

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВЕТЕРЕНАРНОЇ МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ
ІМ.СТЕПАНА ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

на тему: «Автоматизація системи керування сонячним трекером
для підвищення ефективності генерування електроенергії»

Виконав: студент групи АКТ 42 сп

Гнатишин Максим Романович

Науковий керівник

к.ф-м н., в.о. доц. Чухрай Л.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище
та ініціали)

Дубляни-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРЕНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ.СТЕПАНА ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
ОС «Бакалавр» за спеціальністю – 174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба “_25_” __02____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Гнатишин Максим Романович

Тема роботи «Автоматизація системи керування сонячним трекером для
підвищення ефективності генерування електроенергії»

Керівник роботи в.о., доц., Чухрай Л.В.

затверджені наказом по університету 172 /к-с від 08. 03. 2024

Строк подання студентом роботи «16» 06 2025 р.

1 Вхідні дані до роботи Дані про положення Сонця, показники освітленості, температурні та погодні умови

2 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Дослідження технічних вимог і аналіз сучасних підходів до автоматизованого керування сонячними енергетичними системами, Створення та дослідження моделі системи керування сонячною панеллю в середовищі matlab simulink, Створення та випробування автоматизованої системи керування сонячним трекером, Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, Висновки, Список джерел

5. Перелік презентаційного матеріалу (з зазначенням обов'язкових елементів): _____

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 4, 6	Чухрай Л.В., в.о. доцента кафедри інформаційних технологій		
5	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання 25.02.2025.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02.2025 – 01.04.2025	
2	Виконання другого розділу та формування головних показників для розрахунків	01.04.2025 – 01.05.2025	
3.	Виконання третього розділу та формування початкових даних	01.04.2025 – 01.05.2025	
4.	Виконання четвертого розділу та узагальнення отриманих результатів магістерської роботи	01.03.2025 – 01.05.2025	
5.	Написання розділу: «Охорона праці»	01.05.2025 – 01.06.2024	
6.	Завершення роботи в цілому	01.06.2025 – 09.06.2025	

Студент
(підпис)

_____ Гнатишин М..Р.

Керівник роботи _____ Чухрай Л.В.

УДК 621.311.243:681.5

Кваліфікаційна робота: 53 с., 21 рис., 4 табл., 1 дод., 18 джерел.

Автоматизація системи керування сонячним трекером для підвищення ефективності генерування електроенергії. Гнатишин М.Р. Кафедра ІТ.-Дубляни, Львівський НУВМБ, 2025

Мета дослідження: є проектування, реалізація та експериментальна перевірка автоматизованої системи керування сонячним трекером, здатної динамічно змінювати положення фотоелектричних панелей відповідно до кута падіння сонячного випромінювання впродовж доби. Це дозволяє максимізувати кількість отриманої сонячної енергії, підвищити загальну ефективність роботи сонячної електростанції та забезпечити адаптацію до змін зовнішніх умов, таких як хмарність чи сезонні коливання сонячної активності. Додатково мета включає розробку алгоритмів керування, вибір та інтеграцію відповідних апаратних і програмних рішень для стабільної, енергоефективної та надійної роботи системи в автономному режимі.

Об'єкт дослідження: Процес функціонування сонячної енергетичної установки, зокрема система керування трекером для орієнтації сонячних панелей.

*Актуальність роботи:*їУ зв'язку зі зростанням попиту на відновлювані джерела енергії, зокрема сонячну, особливо актуальними стають питання підвищення її ефективності. Використання сонячних трекерів дозволяє збільшити кількість зібраної енергії на 25–40% порівняно зі стаціонарними установками. Автоматизація керування трекером дає змогу мінімізувати втрати, знизити потребу в ручному втручанні та забезпечити стабільну роботу системи в різних погодних умовах.

Ключові слова: автоматизована система, сонячний трекер, сонячні панелі, комп'ютерне моделювання, сенсор, серводвигун, фоторезистор, мікроконтролер.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ І АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ.....	8
1.1.Еволюція розробки та основи функціонування фотоелектричного елемента.....	8
1.2.Динаміка впровадження та практичне використання сонячних електростанцій в Україні та за кордоном.....	11
1.3.Втрата продуктивності та процес деградації фотоелектричних панелей з часом.....	13
РОЗДІЛ 2 СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ПАНЕЛЛЮ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK.....	16
2.1. Математичне моделювання процесу функціонування сонячної панелі.....	16
2.2. Математичне моделювання роботи електродвигуна.....	18
2.3. Створення моделі в програмному середовищі MATLAB Simulink.....	20
РОЗДІЛ 3	
СТВОРЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМ ТРЕКЕРОМ.....	26
3.1. Опис та технічні характеристики обладнання, використаного для побудови макету.....	26
3.2 Технологія виготовлення та монтажу макету установки.....	29
3.3. Програмна реалізація системи керування.....	35
3.4. Експериментальна перевірка роботи системи.....	40
РОЗДІЛ 4.	
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	45
4.1. Структурно-функціональний аналіз технологічного процесу.....	45
4.2. Розрахунок освітлення приміщення комп'ютерного кабінету.....	49
ВИСНОВКИ.....	51

ВСТУП

У сучасних умовах особливої ваги набувають питання енергоефективності, енергетичної незалежності та сталого розвитку. Підвищення цін на традиційні енергоносії, обмеженість запасів викопних ресурсів та негативний вплив енергетичного сектору на довкілля стимулюють активне впровадження відновлюваних джерел енергії. Серед них провідну позицію посідає сонячна енергетика, що відзначається екологічністю, доступністю та практично необмеженим потенціалом. Завдяки прогресу у сфері фотоелектричних технологій та здешевленню обладнання використання сонячних електростанцій стало вигідним навіть для побутових споживачів.

Однак, для підвищення продуктивності сонячних панелей необхідно забезпечити їх максимально ефективну орієнтацію відносно положення Сонця. Фіксоване розташування панелей призводить до втрати частини сонячного потенціалу впродовж доби. Цю проблему вирішують сонячні трекери — пристрої, що змінюють положення панелей відповідно до переміщення Сонця по небосхилу. Автоматизація таких систем дозволяє підвищити ефективність виробництва енергії та мінімізувати потребу в ручному налаштуванні.

Зважаючи на вищезазначене, актуальним є створення ефективних і доступних засобів автоматичного керування трекерами. Застосування мікроконтролерів, сенсорів та алгоритмів регулювання забезпечує можливість побудови компактної та надійної системи, здатної до точного орієнтування в автономному режимі з урахуванням змін у зовнішньому середовищі — таких як освітленість, погода або географічні особливості місцевості.

Метою цієї дипломної роботи є розробка та реалізація автоматизованої системи керування сонячним трекером, що забезпечує динамічне відстеження положення Сонця для підвищення ефективності фотоелектричних панелей. У межах дослідження було проаналізовано принципи функціонування трекерів, проведено огляд сучасних реалізацій, здійснено комп'ютерне моделювання та реалізовано прототип системи з використанням мікроконтролера та

програмного забезпечення. Ефективність розробленого рішення оцінено шляхом порівняння з традиційними нерухомими установками.

Актуальність теми пояснюється як світовими тенденціями переходу на екологічно чисту енергію, так і потребами в підвищенні енергетичної незалежності на локальному рівні. Запропонована система може бути впроваджена як у побутовому секторі, так і на підприємствах, а також використовуватись як основа для подальшого вдосконалення інтелектуальних енергетичних технологій.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ І АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

1.1. Еволюція розробки та основи функціонування фотоелектричного елемента

Витоки сонячної енергетики сягають 1839 року, коли французький фізик Александр Едмон Беккерель під час досліджень електролітичних комірок випадково виявив явище, відоме сьогодні як фотоелектричний ефект. Він встановив, що деякі матеріали здатні генерувати електричний струм під дією сонячного світла. Це відкриття стало ключовою основою для подальшого розвитку технологій перетворення сонячної енергії в електричну.

Значний внесок у розвиток сонячної енергетики зробили країни Азії, насамперед Японія та Китай. У 1970-х роках японські інженери активно працювали над удосконаленням технологій створення ефективних фотоелементів. Згодом, у 2000-х роках, Китай зумів вивести виробництво сонячних панелей на масовий рівень, істотно знизивши їх вартість і зробивши сонячну енергетику доступною для широкого кола споживачів завдяки вдосконаленню технологічних процесів.

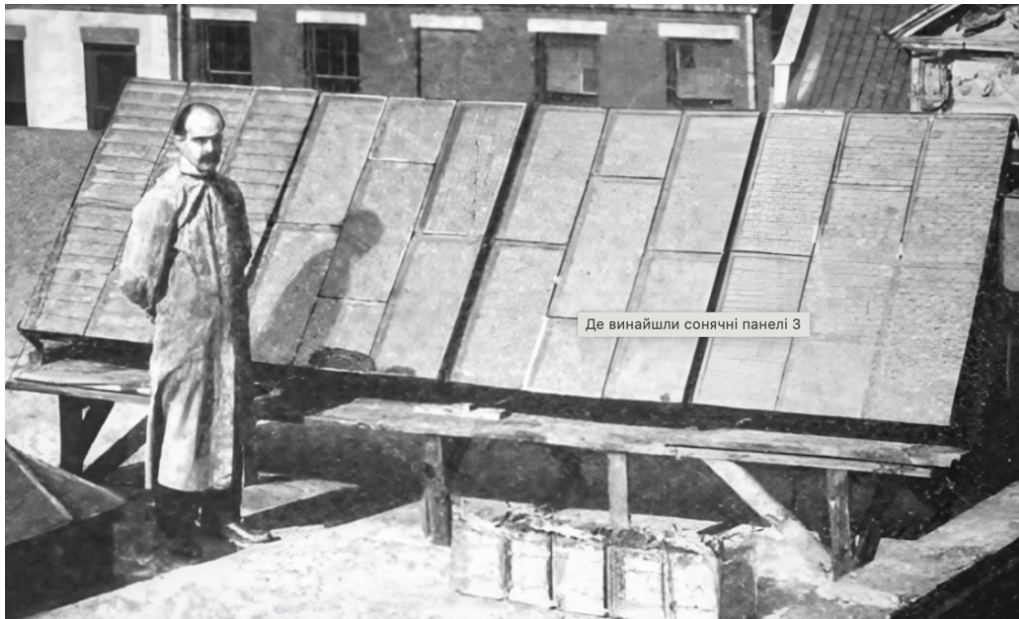


Рисунок 1.1. Історичне фото першої у світі сонячної панелі, створеної Чарльзом Фріттсом у Нью-Йорку (1883)

У XX столітті відбувся інтенсивний розвиток технологій, пов'язаних із використанням сонячної енергії. Однією з ключових подій стало створення в 1954 році першої кремнієвої сонячної батареї в лабораторії Bell Labs, яка мала коефіцієнт корисної дії близько 6%. Це досягнення стало важливою віхою для космічної галузі, де сонячні елементи почали активно застосовуватись як основне джерело живлення для штучних супутників. У подальші роки ефективність панелей поступово зростала, а технологічні процеси їх виготовлення зазнавали постійного вдосконалення.

