2!} \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \dots \quad (2.2)$$

Помилка, що встановилася від збурення $f(t)$ визначається співвідношенням (2.3)

$$\varepsilon_{fct} = C_{of} f(t) + \frac{C_{1f}}{1!} \frac{df(t)}{dt} + \frac{C_{2f}}{2!} \frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \dots \quad (2.3)$$

де C_{1u} та C_{1f} (при $i = 0, 1, 2, \dots$) називаються коефіцієнтами помилок і можна визначити так:

$$\left. \begin{aligned} C_{0u} &= W_{\varepsilon u}(s) \Big|_{s=0} = \frac{1}{1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s)} \Big|_{s=0} \\ C_{iu} &= \frac{d^i W_{\varepsilon u}(s)}{ds^i} \Big|_{s=0}, i = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad , \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{0f} &= W_{\varepsilon f}(s) \Big|_{s=0} = \frac{W_2(s)W_3(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s)} \Big|_{s=0} \\ C_{if} &= \frac{d^i W_{\varepsilon f}(s)}{ds^i} \Big|_{s=0}, i = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} . \quad (2.5)$$

Як видно з рис. 2.7, контур регулювання струму містить три аперіодичні ланки з постійними часу T_c , T_i та T_s . Тому якщо як регулятор струму використовувати Р-регулятор, то отримаємо статичну систему з помилкою I , що встановилася по управлінню від постійного вхідного впливу I_{out} . Помилка, згідно (2.2) та (2.3), визначається співвідношенням:

$$\Delta I_i = \frac{I_{out}}{(1 + k_{sc}k_{cr}k_lk_{ss})}, \quad (2.6)$$

де k_{sc} – коефіцієнт посилення, регулятора швидкості;

k_{cr} – коефіцієнт посилення, регулятора струму;

k_l – коефіцієнт посилення, перетворювача;

k_{ss} – коефіцієнт посилення, датчика швидкості.

Якщо РІ регулятор току похибка, $\Delta I_i = 0$, то похибка ΔI_f від дії збурення E_f відповідно виразу (2.3) та (2.5), для Р та РІ-регулятора визначаються співвідношеннями:

$$\Delta I_i = \frac{E_j k_l k_{sc}}{1 + k_l k_{sc} k_{cr} k_{ss}}, \quad (2.7)$$

$$\Delta I_i = 0 . \quad (2.8)$$

Аналогічно можуть бути розраховані значення помилки, що встановилися, в контурі регулювання швидкості. Внаслідок чого, можливо представити передатну функцію двигуна W_{serv} у вигляді:

$$W_{serv}(s) = \frac{k_p k_n k_l (1 + sT_{ss})}{(1 + sT_n)(1 + sT_{cr})(1 + sT_{cs}) + k_p} . \quad (2.9)$$

Для цього перетворюємо структурну схему двоконтурної системи регулювання (рис. 2.8) до більш простого вигляду, як представлено на рисунку 2.9.

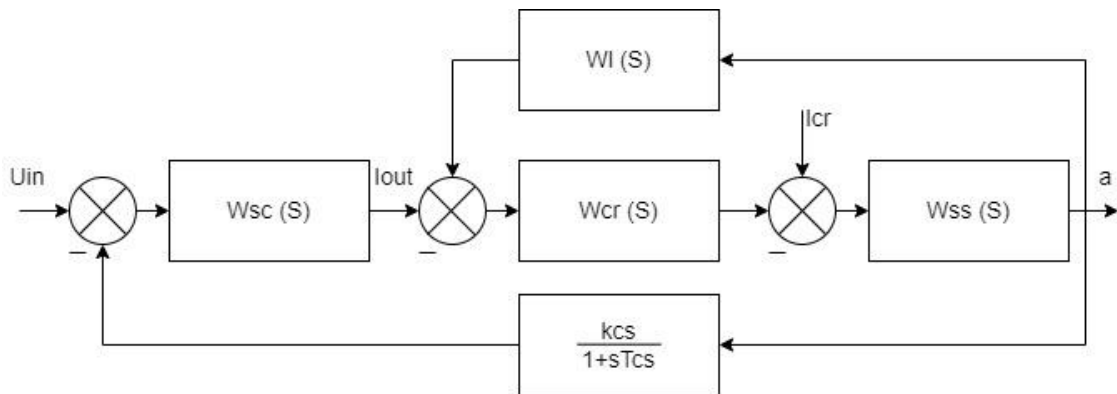


Рисунок 2.9 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

Виходячи зі структурної схеми контуру регулювання швидкості (рис. 2.8), передавальна функція замкнутого контуру регулювання струму $W_{kt}(s)$ для різних законів керування буде мати наступний вигляд:

P-регулятор струму буде мати наступний вигляд:

$$W_{kt}(s) = \frac{k_{p,l} k_n k_l (1 + sT_{dt})}{(1 + sT_n)(1 + sT_{pr})(1 + sT_{dt}) + k_0} , \quad (2.10)$$

де $k_p = k_{pt} k_1 k_n k_{dt}$ – коефіцієнт посилення розімкненої системи регулювання струму.

PI-регулятор струму буде мати наступний вигляд:

$$W_{kt}(s) = \frac{k_{pt} k_n k_1 (1 + sT_{dt})(1 + sT_{pt})}{sT_{pt} (1 + sT_n)(1 + sT_{pt})(1 + sT_{dt}) + k_{pt} (1 + sT_{pt})}. \quad (2.11)$$

Відповідно до рис. 2.8 та співвідношень (2.2), (2.4), (2.10) та (2.11), вираз визначення помилки з управління від U_{in} в контурі регулювання швидкості запишеться як:

– для Р-регулятора швидкості та Р-регулятора струму

$$\Delta U_u = \frac{U_{in}}{1 + \frac{k_{pt} k_n k_1 k_{dt}}{k_2}}; \quad (2.12)$$

– для Р-регулятора швидкості та PI-регулятора струму

$$\Delta U_u = 0. \quad (2.13)$$

Помилка Δu_1 від збурення I_{cr} визначається з рис. 2.8 та співвідношень (2.3), (2.5), (2.10), (2.11):

– для Р-регулятора швидкості та Р-регулятора струму:

$$\Delta u_1 = \frac{I_{cr} k_{pt} k_{dt} (1 + k_n)}{k_1 k_2 k_{dt} + k_p k_{dt} k_{pt}}; \quad (2.14)$$

– для Р-регулятора швидкості та PI-регулятора струму:

$$\Delta u_l = \frac{I_{cr} k_{dt}}{k_{pt}} ; \quad (2.15)$$

– для PI-регулятора швидкості при $I_{cr} = const$:

$$\Delta u_l = 0. \quad (2.16)$$

Отримані співвідношення дозволяють оцінити точність сервоприводу (сумарну помилку, що встановилася від дії сигналу управління і сигналу збурення) і таким чином вибрати тип регуляторів.

2.4 Розробка цифрової системи регулювання положення (кута) серводвигуна

Вважатимемо, що параметри регулятора швидкості та струму обрані і, отже, відома передатна функція двоконтурної системи регулювання швидкості $W_{ds}(s)$. Для перетворення безперервного сигналу дискретний в цифровій системі здійснюється квантування сигналу за рівнем і часом, це перетворення представлено на рисунку 2.10 послідовним з'єднанням нелінійного елемента квантування за рівнем (НЕ) та імпульсного елемента (ІЕ) з тактом роботи T .

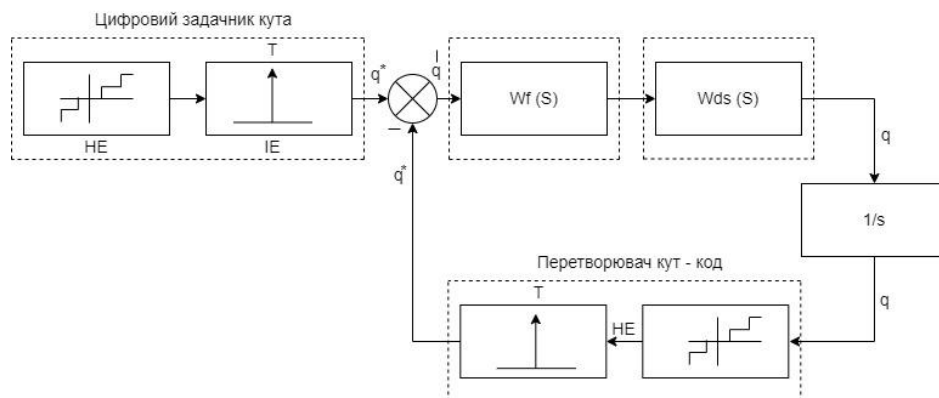


Рисунок 2.10 – Структурна схема цифрового приводу (серводвигуна)

Як видно з рис. 2.10, цифрова система є нелінійною імпульсною системою, дослідження якої в загальному випадку представляє значні складності. Істотне спрощення можна отримати, якщо знехтувати квантуванням за рівнем, що справедливо, коли в системі використовуються багаторозрядні цифрові датчики. У цьому випадку цифрова система являє собою лінійну імпульсну систему, яка представлена на рисунку 2.11.

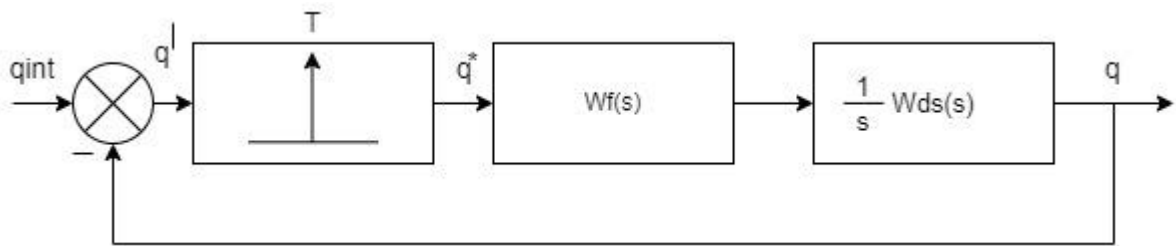


Рисунок 2.11 – Еквівалентна структурна схема цифрового приводу без урахування квантування за рівнем

В даному випадку, в рамках дослідження наведена еквівалентна структурна схема цифрового приводу без урахування квантування за рівнем (рис. 2.11). Може бути спрощена за рахунок допуску, що такт роботи імпульсного елемента T істотно менший за постійні часи сервоприводу (див. рис. 2.10), то лінійна імпульсна система може розглядатися як безперервна, в якій передатна функція в розімкнутому стані визначається співвідношенням:

$$W_p(s) = \frac{1}{T} W_p(s) = \frac{1}{s} W_{ds}(s) . \quad (2.17)$$

Якщо виявляється, що квантуванням за рівнем знехтувати не можна, то цифрову систему слід аналізувати з позиції теорії нелінійних систем. Для цього випадку умова абсолютної стійкості цифрової системи формується наступним чином: цифрова система стійка, якщо при стійкій наведеній безперервній частині з наступної передаточної функції:

$$\frac{1}{T}W_{pn}(s) = \frac{1}{sT}W_f(s)W_{ds}(s) \quad (2.18)$$

Для даного випадку, коли доводиться враховувати квантування за часом і рівнем, критерій абсолютної стійкості можна сформулювати за аналогією наступним чином: положення рівноваги цифрової системи стійке, якщо стійка наведена безперервна частина, а годограф частотної характеристики імпульсної системи $W_{pn}^*(j\omega), \omega = \omega T$ розташовується праворуч від вертикальної прямої.

Перетворимо структурну схему (рис. 2.10) до схеми, показаної на рис. 2.12, включивши до неї додатково регулятор положення з передавальною функцією $W_{pn}(s)$ та відобразивши зовнішнім впливом F , наведеним до входу сервоприводу, вплив навантаження на валу двигуна, k_{du} – статичний коефіцієнт передачі датчика кута.

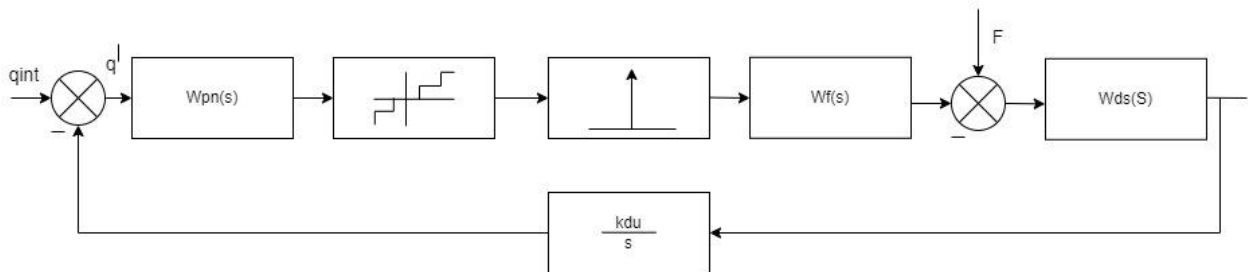


Рисунок 2.12 – Структурна схема електроприводу з цифровим регулятором положення

Проведемо попередній аналіз за лінеаризованою моделлю системи. Оскільки система є астатичною, то згідно (2.4), помилка від впливу, що управляє ($\theta_q = const$) дорівнює нулю. Однак наявність збурення F , що змінюється в приводах Converter (C) у широкому діапазоні, може викликати значну помилку q' , усунення якої можливе двома способами:

- введенням ланцюга компенсації збурення, тобто створенням комбінованої системи регулювання з відхилення та збурення;
- запровадженням ПІ-регулятора положення.

При першому способі, який є досить простим та ефективним, не забезпечується повна компенсація помилки. Технічна реалізація ланцюга компенсації можлива навіть на етапі створення сервопривода.

При другому способі помилки F теоретично стає рівною нулю, а система стає астатичною другого порядку.

Відомо, що замкнута лінійна система, що містить в контурі два аналогових інтегратора, може бути стійкою за рахунок введення елементів, що коректують. Якщо в такій системі, крім двох аналогових інтеграторів, існує нелінійний елемент квантування з розривною характеристикою, то це може призвести до виникнення періодичних коливань. Це можна показати, розв'язуючи рівняння:

$$W_n(A)W_{ic}(j\omega) = -1. \quad (2.19)$$

Для структурної схеми електроприводу з цифровим регулятором положення, наведеної на рис. 2.11. дійсно, якщо навіть припустити, що система знаходиться в положенні рівноваги, то будь-яке скільки завгодно мале збурення або дрейф нуля аналогових інтеграторів виведе систему з цього положення; при спрацьовуванні нелінійного елемента квантування система знову повернеться у вихідне положення, при якому вона є розімкнутою системою з двома інтеграторами і далі процеси повторяться. Використання цифрових інтеграторів дозволяє, по-перше, сутнісно виключити вплив нелінійного елемента квантування (тобто замінити його лінійним) і, по-друге, виключити дрейф нуля інтеграторів. За допомогою цифрових інтеграторів легко реалізуються різні дискретні регулятори та

елементи, що коригують. Показники цифрових інтеграторів буде підібрано експериментальним шляхом, під час проведення експериментів з макетом.

2.5 Розробка схеми підключення

Система позиціонування сонячних панелей, яка складається з Arduino Uno, модуля TP4058 для зарядки акумуляторів, вхід, підключений до сонячної панелі та 4 датчиків GL5516, працює наступним чином:

- сонячна панель: сонячна панель виробляє постійний струм з сонячної енергії, який надходить до модуля TP4058;

- модуль TP4058: TP4058 – це модуль зарядки, який забезпечує зарядку акумуляторів з сонячної панелі. Він відповідає за оптимальне зарядження акумуляторів з енергії, отриманої від сонячної панелі, і захист від перезарядки;

- акумулятор: акумулятор зберігає енергію, яка була зібрана сонячною панеллю та проходить через модуль TP4058. Використовуючи акумулятори дозволяє накопичувати енергію для подальшого використання, особливо в періоди недостатньої сонячної активності;

- датчики GL5516: ці датчики – це фоторезистори (світлочутливі резистори), які вимірюють рівень освітлення, зокрема яскравість навколишнього світла. Вони знаходяться на різних сторонах сонячних панелей, щоб забезпечити інформацію про напрямок інтенсивності світла. Використання 4 датчиків GL5516, замість 2-х, в системі позиціонування сонячних панелей має такі переваги;

- краща точність визначення напрямку сонця: завдяки більшій кількості датчиків, Arduino може отримувати дані з більшої кількості точок і знаходити середнє значення освітленості. Це дозволяє більш точно визначити напрямок, з якого надходить найбільша інтенсивність світла, і відповідно, позиціонувати сонячні панелі більш точно;

– забезпечення резервування: якщо один з датчиків GL5516 вийде з ладу або відмовить, інші датчики можуть забезпечити резервне читання світлового потоку. Це підвищує надійність системи, оскільки неправильне функціонування одного датчика не призведе до втрати функціональності всієї системи;

– вплив шуму та перешкод: коли використовується більше датчиків, система може виконати усереднення або зведення до мінімуму вплив шуму або можливих перешкод, таких як тіні або хмари. Таким чином, система стає менш вразливою до некоректних вимірювань;

– більша площа вимірювання: завдяки більшій кількості датчиків можливе охоплення більшої площі навколо сонячних панелей. Це дозволяє виявляти зміни освітленості в ширшому діапазоні і включати механізми позиціонування панелей ще до того, як Сонце повністю затінить один з датчиків;

– більш гнучкий алгоритм: за допомогою даних з декількох датчиків, можна застосовувати більш складний алгоритм для обробки даних, наприклад, калібрування, фільтрацію або корекцію систематичних помилок. Це дозволяє досягти більш високої точності позиціонування сонячних панелей;

– Arduino Uno: Arduino Uno виконує роль контролера в системі. Він отримує дані від датчиків GL5516 через аналоговий вхід, а також має доступ до стану зарядження акумуляторів через TP4058. На основі цих даних, Arduino приймає рішення про позиціонування сонячних панелей для оптимального збору сонячної енергії.

Позиціонування сонячних панелей: Arduino використовує дані від датчиків, що вимірюють яскравість, для визначення напрямку найбільш інтенсивного світла (напрямку Сонця). Залежно від цих даних, Arduino може контролювати сервоприводи або двигуни, щоб змінювати положення сонячних панелей таким чином, щоб вони були зорієнтовані на Сонце

протягом дня. Крім того, Arduino може контролювати модуль TP4058 для оптимальної зарядки акумуляторів, зокрема, забезпечуючи переключення зарядки на режим розрядження, коли акумулятори наповнені, а сонячна енергія лишається невикористаною.

Така система позиціонування дозволяє сонячним панелям постійно слідкувати за сонцем і максимізувати збір сонячної енергії, що забезпечує оптимальну ефективність та використання сонячних панелей. Схема підключення апаратних модулів системи позиціонування сонячних панелей для розробки макета представлена на рисунку 2.13.

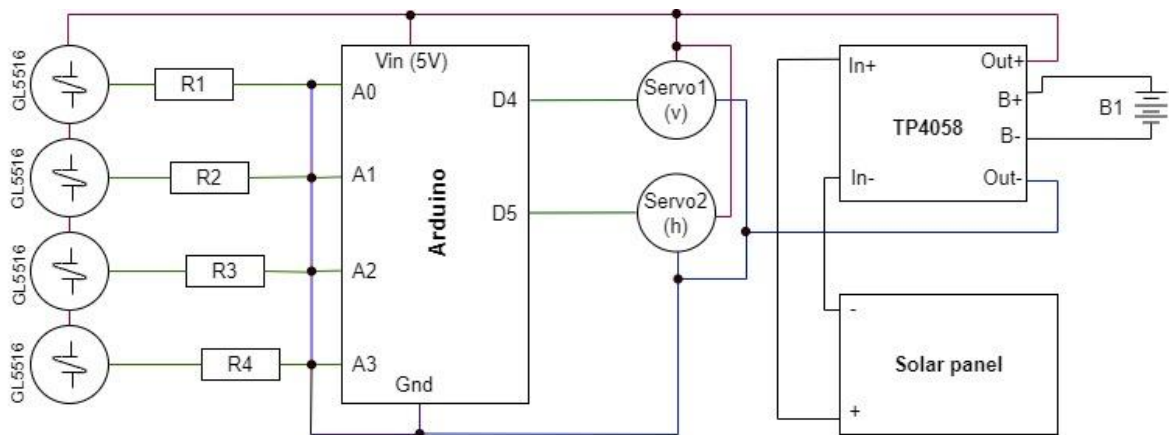


Рисунок 2.13 – Схема підключення апаратних модулів системи позиціонування сонячних панелей для розробки макета

Варто зауважити, що при складанні макета необхідно використовувати діод Шотткі при підключенні сонячних панелей до модуля TP4058 для захисту системи від зворотнього струму. Так як модуль TP4058 – це модуль зарядки літій-іонних або літєво-полімерних акумуляторів з сонячних панелей. Коли сонячна панель генерує електричний струм при наявності сонячного світла, цей струм потрапляє до модуля TP4058 для зарядки акумуляторів.

Проте, коли немає сонячного світла або коли інтенсивність світла недостатня, акумулятори можуть намагатись віддавати свою збережену

енергію назад до сонячної панелі. Це може статися, наприклад, вночі або в темний хмарний день. Якщо зворотний струм допускається назад до сонячної панелі, це може призвести до небажаного розряду акумуляторів та зниження ефективності системи в цілому. Для цього і використовується діод Шотткі. Він підключається між сонячною панеллю та модулем TP4058 та діє як вентиль, який дозволяє пропускати струм від сонячної панелі до модуля зарядки, але не дозволяє зворотного струму з акумуляторів до сонячної панелі. Це забезпечує захист акумуляторів від розряду та підтримує ефективність системи позиціонування сонячних панелей. Загалом, діод Шотткі використовується для створення одностороннього електричного провідника, що дозволяє пропускати струм тільки в одному напрямку, забезпечуючи захист і стабільну роботу системи зарядки акумуляторів за допомогою сонячних панелей.

2.6. Розробка 3D моделі макета

Відповідно до обраних апаратних модулів, розробимо концепт та 3D модель макета системи позиціонування сонячних панелей, з можливістю 3D друку. Запропонований концепт представлено на рисунку 2.14.

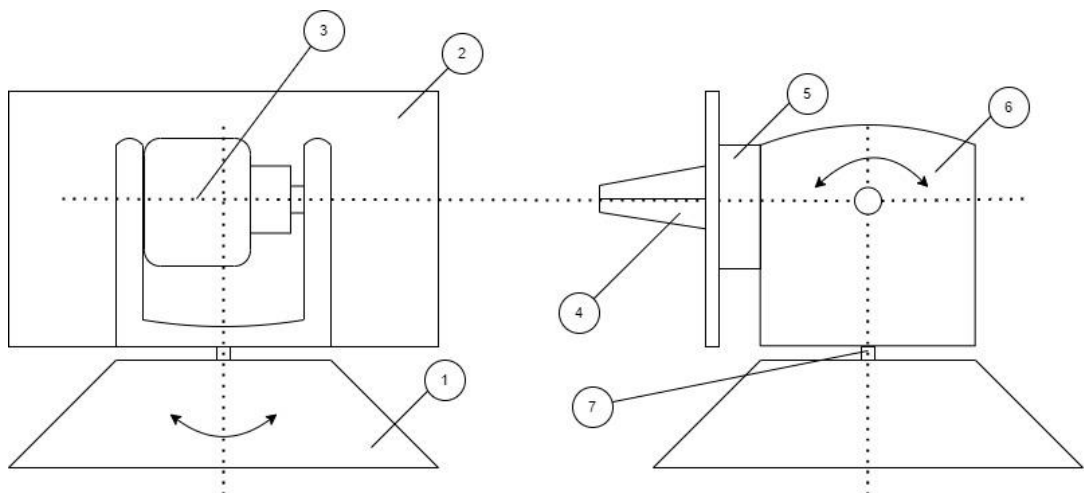


Рисунок 2.14 – Концепт макета для дослідження системи позиціонування сонячних панелей

На рисунку 2.14 представлені наступні елементи:

- 1 – стійка, служить основою для сонячних панелей та буде надрукована з PLA пластику;
- 2 – панель, для кріплення 2 сонячних панелей;
- 3,7 – актуатори, сервоприводи, які використовуються для руху сонячних панелей у відповідь на вимірювання з датчиків;
- 4 – датчики, для визначення напрямку сонця або інтенсивності світла, будуть використовуватися фоторезистори на базі сенсорів GL5516;
- 5 – стійка, для кріплення сервопривода для позиціонування по горизонту;
- 6 – стійка, для кріплення сервопривода.