У XXI столітті сонячна енергетика вийшла на новий рівень, переживаючи хвилю технологічних проривів. Активно досліджуються й упроваджуються інноваційні типи фотоелементів, зокрема органічні та перовскітні. Науковці працюють над створенням прозорих сонячних панелей, які можуть використовуватись у якості елементів фасадів і вікон будівель, а також над поліпшенням характеристик традиційних кремнієвих елементів. Сучасні розробки спрямовані на досягнення коефіцієнта корисної дії понад 40% та суттєве зменшення вартості виготовлення сонячних модулів.



Рисунок 1.2. Сучасна сонячна електростанція з фотоелектричними панелями на відкритій місцевост

За останні десятиліття сонячна енергетика еволюціонувала з дослідницького напрямку у високорозвинену комерційну індустрію. Провідні світові компанії активно вкладають інвестиції у створення та розвиток сонячних електростанцій, а виробничі підприємства зосереджуються на підвищенні ефективності технологій та здешевленні процесу виготовлення сонячних модулів. Усе це сприяло значному розширенню доступу до сонячної енергії для широкого кола споживачів.

Новітні технології сприяли розширенню можливостей застосування сонячних панелей у різних галузях. Сьогодні їх використовують не лише для генерації електроенергії на масштабних енергетичних об'єктах, а й вбудовують у елементи архітектури, транспортні засоби, мобільну електроніку та навіть текстильні вироби. Зокрема, ведуться активні розробки прозорих панелей, які можна інтегрувати у вікна й фасади будівель.

1.2. Динаміка впровадження та практичне використання сонячних електростанцій в Україні та за кордоном

Сонячна енергетика в Україні є порівняно молодим напрямом у сфері електроенергетики, однак вона демонструє стабільно високі темпи розвитку. Незважаючи на відносну новизну, за останні роки вдалося суттєво наростити встановлені потужності — загальний обсяг генерації сягнув 6320 МВт, не враховуючи приблизно 408 МВт, розташованих на тимчасово окупованих територіях. За підсумками 2021 року частка сонячної енергетики в структурі виробництва електроенергії в Україні становила близько 6%.

Із 2008 року в державі функціонує механізм підтримки відновлюваних джерел енергії у вигляді «зеленого тарифу». Цей інструмент суттєво прискорив впровадження сонячних електростанцій, дозволивши багаторазово збільшити обсяги генерації. Сукупна потужність СЕС, що працюють за цим тарифом (без урахування окупованих територій), наразі становить понад 6,3 ГВт.

Виробництво електроенергії із сонця здійснюється як на великих промислових СЕС, так і на приватних станціях. Останні генерують орієнтовно 1,2 ГВт, з яких понад 0,4 ГВт було введено в експлуатацію протягом 2021 року.

Втім, повномасштабне вторгнення завдало серйозного удару по галузі. Значна частина інфраструктури постраждала, адже понад 60% сонячних електростанцій розміщено в південних областях, де тривають активні бойові дії. За оцінками, до 40% СЕС у цьому регіоні зазнали пошкоджень.

Крім фізичних руйнувань, залишені в експлуатації станції працюють із обмеженнями для забезпечення стабільності енергосистеми, що знижує економічну ефективність виробництва. Серйозних втрат зазнали також приватні установи — близько 20% із них були пошкоджені або знищені.



Рисунок 1.3. Найпотужніші сонячні електростанції України

Очевидно, що сонячна енергетика в Україні вже зазнала суттєвих втрат, і є всі підстави вважати, що в умовах триваючих викликів ця тенденція може лише посилитися. У зв'язку з цим ключовим завданням держави, яка визначила розвиток відновлюваної енергетики одним із пріоритетів, є формування ефективних стратегій для відновлення та подальшого зростання сектору сонячної енергетики.

Зокрема, необхідно забезпечити залучення фінансових ресурсів з міжнародних і внутрішніх фондів для відновлення зруйнованої інфраструктури. Поряд із цим важливо створювати стимули для будівництва нових сонячних електростанцій і забезпечити виробникам безперешкодний доступ до ринку електроенергії. Значну роль у цьому процесі відіграє ТОВ «Українська енергетична біржа», яка активно сприяє відновленню енергетичних підприємств, забезпечуючи прозорі умови для продажу електроенергії.

Наразі учасники енергетичного ринку мають можливість купувати й продавати електроенергію через електронні аукціони в системі УЕБ. Для участі

в торгах необхідно пройти попередню акредитацію за напрямом «Електроенергія» на офіційному вебсайті біржі.

1.3 Втрата продуктивності та процес деградації фотоелектричних панелей з часом

Виробники сонячних панелей постійно вдосконалюють технології з метою підвищення довговічності та стійкості обладнання до змін навколишнього середовища. Панелі мають функціонувати за умов значних температурних коливань, витримуючи як сильні морози, так і спеку. Проте з плином часу будь-яка панель втрачає частину своєї початкової потужності — цей процес відомий як деградація.

Деградація сонячних панелей передбачає поступове зниження їх енергоефективності, що може бути зумовлено зовнішніми чинниками, такими як ультрафіолетове випромінювання, опади, температурні перепади тощо. Водночас існують і внутрішні причини, пов'язані зі структурними змінами в матеріалах. Це природний процес, що притаманний усім фотоелементам, хоча швидкість і масштаб втрат залежать від якості продукції. Висококласні панелі здатні зберігати до 90% своєї початкової потужності навіть через 20–25 років експлуатації.

Виробники зазвичай зазначають рівень деградації у гарантійних умовах. Зазвичай протягом першого року використання спостерігається швидше падіння ефективності — в межах 1–3%, після чого продуктивність зменшується повільніше, в середньому на 0,8–0,9% щороку, згідно з результатами численних досліджень.

На рисунок.1.4 видно, як виглядає дуже деградована сонячна панель.

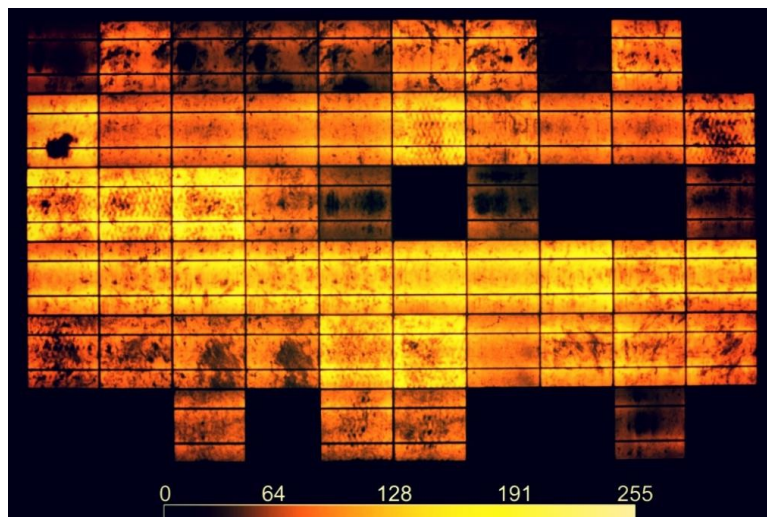


Рисунок 1.4 - Дуже деградована сонячна панель [30]

Темні ділянки сонячної панелі свідчать про зменшену кількість р-п переходів, які відповідають за генерацію електроенергії, а отже — про знижену продуктивність цієї зони. Наприклад, якщо у перший рік використання панель втрачає близько 2% своєї початкової потужності, то її ефективність у другому році складе вже 98%. За умов подальшого щорічного зниження на 0,8%, після 25 років експлуатації вона зберігатиме приблизно 78,8% своєї вихідної потужності. Для приблизної оцінки залишкової ефективності через N років можна скористатись формулою: від 100% відняти добуток річного показника деградації та кількості років експлуатації.

Панелі високої якості зазвичай характеризуються повільнішим темпом деградації, що мінімально впливає на загальну ефективність енергетичної системи. Інформація про швидкість зниження продуктивності зазвичай вказується виробником у технічних або гарантійних характеристиках, тому її можна врахувати ще на етапі вибору обладнання. Водночас важливо звертати увагу й на гарантію на саму панель, оскільки виробничі дефекти здатні зменшити строк служби або вплинути на продуктивність системи.

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ПАНЕЛЛЮ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK

2.1. Математичне моделювання процесу функціонування сонячної панелі

Найпростіша еквівалентна схема сонячного елемента включає джерело струму, підключене паралельно до діода. Джерело генерує фотострум, який виникає в результаті перетворення світлової енергії у фотоелементі. Цей струм залишається стабільним за умови постійної освітленості та температури. У темний період, коли немає сонячного світла, фотоелемент перестає виробляти електроенергію і поводить себе як типовий діод, пропускаючи слабкий зворотний струм — так званий темновий або струм насичення, що виникає при наявності зовнішньої напруги, навіть без освітлення.

Ключовими параметрами, що характеризують роботу сонячного елемента, є струм короткого замикання (I_{sc}), напруга холостого ходу (V_{oc}) і рівень сонячного випромінювання — ці характеристики зазвичай вказуються у технічному паспорті виробу. Оскільки один фотоелемент має низький рівень напруги на виході, для практичного використання їх об'єднують у модулі. Наприклад, модуль Kamtex-10W складається з 36 фотоелементів і призначений для заряджання акумуляторів із номінальною напругою 12 В.

Під час побудови математичної моделі струму, який генерується фотоелементом, враховують такі параметри: струм насичення діода (I_0), фотострум (I_L), вихідний струм (I), послідовний опір (R_s), шунтуючий опір (R_{sh}) і коефіцієнт ідеальності діода (n). В ідеальному випадку R_s повинен наближатися до нуля, а R_{sh} — до нескінченності. Розрахунок вихідного струму виконується як різниця між фотогенерованим струмом та струмом, який проходить через діод, відповідно до прийнятої математичної моделі.

$$I = I_L - I_O \left[e^{\frac{q(V + IR_S)}{nkT}} - 1 \right], \quad (2.3)$$

де V - напруга на фотоелементі, k - стала Больцмана ($=1,381 \times 10^{-23}$ Дж/К), T - температура переходу в Кельвінах, q - заряд електрона ($=1,602 \times 10^{-19}$ С), n - коефіцієнт ідеальності діода (≈ 1.62) [13].