Виходячи з запропонованого концепт макета, розробимо 3D моделі деталей. Для цього будемо використовувати Autodesk Tinkercad. Autodesk Tinkercad – це веб-платформа для 3D-моделювання, яка надає користувачам простий інтерфейс для створення 3D-моделей. Для проектування 3D моделей конструкцій системи позиціонування сонячних панелей для 3D друку, Autodesk Tinkercad може мати деякі переваги:

- простота використання: Tinkercad має дуже інтуїтивний і простий інтерфейс, що дозволяє навіть новачкам легко вивчити основи 3D-моделювання. Це робить його ідеальним вибором для тих, хто тільки починає з 3D друком або хоче швидко створити прості 3D моделі;
- веб-платформа: Tinkercad працює через веб-браузер, тому немає необхідності встановлювати додаткове програмне забезпечення. Ви можете працювати з Tinkercad з будь-якого комп'ютера з Інтернет-підключенням, що забезпечує зручний доступ до вашого проекту навіть під час пересування;
- безкоштовний доступ: основні функції Tinkercad доступні безкоштовно, що дозволяє спробувати його без будь-яких фінансових витрат. Це чудовий варіант для тих, хто не хоче інвестувати в дороге програмне забезпечення на початкових етапах;

– багатофункціональність: незважаючи на його простоту, Tinkercad має досить багатофункціональність для створення базових 3D-моделей. Ви можете створювати геометричні форми, об'єднувати їх, вирізати і розділяти, застосовувати текстури, тощо;

– можливості спільного використання: Tinkercad дозволяє користувачам спільно працювати над проектами та обмінюватися своїми 3D-моделями з іншими користувачами. Це відкриває можливості для співпраці і отримання порад від інших учасників.

Хоча Autodesk Tinkercad має багато переваг, він також має свої обмеження. Для складніших проектів або вимог до більшої точності і деталізації може бути корисніше використовувати більш професійні програми для 3D-моделювання, такі як Autodesk Fusion 360, SolidWorks або Blender. Однак, для початку і простих проектів Tinkercad може бути ідеальним варіантом.

На першому етапі розробимо 3D модель деталі для кріплення 2 сонячних панелей (рис.2.23, поз.2). Для цього в робочій зоні Tinkercad створимо твердотільний паралелепіпед, як представлено на рисунку 2.15.

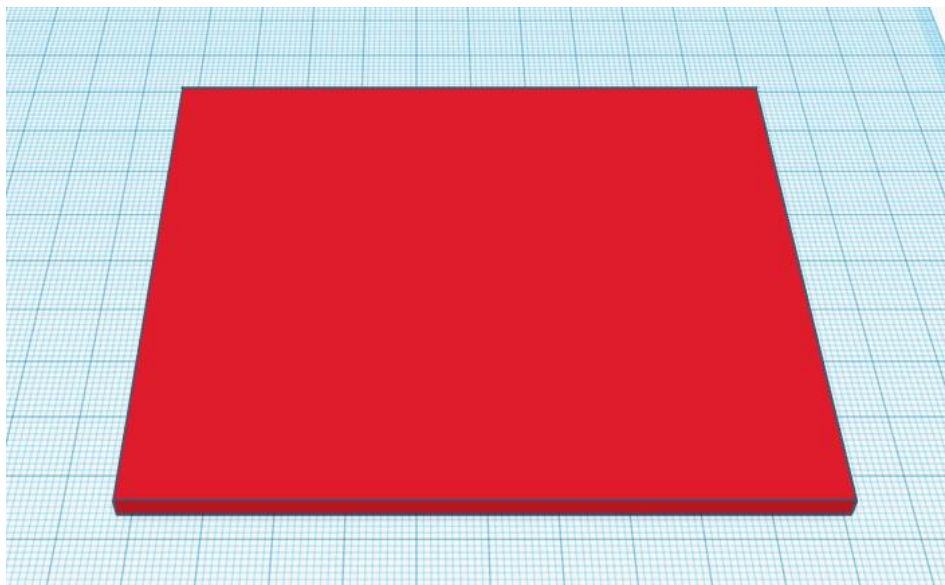


Рисунок 2.15 – Твердотільний паралелепіпед, як основа 3D модель деталі для кріплення 2 сонячних панелей

Далі, використовуючи елемент паралелепіпед – отвір, створимо технічні отвори, які дозволяють зменшити загальну вагу деталі, а також провести кабель менеджмент від сонячних панелей до системи керування, приклад роботи з елемент паралелепіпед – отвір представлено на рисунку 2.16.

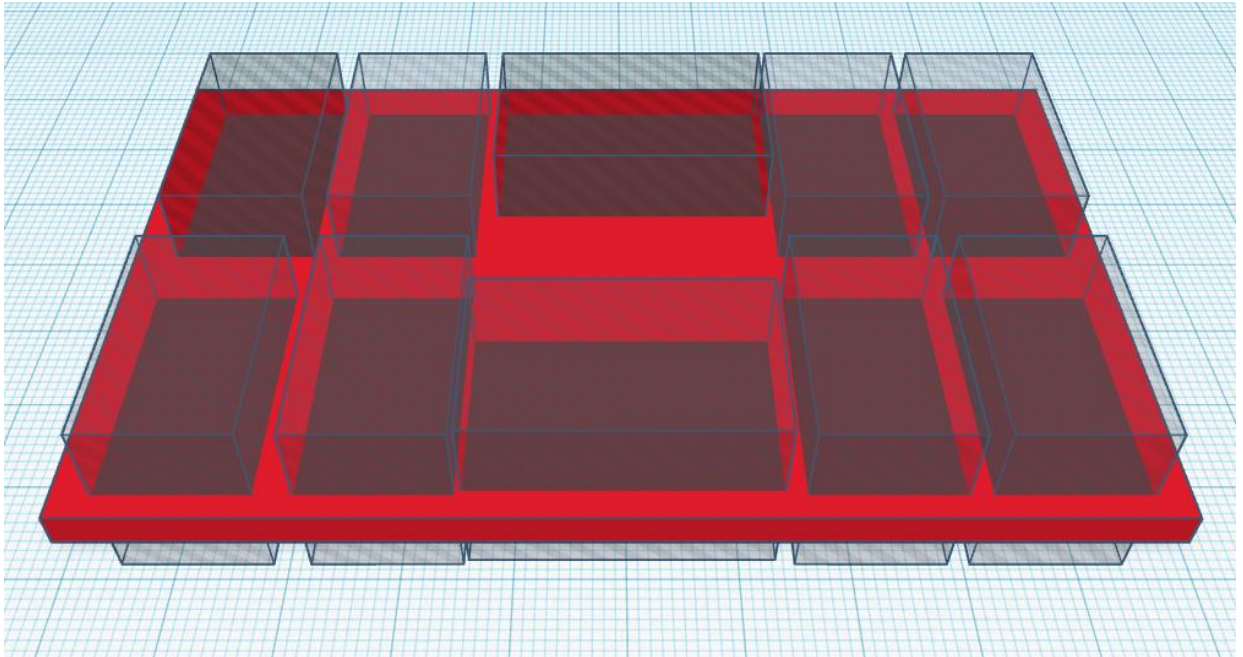
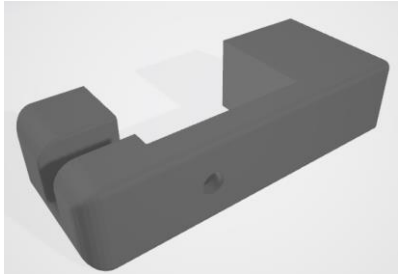
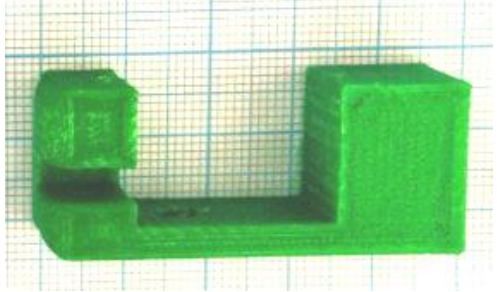
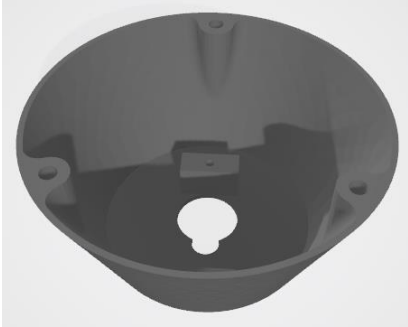



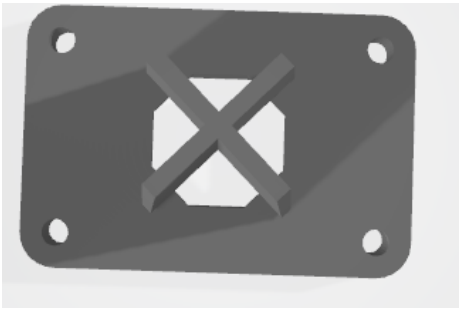
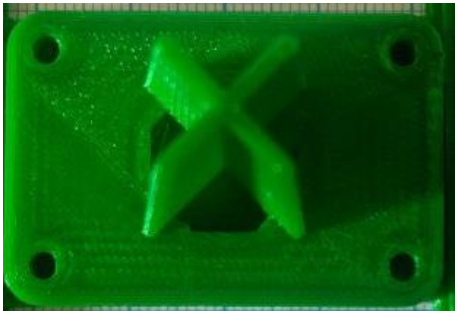


Рисунок 2.16 – Ескіз 3D модель деталі для кріплення 2 сонячних панелей з елементом паралелепіпед – отвір

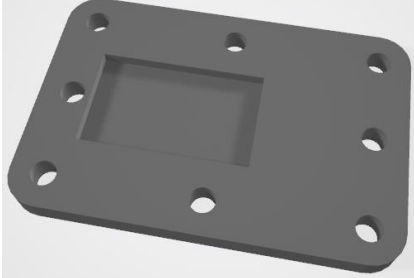
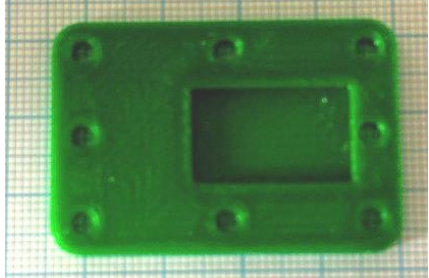
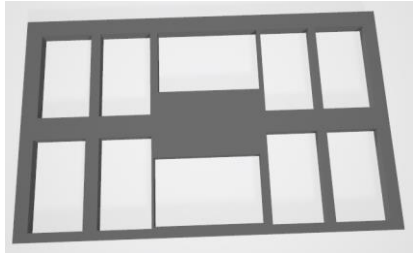
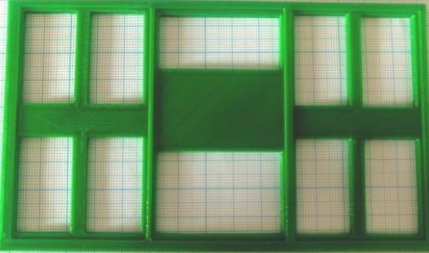
Варто зауважити, що на рисунку 2.16 елементом паралелепіпед – отвір розтинає поверхню твердотілого паралелепіпеда, що дозволяє створити наскрізні отвори. Наступним кроком збережемо розроблену деталь для кріплення 2 сонячних панелей у вигляді *.stl файла. Для цього оберемо кнопку «експорт» та в налаштуваннях вкажемо формат для 3D друку *.stl.

Результат проектування 3D моделі системи позиціонування сонячних панелей та отримані деталі на базі 3D друку представлені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результат проектування 3D моделі системи позиціонування сонячних панелей та отримані деталі на базі 3D друку

№ позначення	3D деталі макета в форматі *.stl	Отримані деталі на базі 3D друку
1	2	3
3		
1		
6		
4		

Продовження таблиці 2.5

1	2	3
5		
2		

2.7 Збірка макета системи позиціонування сонячних панелей

Перед зборкою макета позиціонування сонячних панелей, необхідно вирішити кількість сонячних панелей та місце розташування модулів датчиків GL5516. В рамках розробленої конструкції маємо два варіанти розташування датчиків GL5516, як представлено на рисунку 2.17.



а)



б)

а) – модуль датчиків GL5516 зверху та 3 сонячні панелі;

б) – модуль датчиків GL5516 по центру та 2 сонячні панелі

Рисунок 2.17 – Варіанти розташування модуля датчиків GL5516

Розташування модулів датчиків GL5516 по центру двох сонячних панелей (рис. 2.17, б) або зверху (рис. 2.17, а) може мати як певні переваги, так і недоліки. Вибір оптимального розташування залежить від конкретних умов і вимог системи позиціонування сонячних панелей. Давайте розглянемо ці переваги та недоліки для кожного з варіантів:

– розташування модулів датчиків GL5516 по центру двох сонячних панелей (рис. 2.17, б).