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T_{ref} - T_1), \quad (2.4)$$

$$I_L(T_1) = I_{SC}(T_1) * G(T_{ref}), \quad (2.5)$$

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2.6)$$

де T_{ref} дорівнює 298К - опорна температура фотоелемента, $G(T_{ref})$ дорівнює 1000 Вт/м², K_0 - температурний коефіцієнт, що використовується [13]. Далі [13],

$$I_0 = I_0(T_{ref}) \times \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{-\frac{qV_g}{nk\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_1}\right)}}, \quad (2.7)$$

$$I_0(T_{ref}) = \frac{I_{sc}(T)}{\left(e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - 1 \right)}; \quad V_0(T_1) = \frac{nkT_1}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right), \quad (2.8)$$

де V_g - енергія, необхідна для переходу електронів і дірок із валентної зони в зону провідності, називається забороненою зоною ($=1.12$ еВ). Це енергія, необхідна для розриву зв'язку в кристалі, V_{oc} - напруга холостого ходу, що відповідає фотоструму I_L . Опір всередині кожної комірки в з'єднанні між комірками є послідовним опором, R_s

$$R_s = \frac{dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_v},$$

$$X_v = I_o(T_1) \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - \frac{1}{X_v}, \quad (2.10)$$

за методом Ньютона [13]:

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n) / f'(x_n), \quad (2.11)$$

де $f'(x)$ - похідна функції $f(x) = 0$, x_n - поточне значення, а x_{n+1} - наступне значення. Отже [13],

$$f(I) = I_L - I_n - I_O \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right] = 0, \quad (2.12)$$

далі використовуючи рівняння Ньютона [13]:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_L - I_n - I_O \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right]}{-1 - I_O q R_S e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}}}. \quad (2.13)$$

2.2. Математичне моделювання роботи електродвигуна

Сонячний трекер призначений для повільного обертання фотоелектричної панелі в межах кута від 0 до 180 градусів. Для керування двигуном застосовується передатна функція, яка не передбачає зворотного зв'язку. У цьому випадку математичний зв'язок між вхідною напругою та вихідним кутом повороту описується такою передатною функцією [15].

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V - K_g K_f \frac{d\theta}{dt} - Ri), \quad (2.14)$$

Це рівняння відображає динамічну поведінку електродвигуна, що

забезпечує рух сонячної панелі. Основні складові цього рівняння:

- di/dt представляє собою зміну струму в обмотці мотора з часом. Це диференціальна змінна, яка вказує на швидкість зміни струму (i) у часі (t).
- L - індуктивність обмотки мотора. Це константа, яка вказує на здатність обмотки генерувати електромагнітне поле.
- V - це напруга, яка подається на мотор. Вона визначається зовнішніми джерелами живлення.
- K_g - коефіцієнт передачі моменту. Це параметр, який відображає взаємозв'язок між струмом в моторі та згенерованим моментом.
- K_f - коефіцієнт тертя. Це коефіцієнт, що враховує втрати механічної енергії через тертя в механізмі.
- $d\theta/dt$ - кутова швидкість зміни положення сонячної панелі з часом. Це диференціальна змінна, яка вказує на швидкість зміни кута (θ) у часі (t).
- R - опір обмотки мотора. Це резистивний елемент, який впливає на струм в обмотці.
- i - струм, що протікає через обмотку мотора.

Це диференціальне рівняння описує фізичні принципи, які лежать в основі роботи електромотора, який використовується для руху сонячної панелі. Ось як саме це рівняння працює:

Закон Фарадея (перший член): Перша частина рівняння ($\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V - K_g K_f \frac{d\theta}{dt} - Ri)$), визначає, як швидко змінюється струм в обмотці

мотора з часом. Це впливає з закону Фарадея, який говорить, що електромагнітна індукція, яка виникає в обмотці мотора, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через цю обмотку.

Напруга та опір (другий член): Цей член ($V - K_g K_f \frac{d\theta}{dt} - Ri$) відображає різницю між введеною напругою (V) і напругою, викликаною втратами через опір (Ri) та впливом моменту та тертя ($K_g K_f \frac{d\theta}{dt}$). Ця різниця визначає, наскільки ефективно напруга використовується для зміни струму в обмотці мотора.

Кутова швидкість та коефіцієнти передачі (третій член): Цей член $(K_g * K_f * \frac{d\theta}{dt})$ враховує вплив кутової швидкості руху сонячної панелі на зміну струму в обмотці мотора. Чим швидше змінюється положення панелі, тим більше напруги потрібно для створення необхідного моменту для її руху.

Також у нас йде рівняння (2.), що вказує на момент T , який генерується в електромоторі і пропорційний струму i , що протікає через нього, з урахуванням коефіцієнта K_g [15].

$$T = K_g K_t i,$$

де (T) - момент, що генерується електромотором. Момент - це фізична величина, яка вимірюється у Н·м (Ньютон-метри) і вказує на силу обертання, що здійснюється електромотором. (K_g) - коефіцієнт передачі моменту. Це параметр, який вказує, наскільки струм, що протікає через мотор, перетворюється на момент обертання. Чим більше значення (K_g) , тим більший момент генерується при заданому струмі.

Струм, що протікає через електромотор. Струм в обмотці мотора спричиняє виникнення електромагнітного поля, яке в свою чергу генерує момент обертання.

2.3. Створення моделі в програмному середовищі MATLAB Simulink

Simulink — це програмне середовище для інтерактивного моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем, що охоплює неперервні, дискретні, гібридні, а також нелінійні й розривні системи [26]. У цьому розділі розглядається процес побудови моделі фізичної системи, яка включає сонячну панель та електродвигун, з подальшою реалізацією контролера для відстеження траєкторії Сонця [15].

Процес моделювання починається зі створення нової порожньої моделі в середовищі Simulink. Система будується шляхом поєднання стандартних функціональних блоків та сигналів із бібліотеки. Для реалізації фізичної моделі використовуються такі базові елементи, як Integrator, Constant, Subtract, Gain та Scope [15].

Блок Integrator, загальний вигляд якого показано на рисунку 2.1, застосовується для виконання інтегрування вхідного сигналу по часу, що є ключовим підходом при моделюванні диференціальних рівнянь. У контексті моделювання руху сонячної панелі передбачено використання двох інтеграторів: один для розрахунку прискорення, інший — для визначення швидкості, що у підсумку дозволяє визначити положення панелі [15].

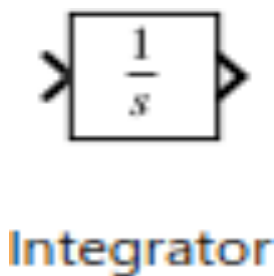


Рисунок 2.1 - Integrator

Показник демпфування визначається швидкістю руху панелі, яка задається сигналом `theta_dot`. Щоб передати цей сигнал до блоку Subtract, його можна розгалузити — для цього достатньо клацнути правою кнопкою миші на сигналі та перетягнути його до відповідного блоку, як показано на рисунку 2.2 [15].

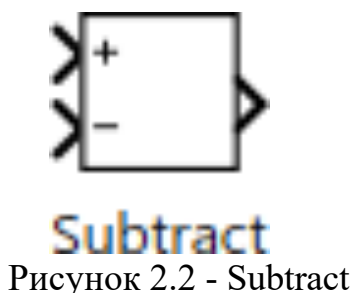


Рисунок 2.2 - Subtract

Для кожного елемента системи — панелі та електродвигуна — створюються окремі блоки, що відображають їхні фізичні характеристики. Зокрема, для моделювання роботи двигуна використовуються блоки Constant, який задає постійне значення напруги, та Gain, що визначає коефіцієнт підсилення. Ці елементи, зображені на рисунку 2.3, дозволяють відтворити обертальний рух панелі під дією крутного моменту та сили демпфування [15].

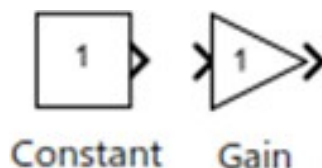


Рисунок 2.3 - Constant та Gain

Контролер, що забезпечує відстеження положення Сонця, буде реалізовано на основі різниці між фактичним кутом нахилу панелі та кутом розташування Сонця. Виникаюча помилка використовується для формування керуючої напруги, яка подається на електродвигун з метою корекції положення панелі [15].

На цьому етапі модель панелі вважається повністю сформованою. Проте для перевірки її працездатності необхідно візуалізувати окремі сигнали. У Simulink передбачено широкий набір інструментів для виведення даних, і одним із найпростіших способів швидкого перегляду сигналів є використання блоку Scope (рисунок 2.4), який підключається безпосередньо до необхідного сигналу [15].

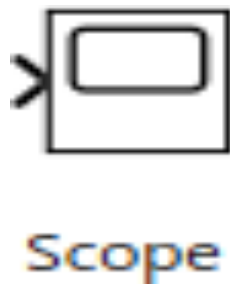


Рисунок 2.4 - Scope

Завдяки середовищу Simulink можливо ефективно моделювати складні динамічні системи, а також реалізовувати контролери для автоматизованого керування, що значно полегшує інженерні розробки [15].

Щоб визначити похибку між фактичним положенням панелі та орієнтацією на Сонце, застосовується вхідний сигнал у вигляді одиничного кроку. Такий підхід є типовим у процесі проєктування регуляторів [15].

Для керування орієнтацією панелі використовується ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний), до складу якого входять три складові: пропорційна, інтегральна та диференціальна. У моделі встановлено коефіцієнти підсилення для перших двох компонентів: 240 — для пропорційної, 180 — для інтегральної частини [15].

Щоб наочно продемонструвати ефективність роботи контролера, будується графік, на якому порівнюється реальне положення сонячної панелі з кутом орієнтації на Сонце. Контролер досить точно повторює рух небесного світила, хоча можливі незначні відхилення, що є прийнятними в контексті цього застосування [15].

Для оптимізації структури моделі та зручності її сприйняття використовуються підпрограми (субсистеми). У Simulink підпрограми, або так звані «функції», забезпечують модульність, повторне використання коду та спрощують управління складними схемами. Вони дозволяють створювати окремі функціональні блоки, які можна багаторазово застосовувати в межах тієї ж чи інших моделей, що підвищує ефективність проєктування та супроводу. Зокрема, одна з таких підпрограм (рисунки 2.5) реалізує розрахунок потужності, що генерується сонячною панеллю. Обчислення ґрунтується на визначенні проекції сонячного випромінювання на нормаль до площини панелі, що дозволяє оцінити ефективність поглинання енергії.

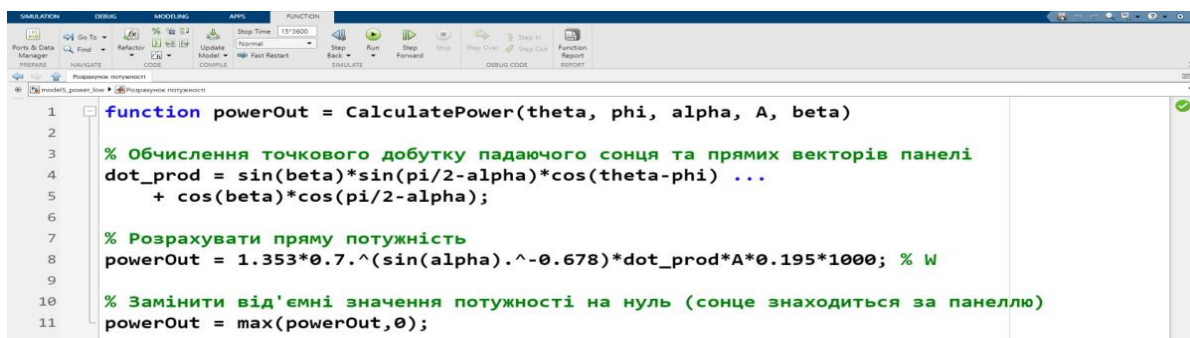


Рисунок 2.5 - Підпрограма розрахунку потужності сонячної панелі

Моделювання роботи електродвигуна (рисунок 2.6) ґрунтується на принципі, за якого на вхід подається змінна напруга, сформована зовнішнім ПД-регулятором, а також сигнал про поточну швидкість обертання. Використовуючи ці вхідні параметри, обчислюється крутний момент, який у свою чергу визначає динаміку руху та положення сонячної панелі.

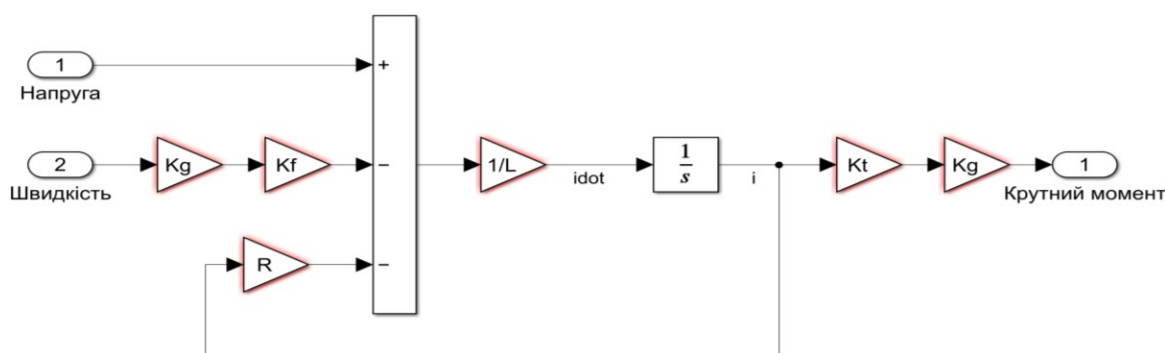


Рисунок 2.6 - Модель роботи двигуна

Підпрограма, що моделює рух сонячної панелі, є ключовим елементом у побудові всієї системи трекінгу (рисунок 2.7). Вона дозволяє наочно проаналізувати механізм відстеження Сонця, оцінити його ефективність та зрозуміти, як окремі компоненти впливають на роботу всієї системи. На вхід цієї підпрограми подається крутний момент, розрахований у попередній моделі двигуна. На основі цього моменту визначаються швидкість обертання та положення панелі.

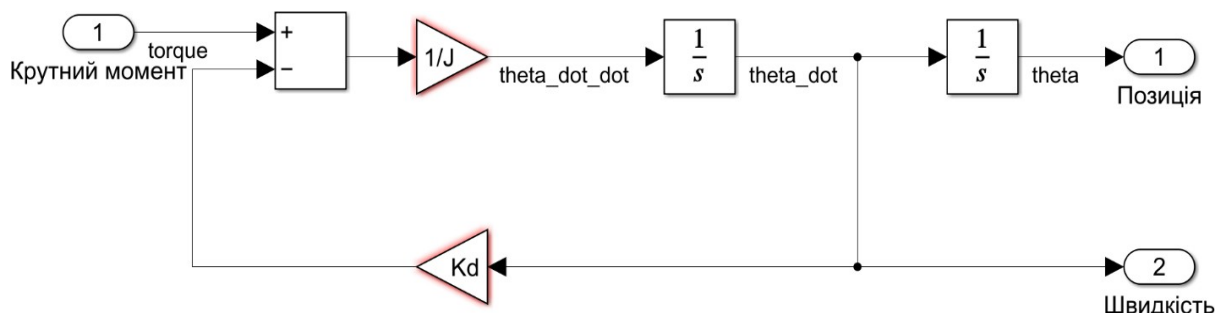


Рисунок 2.7 - Модель руху сонячної панелі

Після завершення розробки контролера проводиться його тестування із використанням реальних даних про положення Сонця. Ці дані імпортуються в робочу область MATLAB і слугують вхідним сигналом для створеної моделі. Результати моделювання свідчать про здатність системи точно відслідковувати траєкторію Сонця, що підтверджує коректність реалізації контролера [15]. Цей етап є лише початковою фазою у вдосконаленні системи керування сонячними панелями. Подальший розвиток може передбачати інтеграцію додаткових інструментів, зокрема Simscape — для детального моделювання електричних і механічних компонентів, а також Stateflow — для впровадження логічної поведінки та керування станами системи [15].

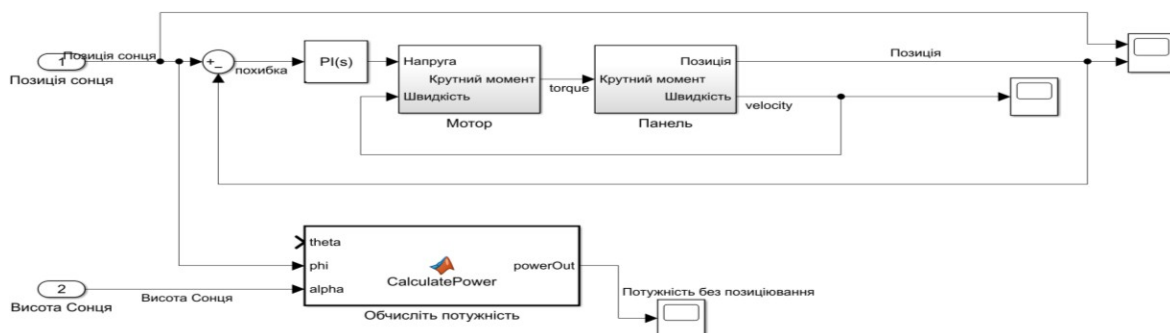


Рисунок 2.8 – модель Simulink

Усі ці інструменти відкривають можливість створення не просто моделі для оцінки ефективності (рисунок 2.8), а й повноцінної, практично придатної системи сонячних панелей. Завдяки середовищу Simulink можна на всіх етапах розробки постійно тестувати, оптимізувати та вдосконалювати конструкцію, що забезпечує її готовність до впровадження в реальних умовах [15].

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМ ТРЕКЕРОМ

3.1. Опис та технічні характеристики обладнання, використаного для побудови макету

Arduino Uno — це плата, побудована на базі мікроконтролера ATmega328. Її зовнішній вигляд зображено на рисунку 3.1. Вона оснащена всім необхідним для зручного використання: має 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть працювати як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, 16 МГц кварцовий резонатор, USB-роз'єм, роз'єм живлення, інтерфейс ICSP для внутрішньосхемного програмування та кнопку скидання. Для початку роботи достатньо під'єднати плату до комп'ютера через USB-кабель або подати живлення від батареї чи адаптера змінного/постійного струму, як показано на рисунку 3.2 [28].

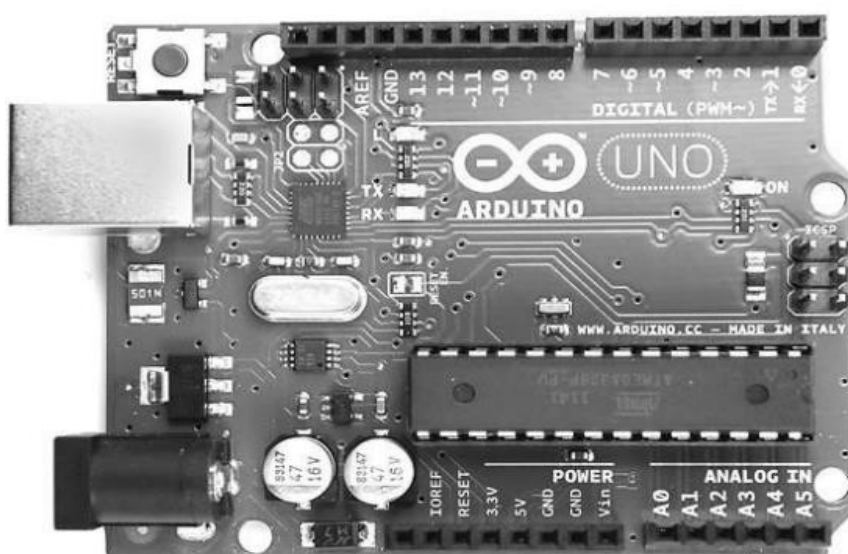


Рисунок 3.1 – Плата Arduino Uno

На відміну від попередніх версій плат Arduino, модель Uno оснащена мікроконтролером ATmega16U2 (або ATmega8U2 у версії R2), який виконує функцію перетворення інтерфейсу USB-UART, замінюючи традиційну мікросхему FTDI [28].