Перевагами є краще охоплення області навколо сонячних панелей, розташування датчиків по центру двох панелей може дати більш широкий огляд навколишнього середовища. Це може допомогти більш точно визначити напрямок, з якого найбільша інтенсивність світла, що дозволяє більш ефективно позиціонувати панелі. Менше впливу тіней, розташування датчиків по центру може зменшити вплив тіней, створених самими панелями або іншими об'єктами, що можуть перекривати сонце. Це може покращити точність визначення положення сонця.

До недоліків можна віднести збільшена складність монтажу, монтаж датчиків по центру двох панелей може бути більш складним і вимагати додаткових зусиль та кабелів для підключення;

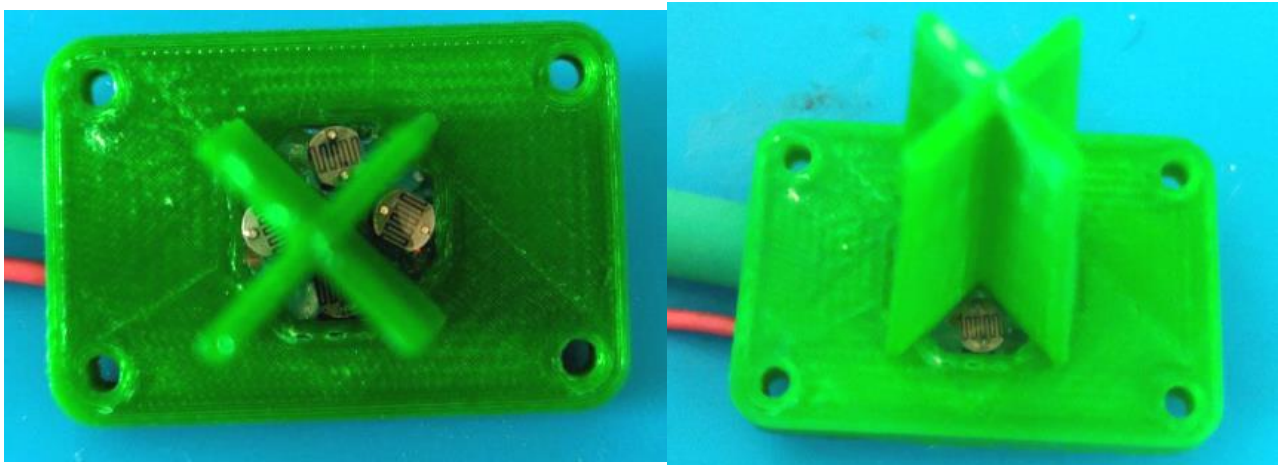
– розташування модулів датчиків GL5516 зверху сонячних панелей (рис.2.16, а).

Перевагами є простота монтажу, розташування датчиків зверху панелей може бути менш складним і більш легкою альтернативою, особливо якщо панелі вже мають підготовлені пласти на верхній частині для монтажу. Захист від забруднень, розташування датчиків зверху панелей може захистити їх від забруднень, таких як пил, дощ або сніг, що може вплинути на точність вимірювань.

До недоліків можна віднести погіршення огляду, розташування датчиків зверху панелей може обмежити їх огляд навколишнього середовища, що може вплинути на точність визначення напрямку Сонця.

Вплив тіней, розташування датчиків над панелями може спричинити більший вплив тіней, що створюються самими панелями, зокрема в ранкових або вечірніх годинах, коли сонце знаходиться близько до горизонту.

Наступним кроком, зберемо збірку модулів датчиків GL5516 (рис. 2.13., поз.4), для визначення напрямку сонця по інтенсивності світла. Приклад зібраного модуля представлено на рисунку 2.18.



а)

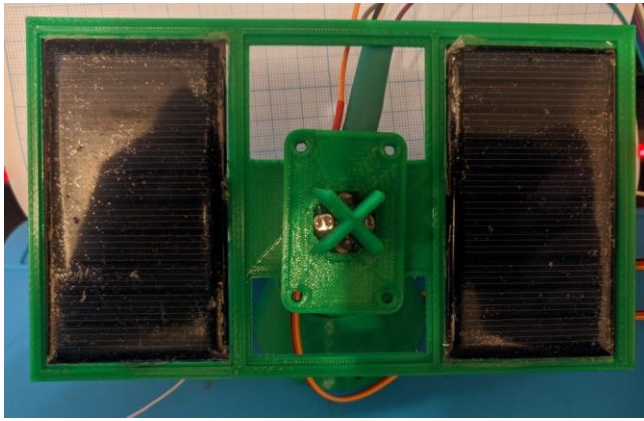
а) вид зверху;

б)

б) вид збоку

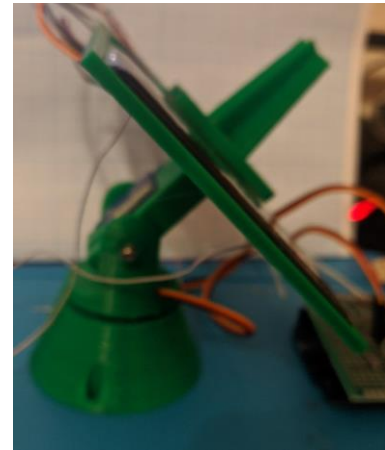
Рисунок 2.18 – Збірка модулів датчиків GL5516 для визначення напрямку сонця по інтенсивності світла

Зальний вигляд зібраного макета виконавчого механізму системи позиціонування сонячних панелей, представлено на рисунку 2.19.



а)

а) вид зпереду;



б)

б) вид збоку

Рисунок 2.19 – Зальний вид зібраного макета виконавчого механізму системи позиціонування сонячних панелей

Відповідно з розробленою схемою підключення апаратних модулів системи позиціонування сонячних панелей (рис. 2.13) було зібрано макет апаратного модуля системи керування позиціонування сонячних панелей на базі Arduino Uno, який представлено на рисунку 2.20.

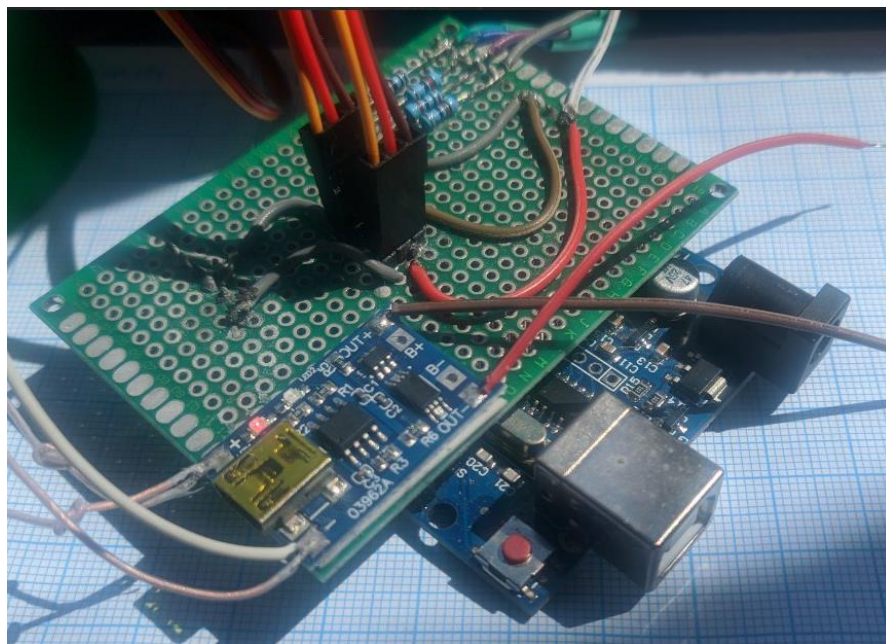


Рисунок 2.20 – Макет системи керування позиціонування сонячних панелей на базі Arduino Uno

2.8 Висновки до 2 розділу

В ході виконання 2 розділу кваліфікаційної роботи магістра, було розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням сонячних панелей, проведено аналіз та обрані апаратні модулі для розробки системи керування так і виконавчі механізми, а також і сенсори для визначення напрямку, з якого найбільша інтенсивність світла сонця. Ґрунтуючись на параметрах обраних апаратних модулів була розроблена структурна схема слідкуючої системи керування позиціонуванням сонячних панелей на базі теорій автоматичного керування. Розроблено функціональну схему електричного серводвигуна 9 г 6СН RC SG90, та на базі неї запропонована слідкуюча система керування позиціонуванням сонячних панелей в варіанті: системи регулювання струму та швидкості – аналогові, а система регулювання кута – цифрова. Для неї запропоновано метод визначення точності позиціонування шляхом коефіцієнтів помилок, та розроблені формули розрахунку контуру регулювання швидкості передавальна функція замкнутого контуру регулювання струму $W_{kr}(s)$ для різних законів керування. Це дало можливість розробити структурну схему цифрового приводу (серводвигуна), у вигляді нелінійної імпульсної системи та провести дослідження даної системи. Дослідження розробленої системи показало, що використання цифрових інтеграторів дозволяє, по-перше, сутнісно виключити вплив нелінійного елемента квантування (тобто замінити його лінійним) і, по-друге, виключити дрейф нуля інтеграторів. За допомогою цифрових інтеграторів легко реалізуються різні дискретні регулятори та елементи, що коригують. Показники цифрових інтеграторів буде підібрано експериментальним шляхом, під час проведення експериментів з макетом.

Для проведення експериментів було розроблено схеми підключення системи позиціонування сонячних панелей. Спроектовано концепт макета та

за допомогою Autodesk Tinkercad, розроблено 3D моделі деталей системи позиціонування сонячних панелей. Використовуючи можливість імпорту, 3D моделі деталей в формат *.stl, було надруковано на 3D принтері всі елементи конструкції та зібрано експериментальний макет системи позиціонування сонячних панелей.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

3.1 Аналіз та вибір середовища розробки

При виборі середовища розробки для Arduino Uno слід звернути увагу на кілька ключових факторів, таких як зручність використання, функціональність, підтримка, розширення та комунікабельність з Arduino Uno. Ось аналіз декількох популярних середовищ розробки для Arduino Uno:

- Arduino IDE (Arduino Integrated Development Environment). Arduino IDE є офіційним середовищем розробки від Arduino.cc. Воно має простий інтерфейс, що підходить для початківців, та має всі необхідні інструменти для програмування Arduino Uno. Основні переваги Arduino IDE, які були згадані в попередньому, є його простота, безкоштовність, велика спільнота та підтримка всіх основних функцій Arduino Uno;

- PlatformIO – це відкрите середовище розробки для роботи з мікроконтролерами, включаючи Arduino Uno. Це є розширення для різних IDE, таких як Visual Studio Code, Atom та інші. Основні переваги PlatformIO полягають у його багатофункціональності, великій підтримці платформ та можливості використання різних мов програмування (C/C++, Python, JavaScript тощо). Він також має інтеграцію з репозиторіями бібліотек, що дозволяє легко знайти та встановити бібліотеки для Arduino Uno;

- Energia – це інше популярне середовище розробки, спрямоване на платформи Arduino та інші мікроконтролери. Однією з його основних переваг є підтримка розширення Wiring (мова програмування Arduino), що дозволяє легко переносити існуючий код з Arduino IDE до Energia. Це може бути корисним для користувачів, які вже знайомі з Arduino IDE і хочуть швидко почати розробку в іншому середовищі.

В рамках даних досліджень для розробки програми керування позиціонуванням сонячних панелей на базі Arduino Uno буде використовуватися Arduino IDE ver. 1.8.19.

3.2 Розробка алгоритму керування позиціонуванням сонячних панелей

Метод керування позиціонуванням сонячних панелей на базі Arduino Uno з використанням 4 датчиків GL5516 та 2 серводвигунів 6CH RC SG90 може бути реалізований за допомогою простого алгоритму зв'язку "пропорційний-інтегрально-диференціальний" (PID).

Приєм PID-керування полягає в тому, щоб отримувати зворотний зв'язок про стан системи (в даному випадку, значення освітленості, що зчитуються з датчиків GL5516), порівнювати його з цільовим значенням (наприклад, максимальне значення освітленості, яке відповідає оптимальному напрямку Сонця), і відповідно до цього змінювати кути повороту серводвигунів, щоб привести систему до бажаного стану.