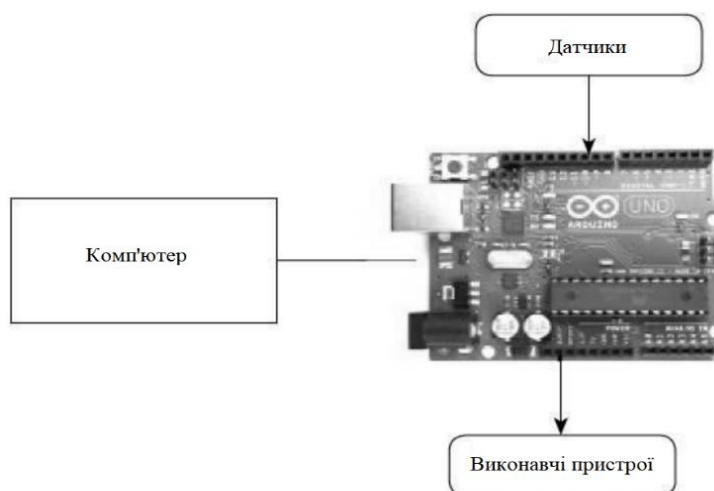


Рисунок 3.2 – Плата Arduino та комп'ютер

Характеристики:

- Мікроконтролер: ATmega328;
- Робоча напруга: 5В;
- Напруга живлення (рекомендована): 7-12В;
- Напруга живлення (гранична): 6-20В;
- Аналогові входи: 6;
- Максимальний струм одного виводу: 40 мА;
- Максимальний вихідний струм виводу 3.3V: 50 мА;
- Flash-пам'ять: 32 КБ (ATmega328), з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем;
- SRAM: 2 КБ (ATmega328);
- EEPROM: 1 КБ (ATmega328);
- Тактова частота: 16 МГц;

Плата Arduino Uno може отримувати живлення як від USB-порту, так і від зовнішнього джерела — тип живлення визначається автоматично. У ролі зовнішнього джерела можуть використовуватись мережеві AC/DC-адаптери або акумулятори/батареї. Адаптер зі штекером діаметром 2,1 мм (із позитивним полюсом у центрі) підключається до роз'єму живлення на платі. Якщо живлення здійснюється від акумулятора, його дроти під'єднують до контактів GND і Vin у секції POWER [28].

Допустимий діапазон напруги зовнішнього живлення становить від 6 до 20 В. Однак, напруга нижча за 7 В може спричинити зниження вихідної напруги на виводі 5V, що здатне викликати нестабільну роботу пристрою. Використання напруги вище 12 В не рекомендується через ризик перегріву вбудованого стабілізатора та можливого пошкодження плати. Найкращим вважається діапазон живлення від 7 до 12 В [28].

Опис виводів живлення:

- **VIN** — вхідна напруга з зовнішнього джерела, яка подається безпосередньо на плату (не пов'язана з 5В лінією USB або іншими стабілізованими джерелами).
- **5V** — стабілізована напруга 5 В, яка подається на плату від вбудованого стабілізатора, незалежно від джерела живлення (USB, VIN або адаптер 7–12 В). Подача живлення безпосередньо на цей вивід не рекомендується, оскільки оминає стабілізатор і може пошкодити плату.
- **3.3V** — стабілізована напруга 3,3 В, яку можна знімати з плати. Максимальний струм — 50 мА.
- **GND** — загальні контакти (земля).
- **IOREF** — вивід, який повідомляє плати-розширення про робочу напругу мікроконтролера, дозволяючи їм автоматично адаптуватися для роботи з 5В або 3,3В логікою.

Обсяг флеш-пам'яті мікроконтролера ATmega328 становить 32 КБ, з яких 0,5 КБ зарезервовано для завантажувача.

3.1 Технологія виготовлення та монтажу макету установки

На початковому етапі складання конструкції було прийнято рішення використати матеріал для основи, який є доступним за вартістю та повністю відповідає необхідним технічним вимогам. Основними критеріями вибору стали:

- Простота обробки — оскільки вся конструкція виготовляється вручну, важливою умовою була можливість легкої механічної обробки матеріалу: різання, вирівнювання та підгонки деталей;
- Легка вага — стенд призначений для демонстрації принципу дії, а не для стаціонарного використання, тому він має бути мобільним і зручним у транспортуванні, при цьому достатньо міцним, щоб витримувати механічні навантаження при перевезенні або встановленні;
- Механічна стійкість — конструкція повинна бути здатною витримати не лише легкі поштовхи, але й інші можливі навантаження, що можуть виникнути в непередбачуваних умовах.

З урахуванням цих вимог, як матеріал основи було обрано лист полістиролу з такими характеристиками:

- Робочий температурний діапазон: від -40 до $+70$ °C;
- Товщина — 2,5 мм;
- Розміри — 500×500 мм.

Полістирол є одним із найпоширеніших видів пластику. Це термопластичний полімер (поліолефін), що утворюється в результаті полімеризації стиролу. Його виробництво було вперше розроблено польським хіміком Казімежем Смоленським у міжвоєнний період. У технічній документації матеріал маркується як PS [17].

Після вибору матеріалу наступним етапом стало визначення розмірів самої основи. Враховуючи вимоги до компактності та стійкості проти тиску на площу, було обрано габарити 170×170 мм. Такий розмір повністю задовольняє функціональні потреби системи. Оскільки основа складається з двох таких

пластин, для їх з'єднання було вирішено використати латунні стійки для кріплення друкованих плат і спеціальні ніжки до них (рисунок 3.6) з розмірами $M2.5 \times 25 + 6$ мм, що дозволяє зручно розмістити між пластинами контролер керування.



Рисунок 3.6 – а) стійка для плат; б) ніжка для стійки

Після вирізання елементів та попереднього складання двох частин основи було отримано приблизну конструкцію, зовнішній вигляд якої представлено на рисунку 3.7.

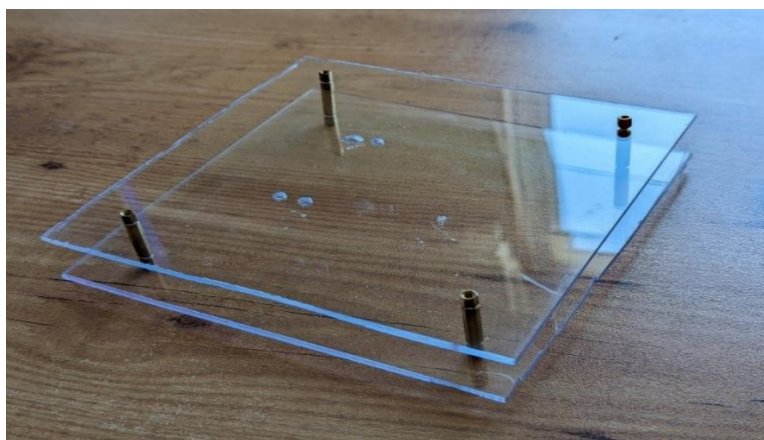


Рисунок 3.7 – З'єднані дві частини основи

Після вирізання заготовок і свердління технологічних отворів, на нижній панелі конструкції були закріплені плата Arduino Uno та безпайкова макетна плата (рисунок 3.8). Монтаж елементів здійснено за допомогою двостороннього клейкого скотчу.

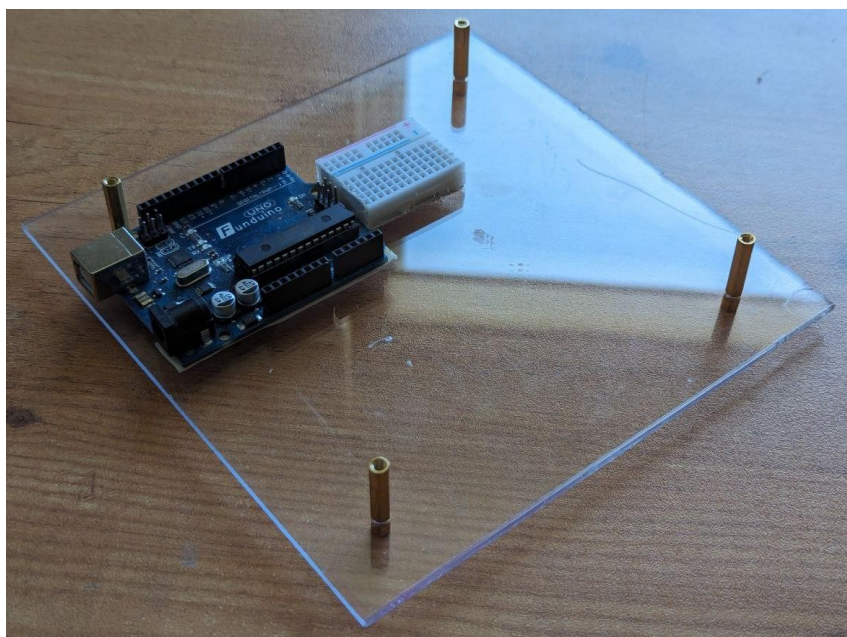


Рисунок 3.8 - Нижня секція основи трекеру

Збірку макету умовно можна розділити на два основних етапи. Перший — виготовлення елементів основи та її складання разом з ключовими компонентами системи. Другий — монтаж поворотної частини, на якій встановлюються сонячна панель і датчики. Цей етап виявився значно простішим, оскільки для його реалізації було вирішено використати готові компоненти, зокрема спеціальний кронштейн для серводвигунів Tower Pro MG995 (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 — Кронштейн кріплення 2-DOF Pan-Tilt Kit

Набір цього кріплення дозволяє легко встановити серводвигун на основу та надійно зафіксувати на ньому сонячну панель. Це просте, доступне за ціною та водночас надійне технічне рішення. Завершене кріплення з установленою панеллю показано на рисунку 3.10.