Основні кроки методу (алгоритму) PID-керування:

- зчитування даних з датчиків: періодичне зчитування значення освітленості з усіх 4 датчиків GL5516. Можна використовувати функцію `analogRead()` для зчитування значень;

- обчислення помилки: обчислення помилки як різницю між цільовим значенням освітленості та поточним зчитаним значенням. Це може бути зроблено для кожного датчика окремо;

- пропорційна компонента (P), пропорційна компонента визначає, наскільки швидко повинен реагувати серводвигун на помилку. Вона залежить від коефіцієнта P. Обчислення пропорційного компоненту для кожного датчика, помноживши помилку на коефіцієнт P;

- інтегральна компонента (I). Інтегральна компонента враховує кумулятивну помилку з часом. Вона допомагає зменшити статичні похибки.

Обчислення інтегральної компоненти для кожного датчика, додавши кумулятивну помилку до поточного значення;

– диференціальна компонента (D). Диференціальна компонента враховує швидкість зміни помилки з часом. Вона допомагає зменшити перехідні процеси та уникнути перевищення цільового значення. Обчислення диференціальної компоненти для кожного датчика, взявши різницю поточної та попередньої помилки;

– керування серводвигунами, обчислення суми пропорційної, інтегральної та диференціальної компонент для кожного серводвигуна.

Застосування цих значень як кути повороту для кожного серводвигуна, використовуючи функцію `servo.write()`. Необхідно впевнитися, що кути повороту знаходяться в межах допустимого діапазону для серводвигунів. Для обраних серводвигунів 6CH RC SG90 він знаходиться в межах $0^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$;

– оновлення позиції. Продовження циклічного оновлення позиції сонячних панелей, зчитуючи дані з датчиків, обчислюючи компоненти PID та керуючи серводвигунами відповідно до виходу алгоритму PID.

З цим методом PID-керування сонячні панелі будуть постійно позиціонуватися таким чином, щоб максимально збирати сонячну енергію в залежності від освітленості в навколишньому середовищі. Налаштування коефіцієнтів P, I та D для оптимальної реакції системи на зміни освітленості розраховано в 2 розділі, та досягнення бажаних результатів потрібно провести коригування на розробленому макеті. Загальний алгоритм роботи системи керування позиціонуванням сонячних панелей (класичний підхід) представлено на рисунку 3.1.

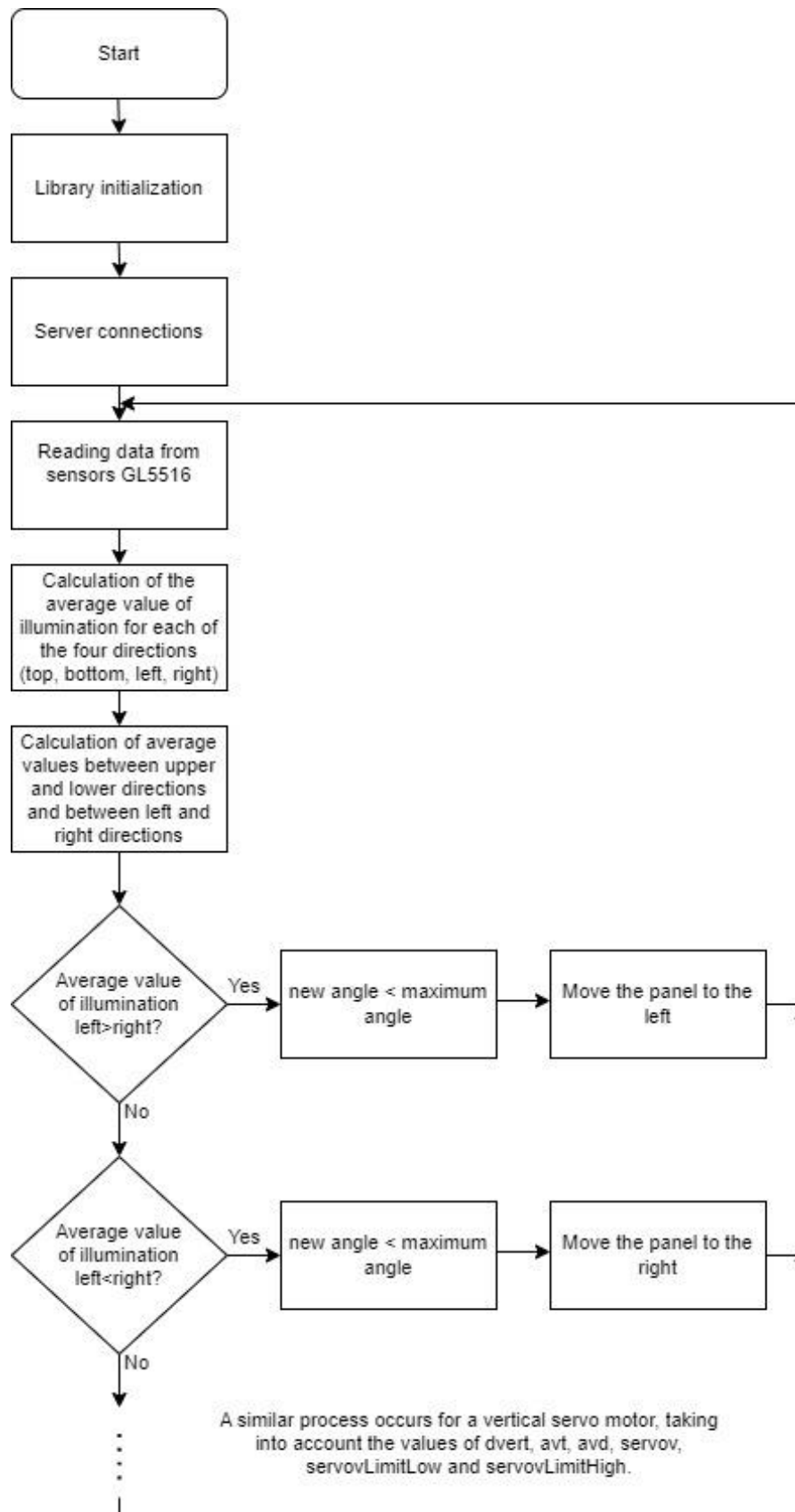


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм роботи системи керування позиціонуванням сонячних панелей (класичний підхід)

3.3 Розробка функцій розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості (класичний підхід)

Класичний підхід до розрахунку положення сонячних панелей на основі даних з датчиків освітленості можна реалізувати за допомогою простої логіки та обчислень. Для цього можна створити функції, які зчитують дані з датчиків, обчислюють різницю освітленості та виконують керування позиціонуванням сонячних панелей.

На першому кроці виконується зчитування значень з чотирьох аналогових датчиків освітленості, підключених до плати Arduino.

```
int lt = analogRead(ldr1t); // top left
int rt = analogRead(ldr1r); // top right
int ld = analogRead(ldr2l); // down left
int rd = analogRead(ldr2r); // down right
```

У даному фрагменті коду, де:

- lt (left top) – зчитує значення з датчика освітленості, розташованого у верхньому лівому куті;
- rt (right top) – зчитує значення з датчика освітленості, розташованого у верхньому правому куті;
- ld (left down) – зчитує значення з датчика освітленості, розташованого у нижньому лівому куті;
- rd (right down) – зчитує значення з датчика освітленості, розташованого у нижньому правому куті.

Кожне зі значень зчитується за допомогою функції `analogRead()`, яка зчитує аналогове значення з певного піна, що вказаний у змінних `ldr1t`, `ldr1r`, `ldr2l` і `ldr2r`.

Значення, отримані з цих датчиків, потім використовуються для подальшого аналізу та прийняття рішень в алгоритмі керування позиціонуванням сонячних панелей.

Далі проводяться обчислення середніх значень освітленості для кожного з чотирьох напрямків (верх, низ, ліво, право) на основі зчитаних значень з датчиків.

```
int avt = (lt + rt) / 2; // average value top
int avd = (ld + rd) / 2; // average value down
int avl = (lt + ld) / 2; // average value left
int avr = (rt + rd) / 2; // average value right
```

Де змінні:

– avt (average value top) – це середнє значення освітленості для верхньої сторони, яке обчислюється як середнє арифметичне між значеннями lt (верхній лівий кут) та rt (верхній правий кут);

– avd (average value down) – це середнє значення освітленості для нижньої сторони, яке обчислюється як середнє арифметичне між значеннями ld (нижній лівий кут) та rd (нижній правий кут);

– avl (average value left) – це середнє значення освітленості для лівої сторони, яке обчислюється як середнє арифметичне між значеннями lt (верхній лівий кут) та ld (нижній лівий кут);

– avr (average value right) – це середнє значення освітленості для правої сторони, яке обчислюється як середнє арифметичне між значеннями rt (верхній правий кут) та rd (нижній правий кут).

Отримані середні значення освітленості можуть бути використані для подальшого аналізу та прийняття рішень в алгоритмі керування позиціонуванням сонячних панелей. Зазвичай, ці середні значення використовуються для визначення напрямку до джерела світла і налаштування панелей так, щоб вони знаходилися в оптимальному положенні для максимального отримання сонячної енергії.

Далі проведемо обчислення різниці у значеннях середніх освітленостей між верхнім та нижнім напрямками (dvert) та між лівим та правим

напрямами (dhoriz). Ці різниці потім використовуються для подальшого прийняття рішень у алгоритмі керування позиціонуванням сонячних панелей.

```
int dvert = abs(avt - avd); // check the diffirence of up and down
```

```
int dhoriz = abs(avl - avr); // check the diffirence of left and right
```

Де змінні:

- dvert (difference vertical) – це абсолютне значення різниці між avt (середнє значення верхніх датчиків) та avd (середнє значення нижніх датчиків). Це допомагає визначити різницю в освітленості між верхом і низом, що може вказувати на напрямок до джерела світла;

- dhoriz (difference horizontal) – це абсолютне значення різниці між avl (середнє значення лівих датчиків) та avr (середнє значення правих датчиків). Це допомагає визначити різницю в освітленості між ліворуч і праворуч, що також може вказувати на напрямок до джерела світла.

Обчислені значення dvert та dhoriz далі використовуються для прийняття рішень про те, як рухати серводвигуни, щоб забезпечити оптимальне позиціонування сонячних панелей в напрямку джерела світла.

На базі отриманих даних проводиться керування позиціонуванням сонячних панелей за допомогою двох серводвигунів 6CH RC SG90 (horizontal і vertical) на основі показників освітленості, які були обчислені раніше.

```
if (dhoriz > tol)
{
  if (avl > avr)
  {
    if (servoh - 1 >= servohLimitLow) servoh--;
    else beep(150);
  }
  else if (avl < avr)
  {
    if (servoh + 1 <= servohLimitHigh) servoh++;
```

```

    else beep(150);
  }
  horizontal.write(servoh);
}
if (dvert > tol)
{
  if (avt > avd)
  {
    if (servov + 1 <= servovLimitHigh) servov++;
    else beep(100);
  }
  else if (avt < avd)
  {
    if (servov - 1 >= servovLimitLow) servov--;
    else beep(100);
  }
  vertical.write(servov);
}

```

Умова `if (dhoriz > tol)` перевіряє, чи різниця між середніми значеннями освітленості ліворуч і праворуч (`dhoriz`) перевищує задане порогове значення `tol`. Якщо так, то виконується блок коду всередині цієї умови.

Умова `if (avl > avr)` порівнює середнє значення освітленості ліворуч (`avl`) і праворуч (`avr`). Якщо значення `avl` більше `avr`, це означає, що датчики освітленості зліва більше освітлені, ніж справа, тому панелі потрібно рухати вліво.

Якщо `servoh - 1 >= servohLimitLow`, то виконується зменшення кута повороту `servoh` горизонтального серводвигуна на одиницю (`servoh--`). Це перевіряє, чи новий кут не виходить за межі допустимого діапазону, визначеного змінними `servohLimitLow` і `servohLimitHigh`.

Якщо нове значення `servoh` в межах допустимого діапазону, тоді виконується команда `horizontal.write(servoh)`, яка встановлює горизонтальний серводвигун в нове положення.

Умова `if (avl < avr)` порівнює середнє значення освітленості ліворуч (`avl`) і праворуч (`avr`). Якщо значення `avl` менше `avr`, це означає, що датчики освітленості справа більше освітлені, ніж зліва, тому панелі потрібно рухати вправо.