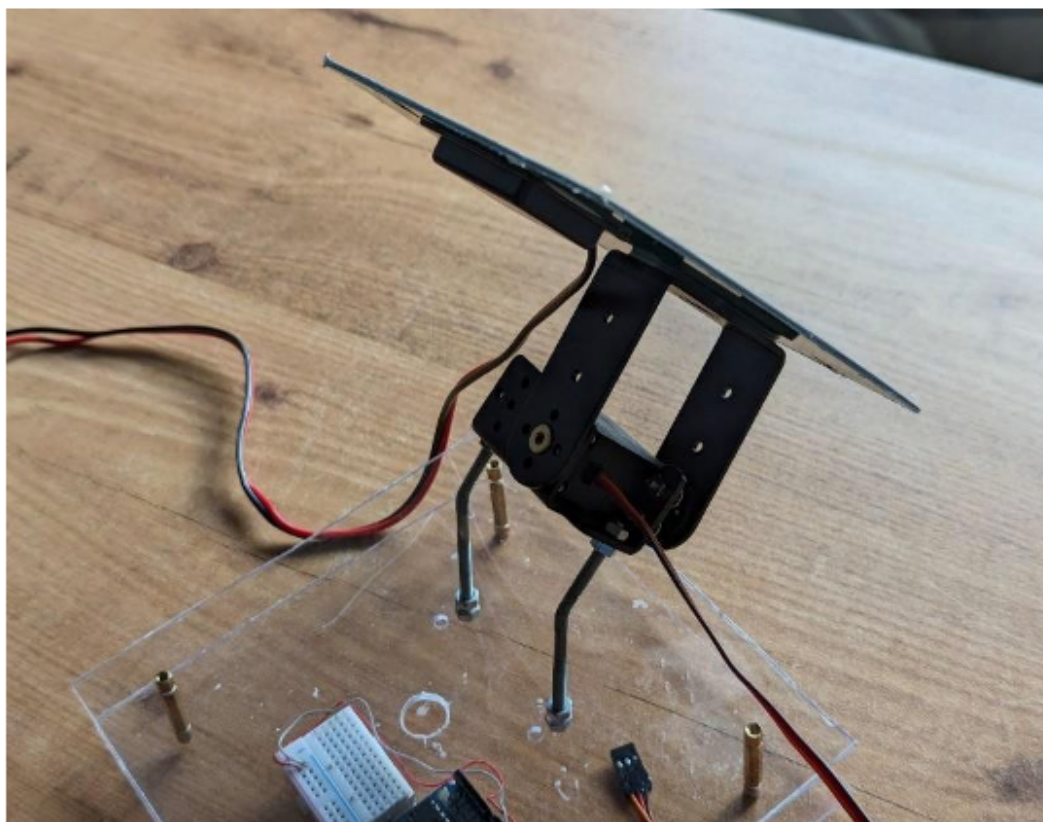


Рисунок 3.10 – Система повороту в зборі с овною та фотоелектричним елементом

Наступним етапом, відповідно до принципової схеми підключення (рисунок 3.11), є під'єднання всіх компонентів до контролера та їх монтаж у заздалегідь визначених позиціях. Після завершення пайки, фінального складання та встановлення всіх елементів на свої місця, зовнішній вигляд готового сонячного трекера для системи автоматичного керування панелями представлено на рисунках 3.12–3.15. Після цього було проведено остаточне налаштування пристрою та перевірено його функціонування.

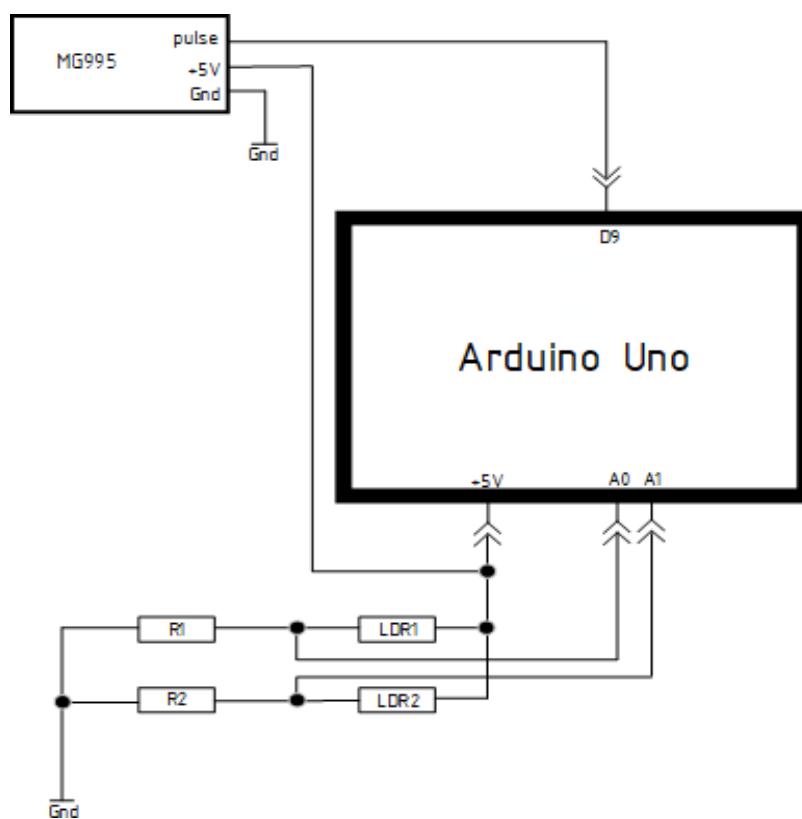


Рисунок 3.11 – Принципова схема підключення

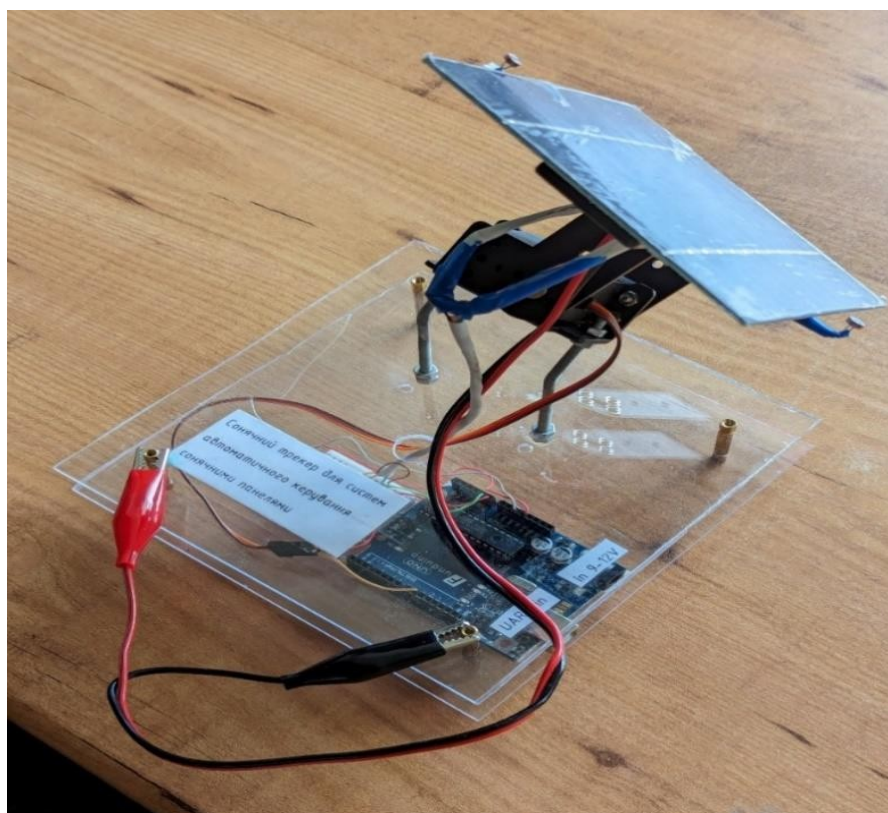


Рисунок 3.12 – Кінцевий вигляд сонячного трекера для систем автоматичного керування сонячними панелями, вид ззаду

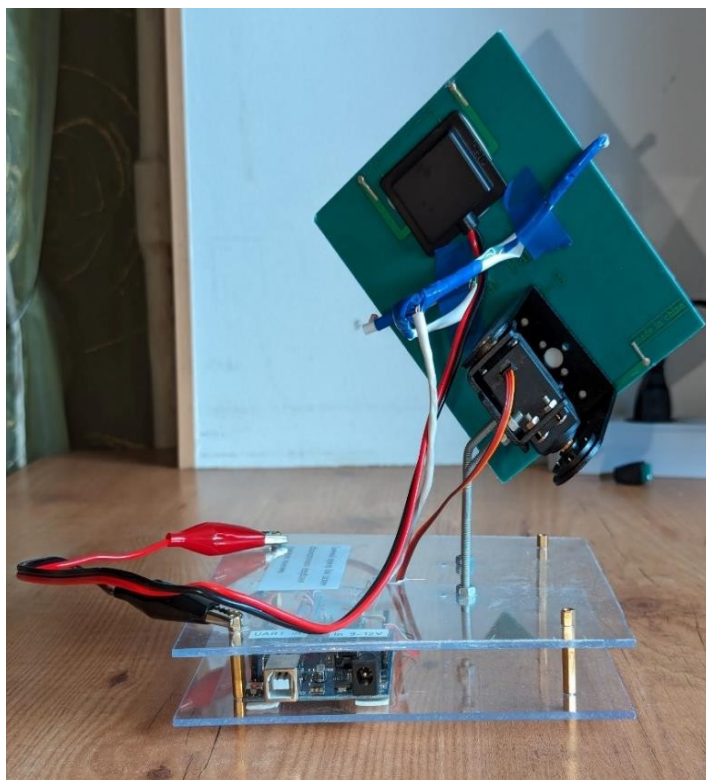


Рисунок 3.13 – Остаточний вигляд сонячного трекера, розробленого для системи автоматизованого керування сонячними панелями.

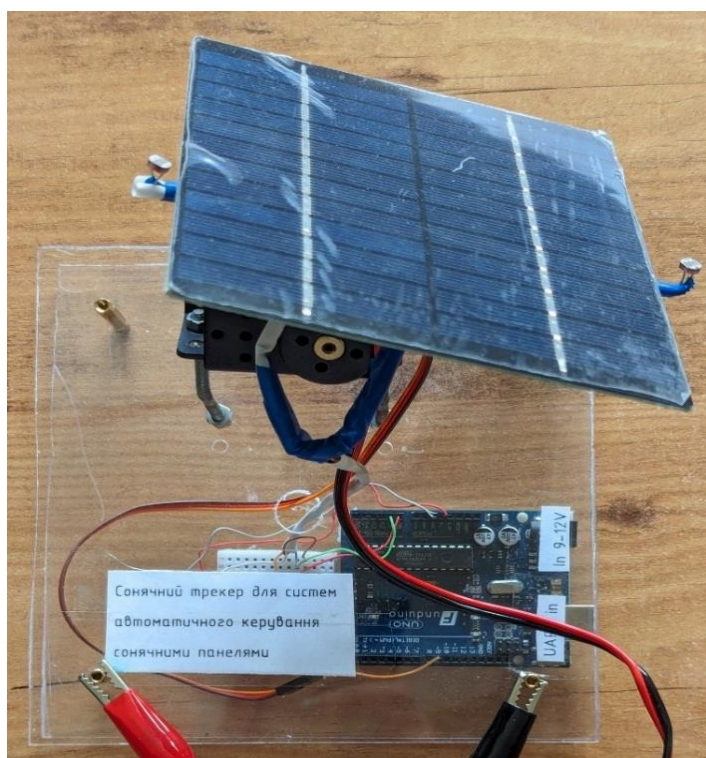


Рисунок 3.14 – Фінальна конфігурація сонячного трекера, призначеного для автоматизованого керування орієнтацією сонячних панелей.