Якщо `servoh + 1 <= servohLimitHigh`, то виконується збільшення кута повороту `servoh` горизонтального серводвигуна на одиницю (`servoh++`). Це перевіряє, чи новий кут не виходить за межі допустимого діапазону.

Якщо нове значення `servoh` в межах допустимого діапазону, тоді виконується команда `horizontal.write(servoh)`, яка встановлює горизонтальний серводвигун в нове положення.

Аналогічний процес відбувається для вертикального серводвигуна (`vertical`), з урахуванням значень `dvert`, `avt`, `avd`, `servov`, `servovLimitLow` і `servovLimitHigh`.

3.4 Розробка функцій розрахунку позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора

Для реалізації позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора, потрібно створити функцію, яка буде обчислювати керуючий сигнал за допомогою алгоритму PID. Основними компонентами цієї функції будуть обчислення помилки, інтегралу та похідної, використання PID-коефіцієнтів та обмеження керуючого сигналу. Формули для теоретичного розрахунку приведені у 2 розділі даної атестаційної роботи.

На першому кроці вкажемо теоретичні параметри: `kp` (пропорційний коефіцієнт), `ki` (інтегральний коефіцієнт) та `kd` (диференційний коефіцієнт).

```
// PID parameters
```

```
double kp = 1.2; // Proportional gain
```

```
double ki = 1.0; // Integral gain
```

```
double kd = 0.8; // Derivative gain
```

Де змінні:

– k_p (пропорційний коефіцієнт) визначає, як сильно реагує алгоритм на поточну помилку. Збільшення k_p зробить систему більш чутливою до помилки, але може також призвести до більших коливань або навіть нестійкості;

– k_i (інтегральний коефіцієнт) визначає, як довго алгоритм буде "пам'ятати" попередні помилки і накопичувати їх в часі. Велике значення k_i допомагає зменшити залишкові помилки, але може спричинити підсилення інстабільності або затримки в системі;

– k_d (диференційний коефіцієнт) визначає, як швидко алгоритм реагує на зміну помилки. Диференціальний член допомагає запобігти занадто швидкому реагуванню на зміни, які можуть призвести до коливань. Значення k_d звичайно менше, ніж k_p та k_i .

Значення параметрів PID дуже залежать від конкретної системи та умов. Найкращий підхід – експериментально налаштувати ці параметри, спостерігаючи, як система реагує на різні значення. Для цього можна використовувати різні значення k_p , k_i та k_d , і спостерігати за реакцією системи на різні збурення та зміни. Поступово налаштовуючи параметри, можна досягти стабільного та оптимального керування позиціонуванням сонячних панелей.

Далі оголошуються змінні, які використовуються для зберігання інформації про попередні стани системи (помилки та інтегрального члена) в алгоритмі PID для керування горизонтальним та вертикальним позиціонуванням сонячних панелей.

```
double previous_error_horizontal = 0;
```

```
double integral_horizontal = 0;
```

```
double previous_error_vertical = 0;
```

```
double integral_vertical = 0;
```

Де змінні:

– `previous_error_horizontal` – це змінна, яка зберігає значення помилки (різницю між заданим значенням `setpoint_horizontal` і виміряною позицією панелі) з попереднього кроку циклу алгоритму PID. Це допомагає обчислити диференціальний член алгоритму, так як він базується на зміні помилки з часом;

– `integral_horizontal` – це змінна, яка зберігає суму помилок протягом часу роботи алгоритму. Вона використовується для обчислення інтегрального члена алгоритму, який компенсує залишкові помилки і допомагає системі знаходити точне позиціонування;

Такі самі змінні існують і для вертикального позиціонування:

– `previous_error_vertical` – попередня помилка вертикального позиціонування;

– `integral_vertical` – інтегральний член для вертикального позиціонування.

Ці змінні допомагають зберігати і використовувати історичну інформацію про помилки та інтегральний член, щоб здійснювати коректне керування позиціонуванням сонячних панелей, враховуючи їх минулі стани та збурення.

Далі проводимо обчислення значень помилок для горизонтального та вертикального позиціонування сонячних панелей. Помилки визначаються як різниця між заданим значенням `setpoint_horizontal` (горизонтальна позиція, яку потрібно досягти) та виміряною освітленістю від датчиків у відповідних напрямках.

```
double error_horizontal = setpoint_horizontal - avt + avd;
```

```
double error_vertical = setpoint_vertical - avl + avr;
```

Де `setpoint_horizontal` – це задане значення горизонтальної позиції, до якої алгоритм PID намагається позиціонувати сонячні панелі;

– `avt` – це середнє значення освітленості верхніх датчиків.

– `avd` – це середнє значення освітленості нижніх датчиків.

– `error_horizontal` – це значення помилки для горизонтального позиціонування. Воно визначається як різниця між заданим значенням горизонтальної позиції `setpoint_horizontal` і середнім значенням освітленості у верхніх та нижніх датчиків.

Аналогічно, значення помилки для вертикального позиціонування (`error_vertical`) обчислюється як різниця між заданим значенням вертикальної позиції (`setpoint_vertical`) і середнім значенням освітленості у лівих та правих датчиків (`avl` і `avr`).

Ці помилки використовуються далі в алгоритмі PID для обчислення вихідних сигналів, які впливатимуть на керування горизонтальним і вертикальним серводвигунами так, щоб позиціонування сонячних панелей відповідало заданим значенням (`setpoint_horizontal` і `setpoint_vertical`).

На базі отриманих даних проведемо обчислення коефіцієнтів пропорційності, інтегралу та диференціації (PID-терми) для горизонтального і вертикального позиціонування сонячних панелей. Після обчислення PID-термів вони складаються, утворюючи вихідний сигнал `pid_output_horizontal` для горизонтального серводвигуна та `pid_output_vertical` для вертикального серводвигуна.

```
// Calculate PID terms
double p_term_horizontal = kp * error_horizontal;
double i_term_horizontal = ki * integral_horizontal;
double d_term_horizontal = kd * (error_horizontal -
previous_error_horizontal);
double pid_output_horizontal = p_term_horizontal + i_term_horizontal +
d_term_horizontal;
```

```

double p_term_vertical = kp * error_vertical;
double i_term_vertical = ki * integral_vertical;
double d_term_vertical = kd * (error_vertical - previous_error_vertical);
double pid_output_vertical = p_term_vertical + i_term_vertical +
d_term_vertical;

```

Де змінні:

- `p_term_horizontal` – пропорційний член для горизонтального позиціонування. Він обчислюється множенням помилки горизонтального позиціонування `error_horizontal` на пропорційний коефіцієнт `kp`. Це частка помилки, яка призводить до миттєвого коригування позиції панелей;

- `i_term_horizontal` – інтегральний член для горизонтального позиціонування. Він обчислюється множенням накопиченої суми помилок `integral_horizontal` на інтегральний коефіцієнт `ki`. Інтегральний член допомагає компенсувати залишкові помилки, які можуть виникати при пропорційному регулюванні, і дозволяє системі плавно зближуватися до заданої позиції;

- `d_term_horizontal` – диференціальний член для горизонтального позиціонування. Він обчислює різницю помилок горизонтального позиціонування `error_horizontal` між поточним і попереднім кроком алгоритму та множить її на диференціальний коефіцієнт `kd`. Диференціальний член використовується для зменшення перереагування системи на зміни та допомагає підтримувати стабільність;

- `pid_output_horizontal` – вихідний сигнал для горизонтального серводвигуна. Він утворюється сумуванням пропорційного, інтегрального та диференціального членів і представляє зміщення, яке необхідно внести в позиціонування горизонтального серводвигуна, щоб забезпечити вирівнювання панелей.

Аналогічно, обчислюються такі ж PID-терми для вертикального позиціонування у фрагменті коду, але з використанням змінних, що відповідають за вертикальне позиціонування та інтегральний член для вертикального напрямку.

На останньому кроці здійснюється оновлення значень попередніх помилок та інтегральних членів для горизонтального та вертикального позиціонування сонячних панелей.

```
// Update previous errors and integral terms
previous_error_horizontal = error_horizontal;
integral_horizontal += error_horizontal;
previous_error_vertical = error_vertical;
integral_vertical += error_vertical;
```

Де:

- `previous_error_horizontal` – оновлення попередньої помилки горизонтального позиціонування. Значення змінної `previous_error_horizontal` оновлюється теперішнім значенням `error_horizontal`, тобто зберігається поточна помилка, щоб використовувати її на наступному кроці алгоритму як попередню помилку;

- `integral_horizontal` – оновлення інтегрального члена для горизонтального позиціонування. Значення змінної `integral_horizontal` збільшується на поточне значення `error_horizontal`. Це допомагає накопичувати суму помилок з часом, що використовується для компенсації залишкових помилок і допомагає системі краще досягати заданої позиції з часом.

Такі самі оновлення також здійснюються для вертикального позиціонування:

- `previous_error_vertical` – оновлення попередньої помилки вертикального позиціонування.

– `integral_vertical` – оновлення інтегрального члена для вертикального позиціонування.

Ці кроки оновлення допомагають зберігати поточні стани системи та змінювати їх з кожним кроком алгоритму PID, забезпечуючи ефективне та точне керування позиціонуванням сонячних панелей.

3.5 Висновки до 3 розділу

В даному розділі було проведено аналіз декількох популярних середовищ розробки для Arduino Uno та обрано Arduino IDE. Розробка загального алгоритму керування позиціонуванням сонячних панелей та на його базі розроблена та описана програмна функція розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості (класичний підхід) та розроблена й описана програмна функція позиціонування сонячних панелей на базі PID-регулятора.

Обидва запропонованих підходи, класичний підхід з використанням різниці даних з датчиків освітленості та система керування на базі PID-регулятора, можуть бути ефективними для позиціонування сонячних панелей, але мають свої переваги та недоліки.

Класичний підхід з використанням різниці даних з датчиків освітленості.

Переваги: простота реалізації, класичний підхід може бути реалізований без застосування складних алгоритмів, що робить його легким у виконанні та зрозумілим для розробників. Ефективність, він може бути ефективним для базових задач позиціонування, особливо якщо датчики освітленості добре взаємодіють з позиціонуванням сонячних панелей.

Недоліки: відсутність реакції на зміни у системі, класичний підхід може не дозволяти системі адаптуватися до змін в умовах довкілля або

системи. Недостатня точність, без використання додаткових управляючих алгоритмів може бути складно досягти високої точності позиціонування.

Система керування на базі PID-регулятора.

Переваги: адаптивність, PID-регулятор може адаптуватися до змін у системі та довкіллі, що дозволяє зберігати точне позиціонування сонячних панелей навіть при змінах у сонячному світлі. Висока точність, PID-регулятор дозволяє досягти високої точності позиціонування за допомогою використання пропорційного, інтегрального та диференціального керування.

Недоліки: складність налаштування, PID-регулятор потребує налаштування параметрів k_p , k_i та k_d , що може бути складним процесом. Залежність від датчиків, правильне функціонування PID-регулятора залежить від якості та точності датчиків освітленості.

Взагалі, система керування на базі PID-регулятора зазвичай вважається більш точним та адаптивним рішенням для позиціонування сонячних панелей, але вона також може бути складнішою для реалізації та налаштування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Постановка задач експериментів

Дослідження впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю може бути цікавим та корисним експериментом. Для проведення такого дослідження, розроблено лабораторний стенд, який представлено на рисунку 4.1, буде розміщено під різними кутами відносно сонячних променів та за допомогою модулів датчиків GL5516 та PID-регуляторів.

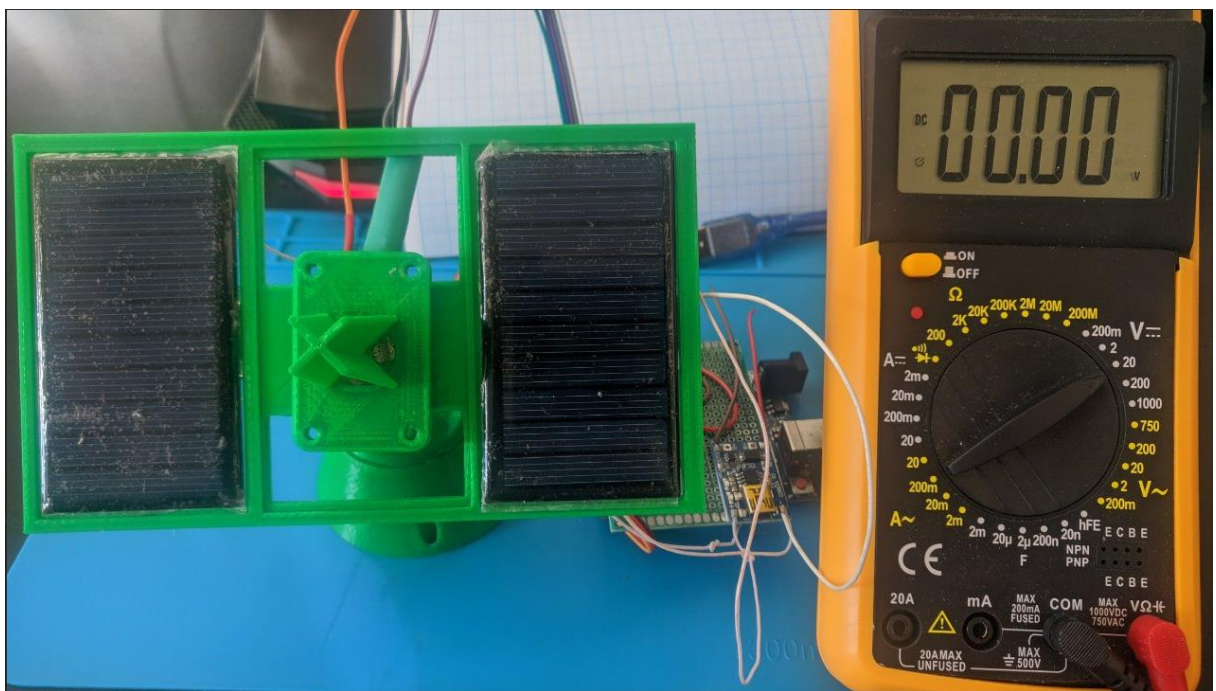


Рисунок 4.1 – Лабораторний стенд для проведення досліджень впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю

Постановка задач для дослідження:

– вплив кута на вироблення енергії: Розмістіть макет сонячної панелі під різними кутами відносно сонячних променів, наприклад, під кутами 0° ,

30°, 60°, 90° і т.д. Зберігайте вироблену енергію протягом певного періоду часу для кожного кута. Провести порівняння результатів та з'ясуйте, який кут максимально ефективний для вироблення енергії;

– вплив інтенсивності світла: Досліджуйте, як інтенсивність сонячного світла впливає на вироблення енергії. Під час проведення дослідження макет сонячної панелі буде розміщено під різними кутами та виміряно вироблену енергію при різних рівнях інтенсивності світла, наприклад, в різних погодних умовах або в різний час дня;

– захищеність від тіней: вивчайте, як тіні впливають на ефективність сонячних панелей (% затемнення). Розмістіть макет під різними кутами та спостерігайте, які тіні утворюються на панелях в різний час дня. Вимірюйте вироблену енергію та встановіть, як тіні впливають на вироблення енергії.

4.2 Проведення досліджень та аналіз отриманих результатів

Мета першого експерименту: вплив кута на вироблення енергії. Розмістіть макет сонячної панелі під різними кутами відносно сонячних променів, наприклад, під кутами 0°, 30°, 60°, 90° і т.д. Зберігайте вироблену енергію протягом певного періоду часу для кожного кута. Провести порівняння результатів та з'ясуйте, який кут максимально ефективний для вироблення енергії.

Умови проведення експерименту: 2 сонячні панелі, сонячна сторона протягом доби, місцезнаходження протягом 24 години – const, перешкода – склопакет (3 камерний).

Результати проведення першого дослідження, в якості програми для вимірювання інтенсивності освітлювання використовується програма Light Sensor Lux Meter (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.artds.lightsensor.meter.pv>),

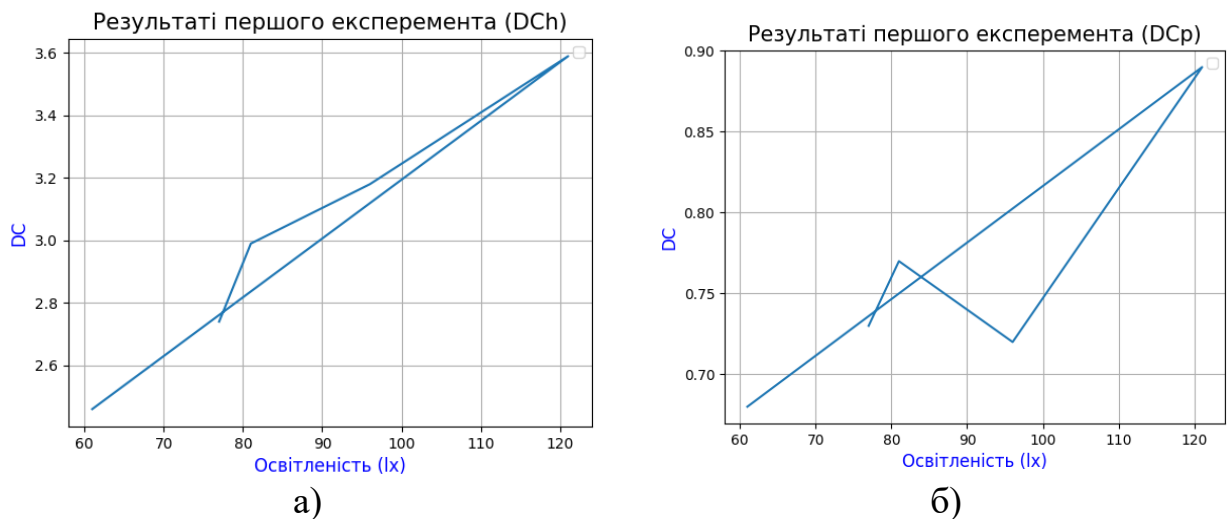
для визначення DC (V_h) – холостого доступу (з панелей) та DC (V_p) – корисна (на виході модуля TP4058) – мультиметр DT9205A (рис. 4.1).

Перший експеримент (2 сонячні панелі) проведемо в темному приміщенні, з системою захисту від прямих променів, результати дослідження представлені в таблиці 4.1. Де обозначимо через: DC (V_h) – холостого доступу (з панелей), DC (V_p) – корисна (на виході модуля TP4058).

Таблиця 4.1 – Результати першого експеримента (дата: 24.07.2023)

Кут (α)	Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
0^0	61	2,46 В	0,68 В
30^0	121	3,59 В	0,89 В
45^0	96	3,18 В	0,72 В
60^0	81	2,99 В	0,77 В
90^0	77	2,74 В	0,73 В

Відповідно, для зручності аналіз отриманих даних представимо у вигляді графіків на рисунку 4.2.



а) відношення яскравості освітленість (lx) та DC (V_h);

б) відношення яскравості освітленість (lx) та DC (V_p);

Рисунок 4.2 – Результати першого експеримента

Другий експеримент (2 сонячні панелі) проведемо в приміщенні, але на сонячній стороні, з перешкодою (склопакет), отримані результати представлені в таблиці 4.2. Де визначимо через DC (V_h) – холостий доступ (з панелей), DC (V_p) – корисна (на виході модуля TP4058).

Таблиця 4.2 – Результати другого експеримента (дата: 24.07.2023)

Кут (α)	Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
0°	32767	5,53 В	4,43 В
30°	32767	5,61 В	4,64 В
45°	32767	5,25 В	4,23 В
60°	32767	5,68 В	4,71 В
90°	32767	5,75 В	4,80 В

Відповідно, для зручності аналіз отриманих даних представимо у вигляді графіків на рисунку 4.3.

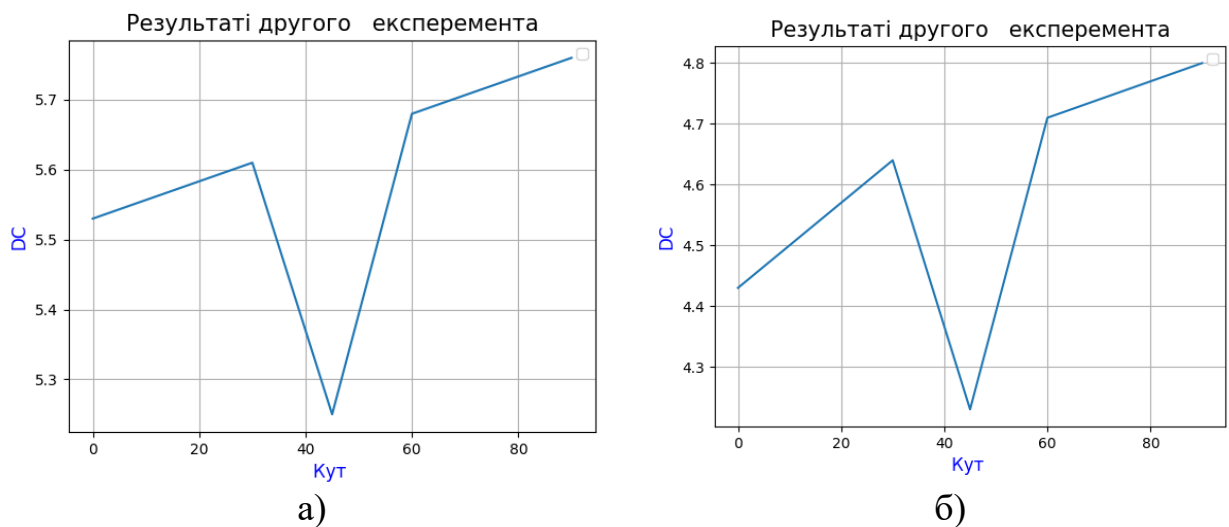


Рисунок 4.3 – Результати другого експеримента

Третій експеримент – це дослідження вироблення енергії протягом сонячної доби, при різних кутах нахилу (2 сонячні панелі) та різних

інтенсивності освітленості в домі (через скло). Результати дослідження приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати третього експеримента (дата: 25.07.2023)

Час	Кут (α)	Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
7.00	0^0	32567	5,55 В	4,12 В
	30^0		5,58 В	4,13 В
	45^0		5,51 В	4,13 В
	60^0		5,42 В	4,13 В
	90^0		4,73 В	4,16 В
10.00	0^0	28510	5,08 В	4,16 В
	30^0		5,15 В	4,17 В
	45^0		5,52 В	4,13 В
	60^0		5,28 В	4,12 В
	90^0		5,04 В	4,12 В
13.00	0^0	32567	5,32 В	4,14 В
	30^0		5,39 В	4,12 В
	45^0		5,62 В	4,13 В
	60^0		5,38 В	4,13 В
	90^0		5,44 В	4,12 В
16.00	0^0	31370	5,22 В	4,14 В
	30^0		5,22 В	4,14 В
	45^0		5,22 В	4,13 В
	60^0		5,14 В	4,12 В
	90^0		4,95 В	4,11 В
19.00	0^0	26786	5,01 В	4,10 В
	30^0		5,13 В	4,11 В
	45^0		5,09 В	4,11 В
	60^0		4,89 В	4,11 В
	90^0		4,92 В	4,11 В

Четвертий експеримент – це дослідження вироблення енергії протягом сонячної доби, при різних кутах нахилу (2 сонячні панелі) та різній інтенсивності освітленості на вулиці. Позиціонування системи керування на сонці за допомогою PID – регулятора (оптимальний кут). Результати дослідження приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати четвертого експеримента

Час	Кут (α)	Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
7.00	0^0	29874	5,08 В	4,11 В
	30^0		5,15 В	4,13 В
	45^0		5,52 В	4,13 В
	60^0		5,28 В	4,14 В
	90^0		5,04 В	4,12 В
10.00	0^0	32567	5,32 В	4,12 В
	30^0		5,39 В	4,13 В
	45^0		5,62 В	4,14 В
	60^0		5,38 В	4,13 В
	90^0		5,44 В	4,14 В
13.00	0^0	32567	5,38 В	4,13 В
	30^0		5,39 В	4,13 В
	45^0		5,38 В	4,13 В
	60^0		5,39 В	4,13 В
	90^0		5,44 В	4,14 В
16.00	0^0	32567	5,32 В	4,13 В
	30^0		5,39 В	4,13 В
	45^0		5,62 В	4,14 В
	60^0		5,38 В	4,12 В
	90^0		5,44 В	4,13 В
19.00	0^0	28453	5,01 В	4,11 В
	30^0		5,00 В	4,11 В
	45^0		5,13 В	4,12 В
	60^0		5,09 В	4,11 В
	90^0		4,89 В	4,12 В

Мета другого експерименту: вплив інтенсивності світла. Досліджуйте, як інтенсивність сонячного світла впливає на вироблення енергії (2 сонячні панелі). Під час проведення дослідження макет сонячної панелі буде розміщено під різними кутами та виміряно вироблену енергію при різних рівнях інтенсивності світла, наприклад, в різних погодних умовах або в різний час дня.