3.3. Програмна реалізація системи керування

Оскільки вся програмна частина проєкту реалізована у середовищі Arduino IDE, доцільно коротко охарактеризувати це програмне забезпечення. Arduino IDE (Integrated Development Environment) — це безкоштовна платформа, створена для написання, компіляції та завантаження програмного коду на пристрої сімейства Arduino [27]. Середовище відзначається простим і зручним інтерфейсом, що підходить як новачкам, так і досвідченим розробникам. Основною метою Arduino IDE є спрощення програмування мікроконтролерів, що робить роботу з електронікою доступною для широкого кола користувачів.

Arduino IDE підтримує мову програмування на базі C/C++ із використанням спеціальних бібліотек, які значно полегшують взаємодію з апаратними компонентами — сенсорами, двигунами, світлодіодами та іншими модулями. Інтерфейс містить редактор коду, консоль повідомлень, панель інструментів з кнопками компіляції, завантаження, відкриття та збереження скетчів, а також серійний монітор для відлагодження. Arduino IDE підтримує роботу з вбудованими бібліотеками та дозволяє додавати сторонні, що розширює функціональність системи. Програмне середовище є кросплатформним і працює на Windows, macOS та Linux. Крім того, IDE містить великий набір прикладів, які допомагають швидко розпочати розробку навіть без попереднього досвіду. Завдяки відкритому коду та активній спільноті, Arduino IDE постійно оновлюється та вдосконалюється відповідно до потреб сучасних розробників.

Оскільки робота трекера реалізована на базі мікроконтролера Arduino, програмний код написаний мовою C++ із використанням фреймворку Wiring, і повна реалізація наведена в Додатку А.

У цьому проєкті реалізована система автоматичного керування сервоприводом, яка базується на даних, отриманих від двох фоторезисторів, що визначають рівень освітленості. Програма дозволяє змінювати кут повороту

сервопривода відповідно до різниці в показниках освітленості з обох сенсорів. Крім того, додатково реалізовано функцію автоматичного обертання сервопривода через встановлені часові інтервали.

Для управління приводом використовується бібліотека Servo, яка підключається на початку коду (приклад показано на рис. 3.15). Це стандартна бібліотека Arduino, яка забезпечує зручне керування сервомотором через просте задання кута обертання в діапазоні від 0 до 180 градусів. Підключення Servo.h є обов'язковим для забезпечення взаємодії з сервоприводом, оскільки без неї виконання відповідних команд було б неможливим.

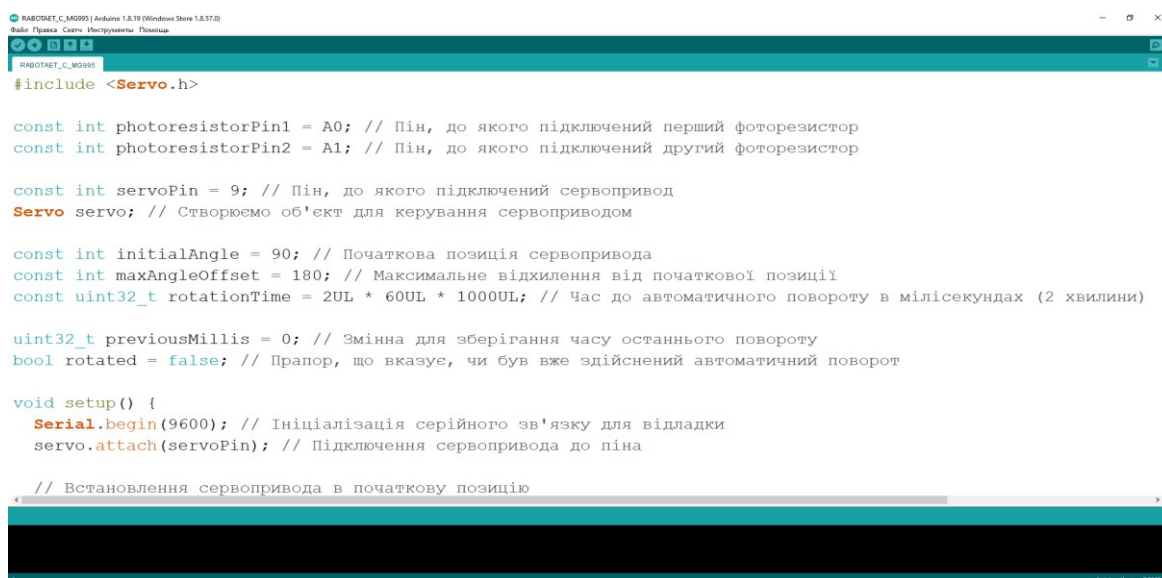


Рисунок 3.15 – Приклад вигляду інтерфейсу Arduino IDE

Після ініціалізації програмного коду наступним кроком є оголошення констант, які відповідають за підключення фоторезисторів і сервопривода до відповідних пінів мікроконтролера. Це необхідно для коректного зчитування даних з сенсорів та передачі команд на виконавчі елементи. Також створюється об'єкт servo, який використовуватиметься для керування сервомотором.

У коді оголошено кілька ключових констант:

- `initialAngle` — задає початкове положення сервопривода при запуску системи;
- `maxAngleOffset` — визначає максимально допустиме відхилення від початкового кута;

- `rotationTime` — встановлює часовий інтервал (у мілісекундах), після якого активується автоматичний поворот (у цьому випадку — 2 хвилини).
- Для контролю часу використовуються змінні:
- `previousMillis` — фіксує момент останнього повороту сервопривода;
- `rotated` — логічна змінна, яка вказує, чи вже був виконаний автоматичний поворот, щоб уникнути повторення дії.

Функція `setup()` виконується один раз після запуску системи і виконує початкову конфігурацію:

- Ініціалізується серійний інтерфейс на швидкості 9600 бод для налагодження й виведення інформації;
- До вказаного піна підключається сервопривод;
- Сервомотор встановлюється у стартове положення, визначене значенням `initialAngle`;
- У змінну `previousMillis` записується поточний час для подальшого відстеження моменту автоматичного повороту.

Основна логіка роботи реалізована у функції `loop()`, яка виконується безперервно. Тут відбувається:

1. Зчитування аналогових сигналів з двох фоторезисторів, підключених до пінів A0 і A1, що дозволяє оцінити рівень освітленості з обох боків панелі;
2. Розрахунок різниці між значеннями опорів фоторезисторів, масштабованої у кут повороту сервопривода за допомогою функції `map()` і коефіцієнта `sensitivity`, який визначає чутливість системи до змін освітлення;
3. Обмеження розрахованого кута в межах, заданих комбінацією `initialAngle ± maxAngleOffset`, щоб уникнути перевантаження чи механічного пошкодження приводу;
4. Надсилання команди на сервомотор за допомогою `servo.write(angle)` для зміни його положення;
5. Виведення на серійний монітор поточних значень опорів та кута повороту для діагностики й налагодження;

6. Перевірка, чи минув встановлений інтервал rotationTime. Якщо так, і поворот ще не був здійснений, сервопривод автоматично повертається на 90 градусів уліво, а змінна rotated фіксує, що дія вже виконана. Якщо ж час ще не минув, на монітор виводиться зворотний відлік у секундах;

7. Наприкінці кожного циклу реалізується затримка на 200 мс для стабілізації роботи системи і контролю частоти оновлення даних. За потреби цю затримку можна скоротити для підвищення чутливості.

Таким чином, у проєкті реалізовано повноцінну систему автоматичного керування сервоприводом на основі різниці рівня освітленості, яку фіксують два фоторезистори. Завдяки використанню коефіцієнта чутливості система здатна точно реагувати на зміни інтенсивності світла. Додаткова функція автоматичного повороту забезпечує більшу функціональність і універсальність рішення.

Подібні системи можуть мати широке застосування: від сонячного трекінгу для оптимізації енерговиробництва до будь-яких автоматизованих пристроїв, що потребують регулювання положення залежно від світлових умов. Запропонована модель демонструє практичне використання мікроконтролера Arduino в автоматизованих системах, підвищуючи ефективність технологічних процесів

3.4. Практичне випробування системи

Після завершення всіх етапів зборки та налаштування трекера було проведено тестування його ефективності. Перевірка відбувалася у два етапи: з використанням трекера та без нього, що дозволило провести порівняльний аналіз і сформулювати обґрунтовані висновки. Випробування проводилися у сприятливих погодних умовах — без опадів та хмарного неба. Отримані результати були узагальнені у таблиці 3.1, яка містить шість стовпчиків, умовно розділених на дві групи з підписами «Трекер» і «Панель».

Таблиця 3.1 — Динаміка вихідних параметрів сонячної панелі залежно від часу.

Час	Трекер			Панель		
	I, А	U, В	P, Вт	I, А	U, В	P, Вт
11:00	0.37	11.2	4.14	0.18	10.4	1.87
12:00	0.4	11.7	4.68	0.22	10.9	2.4
13:00	0.41	12.1	4.96	0.4	11.7	4.68
14:00	0.42	12.2	5.1	0.42	12.2	5.1
15:00	0.41	11.8	4.83	0.39	11.6	4.52
16:00	0.37	11.7	4.68	0.34	11.1	3.774
17:00	0.29	11	3.19	0.26	10.5	2.73
18:00	0.23	10.8	2.5	0.18	9.8	1.76
19:00	0.15	9.4	1.3	0.10	9.0	0.9

Сонячна панель виявилася досить чутливою до змін умов освітлення, що дозволило чітко відслідковувати коливання напруги. Всі заміри проводились на набережній озера Верховина у місті Києві протягом двох днів, у проміжку з 12:00 до 20:00 за місцевим часом. Макет був орієнтований перпендикулярно до Сонця, а всі показники фіксувалися за допомогою мультиметра.