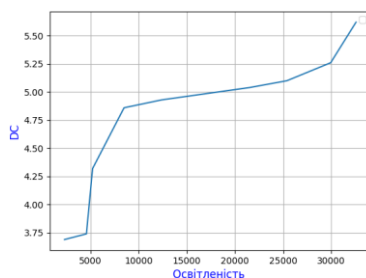
Умови проведення експерименту: 2 сонячні панелі, різні години доби, орієнтація на сонце за допомогою PID-регуляторів (оптимальний кут).

В якості програми для вимірювання інтенсивності освітлювання використовується програма Light Sensor Lux Meter (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.artds.lightsensor.meter.pv>), для визначення DC (V_h) – холостого доступу (з панелей) та DC (V_p) – корисна (на виході модуля TP4058) – мультиметр DT9205A (рис.4.1). Отримані результати приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати дослідження впливу інтенсивності освітлення на вироблення енергії (2 сонячні панелі)

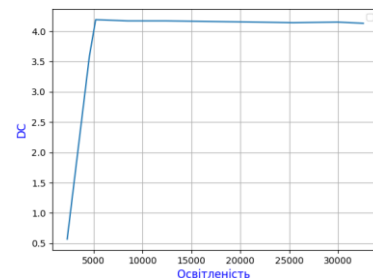
Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
2306	3,69 В	0,57 В
4580	3,74 В	3,59 В
5218	4,32 В	4,19 В
8487	4,86 В	4,17 В
12386	4,93 В	4,17 В
21456	5,04 В	4,15 В
25387	5,10 В	4,14 В
29937	5,26 В	4,15 В
32567	5,62 В	4,13 В

Відповідно, для зручності аналіз отриманих даних представимо у вигляді графіків на рисунку 4.4.



а)

а) відношення інтенсивності освітлення на вироблення DC (V_h);



б)

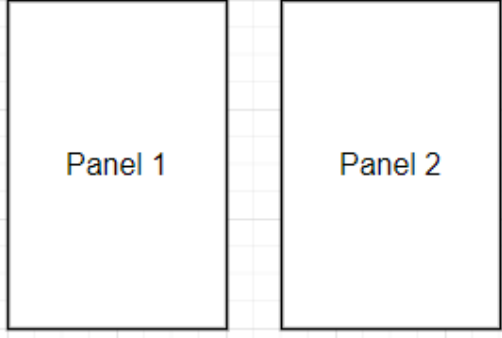
б) відношення інтенсивності освітлення на вироблення DC (V_p);

Рисунок 4.4 – Результати дослідження впливу інтенсивності освітлення на вироблення енергії (2 сонячні панелі)

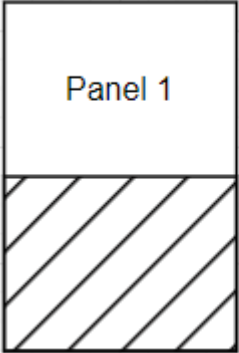

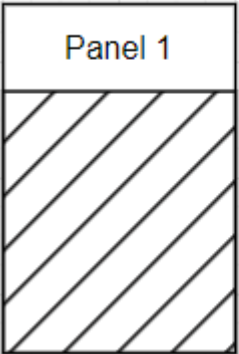


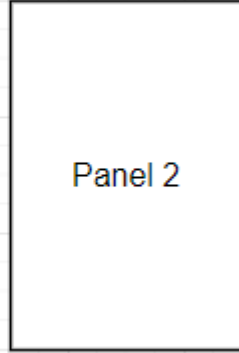
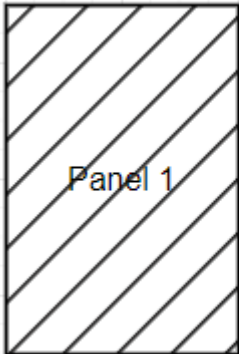
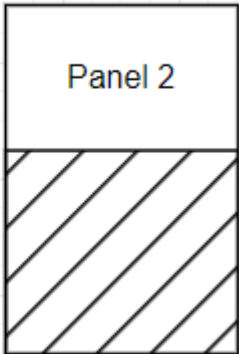
Мета третього експерименту: захищеність від тіней: вивчайте, як тіні впливають на ефективність сонячних панелей (% затемнення). Розмістіть макет під різними кутами та спостерігайте, які тіні утворюються на панелях в різний час дня. Вимірюйте вироблену енергію та встановіть, як тіні впливають на вироблення енергії.

Умови проведення експерименту: 2 сонячні панелі, орієнтація на сонце за допомогою PID-регуляторів (оптимальний кут). Провести моделювання впливу тіней, на ефективність сонячних панелей за допомогою збільшення % затемнення. У вигляді затемнення буде використовуватися картонка. В якості програми для вимірювання інтенсивності освітлювання використовується програма **Light Sensor Lux Meter** (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.artds.lightsensor.meter.pv>), для визначення DC (V_h) – холостого доступу (з панелей) та DC (V_p) – корисна (на виході модуля TP4058) – мультиметр DT9205A (рис.4.1). Отримані результати приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати дослідження впливу тіні на ефективність сонячних панелей (% затемнення)

Затемнення	Освітленість (lx)	DC (V_h)	DC (V_p)
1	2	3	4
	32767	5,62 В	4,12 В

Продовження таблиці 4.6

1			3	4
			5,36 B	4,13 B
			5,38 B	4,13 B
			5,37 B	4,13 B
			4,3 B	3,7 B

4.3 Розрахунок освітлення

Освітленість є важливим параметром для дослідження впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю. Під час проведення експериментальних досліджень у лабораторії, слід дотримуватись деяких правил:

- дотримання норм освітленості згідно із встановленими стандартами (наприклад, DIN 5035 чи інші міжнародні норми), які рекомендуються для лабораторних досліджень та робіт із сонячною енергією;
- розташування експериментального обладнання (сонячних панелей, датчиків) таким чином, щоб забезпечити оптимальний доступ сонячних променів та рівномірну освітленість;
- застосування природного світла та корекційних фільтрів для забезпечення адекватної імітації сонячного випромінювання;
- врахування впливу зовнішніх факторів (погодних умов, атмосферних явищ) на освітленість та розрахунки компенсаційних коефіцієнтів;
- проведення метрологічної валідації вимірювань освітленості для забезпечення точності та достовірності отриманих даних;
- забезпечення безпечних умов праці, уникання враження робочого персоналу агресивним сонячним випромінюванням шляхом використання захисного обладнання та організації робочих місць;
- систематичний збір та аналіз отриманих даних про освітленість для подальшого висновку щодо впливу кута падіння сонячних променів на ефективність сонячних панелей;
- детальне ведення протоколів експериментів, включаючи параметри освітленості, умови досліджень, та всі необхідні розрахунки;
- освітлення в приміщенні. Для розрахунку штучної освітленості використовується метод питомої потужності.

Для проведення розрахунків оптимального освітлення приміщення потрібно враховувати кілька ключових параметрів. Запишемо вихідні дані:

- площа приміщення A : 50 м^2 ;
- коефіцієнт віддзеркалення стін і стелі R : $0,8$ (для типових покриттів і матеріалів у приміщенні);
- освітленість E : 500 люксів (рекомендована значення для робочих приміщень).

Визначимо потрібну світлову потужність P , використовуючи співвідношення:

$$P = A \cdot E / R \quad (4.1)$$

$$P = 50 \cdot 500 / 0,8 = 31,25 \text{ люмен}$$

Це дає нам потрібну світлову потужність у люменах для заданої площі приміщення та рекомендованої освітленості [14].

4.4 Висновки до 4 розділу

В ході виконання 4 розділу кваліфікаційної роботи магістра, було розроблено лабораторний стенд для проведення досліджень впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії сонячною панеллю. Проведено постановку задач для досліджень.

Мета першого експерименту – вплив кута на вироблення енергії. Було розміщено макет сонячної панелі під різними кутами відносно сонячних променів, наприклад, під кутами 0° , 30° , 60° , 90° і т.д., проведено порівняння результатів та з'ясовано максимально ефективний кут для вироблення енергії;

Мета другого експерименту – вплив інтенсивності світла. Було досліджено як інтенсивність сонячного світла впливає на вироблення енергії.

Макет сонячної панелі було розміщено під різними кутами та виміряно вироблену енергію при різних рівнях інтенсивності світла, наприклад, в різних погодних умовах або в різний час дня.

Мета третього експерименту – захищеність від тіней. Проаналізовано як тіні впливають на ефективність сонячних панелей. Розміщено макет під різними кутами та відстежено, які тіні утворюються на панелях в різний час дня. Виміряно вироблену енергію та встановлено, як тіні впливають на вироблення енергії.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз методів керування положенням сонячних панелей, проаналізовано методи розрахунку та позиціонування сонячних панелей та проведено аналіз залежностей впливу кута падіння сонячних променів на вироблення енергії. На основі проведеного аналізу було розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням сонячних панелей, проаналізовано та обрано апаратні модулі.

Далі було розроблено слідкуючу систему керування, цифрову систему регулювання положення серводвигуна та схему підключення. Розроблено 3D моделі макета, проведено збірку макета системи позиціонування сонячних панелей. Наступним етапом було обрано середовище розробки, розроблено алгоритм керування позиціонуванням сонячних панелей, розроблено функції розрахунку положення сонячних панелей за рахунок різниці даних з датчиків освітленості, розроблено функції розрахунку положення сонячних панелей на базі PID-регулятора. Заключним етапом було проведено дослідження та аналіз отриманих результатів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320с.

3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами»; «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов Р. В. Артюх В. В. Безкоровайний Н. П. Демська В. В. Євсєєв О. І. Филипенко О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

4. Реука Є. Розробка структурної схеми PID-контролера для керування позиціонування сонячної панелі для автономних мобільних роботів / Є. Реука // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023: Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – Part 1. –336р. Р. 100-104.

5. Моркун, Н., & Хома, Д. (2022). Метод автоматичного керування положенням сонячної панелі. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (4), 105-107.

6. Мартинюк, В., & Гребінчук, А. (2022). Метод керування оптимізатором сонячної панелі. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (4), 77-80.

7. Головань М. М. Система автоматичного позиціонування сонячних панелей / М. М. Головань, Н. В. Здолбіцька // Інформаційні технології і автоматизація–2020: зб. доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 22–23 жовт. 2020 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій, Інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П. М. Платонова; орг. ком.: Б. В. Єгоров (голова) та ін. – Одеса, 2020. – С. 284–286: рис. – Бібліогр.: 5 назв.

8. Мальцев А. Р. Система автоматичного позиціонування сонячних панелей: пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка / А. Р. Мальцев; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2019. – 97 с.

9. Butenko, O., Zvyaschenko, K., Buravchenko, K., & Nikitin, A. (2019). Оптимізація процесу вибору місця розташування сонячних електростанцій з використанням ГІС-аналізу. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(53), 17-21.

10. Ошицький К. О. Інтелектуальна автоматична система орієнтування сонячних батарей нестационарної енергетичної установки: дипломна робота магістра за спеціальністю „141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“ / К. О. Кошицький. – Тернопіль: ТНТУ, 2020. – 80 с.

11. Датчик освітленості GL5516 // ARDUINO.UA, 2023. URL: <https://arduino.ua/ua/prod184-datchik-osveshhenosti-fotorezistor> (дата звернення : 15.08.2023).

12. KY-018 Модуль з фоторезистором // Мій проект, 2023. URL: https://myproject.com.ua/ky018modulsfotorezistoromua.html?gclid=CjwKCAjws9ipBhB1EiwAccEi1GH01o31Oam5kD5RrRAyCGWLJwkBIuZasmYZ7Zlfbvo688IXM10CEBoCWjEQAvD_VwE (дата звернення : 15.08.2023).

13. Модуль з фоторезистором цифровий // ROBOSTORE, 2023. URL: <https://www.robostore.com.ua/moduli-i-datchiki/datchiki-osveshennosti/modul-s-fotorezistorom-cifrovoj/> (дата звернення : 15.08.2023).

14. Охорона праці в офісі. Вимоги до робочого місця офісного працівника // Сайт ГСС. URL: <https://гс.ua/uk/охорона-праці-в-офісі-вимоги-до-робочого-місця-офісного-працівника/> (дата звернення: 29.12.2023).