Сприятливі погодні умови — ясне небо та стабільна інсоляція — забезпечили досягнення максимального значення напруги 12.2 В та струму до 0.42 А. Завдяки сонячному трекеру панель постійно змінювала своє положення, орієнтуючись на рух Сонця по небу, що дозволило максимально ефективно поглинати сонячну енергію впродовж усього дня. Трекер автоматично регулював як кут нахилу, так і азимут панелі, утримуючи її орієнтованою під оптимальним кутом до сонячних променів.

Для порівняння, нерухома панель була встановлена під фіксованим кутом — перпендикулярно до Сонця на момент початку експерименту, що забезпечило прийнятні, але не максимальні умови для генерації електроенергії. Відповідні дані наведено в таблиці 3.1.

Температурний фактор також суттєво впливає на продуктивність панелей. При високих температурах ефективність знижується, оскільки зростає

електричний опір напівпровідникових матеріалів, що спричиняє падіння напруги й загальної потужності. Натомість за нижчих температур панелі демонструють кращі результати — зниження опору дозволяє генерувати більше електроенергії за однакового рівня освітлення. Оптимальною для роботи більшості сонячних панелей вважається температура близько 25°C, хоча фактичні умови зазвичай відрізняються.

На рисунку 3.16 зображено два окремі графіки: червоний відображає роботу панелі з трекером, зелений — без трекера. Рисунок 3.17 демонструє зведений графік зміни потужності з часом: синя лінія ілюструє результати панелі з трекером, зелена — без нього. Цей графік наочно демонструє перевагу в ефективності (ККД) системи з трекером порівняно зі статичною панеллю при генерації електроенергії.

Застосування трекера дозволило досягти вищого коефіцієнта корисної дії панелі, що чітко підтверджується візуальною різницею на представлених графіках.

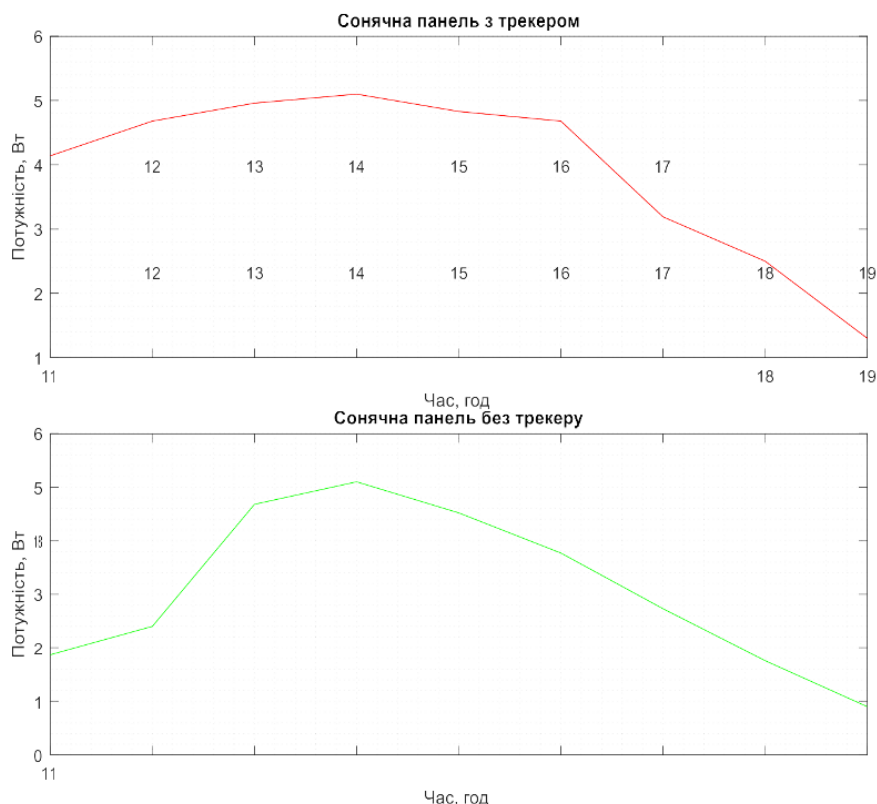


Рисунок 3.16 – Графіки потужності з трекером (червоний) та без нього (зелений)

Вологість також відіграє важливу роль у функціонуванні сонячних панелей. Висока вологість спричиняє конденсацію вологи на поверхні панелі, що зменшує кількість сонячного світла, яке потрапляє на фотогальванічні елементи. Це призводить до зниження виробництва електроенергії. Крім того, підвищена вологість прискорює корозійні процеси в з'єднаннях та інших компонентах панелі, знижуючи їх довговічність і ефективність.

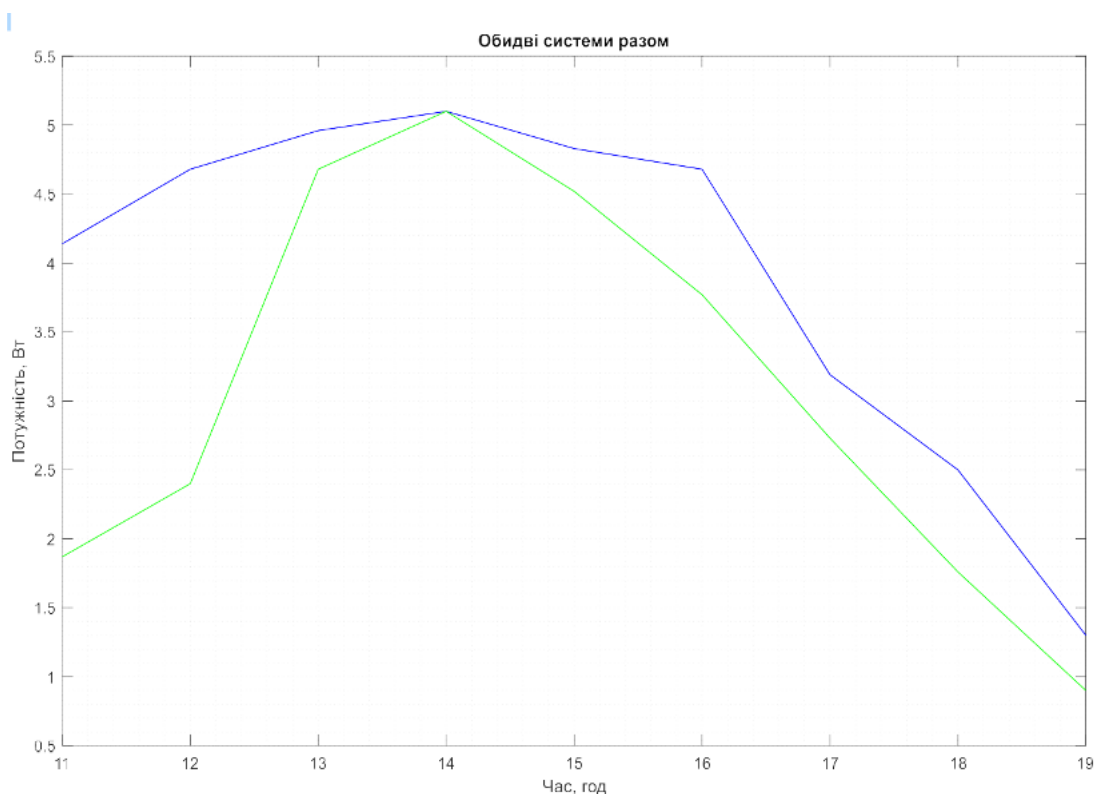


Рисунок 3.17 – Наочне порівняння ефективності систем

Низький рівень вологості, як правило, покращує прозорість атмосфери, що сприяє підвищенню інсоляції та, відповідно, більш ефективному виробництву електроенергії. Водночас надто сухе повітря може спричинити накопичення пилу на поверхні панелей, що негативно впливає на їхню продуктивність.

Вплив температури та вологості на роботу сонячних панелей має комплексний характер. Наприклад, у тропічних зонах із високою вологістю та температурою ефективність значно знижується через сукупність цих несприятливих факторів. У сухих, але спекотних умовах, хоча проблема

утворення конденсату відсутня, висока температура все одно негативно впливає на роботу панелей, знижуючи їх ефективність.

Таким чином, оптимальні умови для роботи сонячних панелей включають помірні температури і низьку вологість, що забезпечує максимальну ефективність вироблення електроенергії.

Розрахувавши приблизний приріст потужності у процентах, є можливість: порахувати середню потужність за весь час з та без трекару, поділити один на одного і отримати відношення. Після цього знайти різницю між цими значеннями, розділити різницю на середню потужність без трекару та помножити на 100, щоб отримати відсоток приросту. Формула для розрахунку приросту потужності у процентах буде виглядати так: де, $P_{\text{заг}}$ - приріст у відсотках, P_z – середня потужність з трекаром, $P_{\text{без}}$ – середня потужність без трекару.

Для більш наочного розуміння проведені розрахунки для кожної години окремо, що дозволило отримати наступні результати: 11:00 – 121%, 12:00 – 95%,

13:00 – 5%, 14:00 – 0%, 15:00 – 7%, 16:00 – 25%, 17:00 – 17%, 18:00 – 43%, 19:00 –

45%. Із цих даних видно, що приріст переважно спостерігається в першій половині дня. Найімовірніше так сталося через те, що дуже сильно впливає місцезнаходження і положення трекару. В даному випадку, трекару був направлений на південний захід, а зі сторони заходу знаходився ліс, який перекривав доволі велику кількість світла і через це втрати у вигляді недоотриманої енергії доволі суттєві.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Структурно-функціональний аналіз технологічного процесу

Розробка та вживання ефективних заходів запобігання аварійним і травмонебезпечним ситуаціям можливі лише при завчасному виявленні тих небезпек, з яких починаються процеси їх формування. Оскільки небезпечні умови не завжди завчасно можна виявити, а для вивчення небезпечних дій іноді потрібно багато часу, щоб зібрати статичний матеріал, то і методи виявлення цих небезпек повинні бути відповідно диференційовані (табл. 5.1).

Таблиця 4.1. - Моделі формування та виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій

Вид робіт, виробничий підрозділ, робоче місце, виробниче обладнання, склад агрегату	Виробнича безпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання небезпечним ситуаціям
	Небезпечна умова (НУ)	Небезпечна дія (НД)	Небезпечна ситуація (НС)		
Виконання робіт із електрообладнанням	Не вимкнено живлення. Відсутність заземлення.	Нехтування правилами ТБ	Ураження струмом	Травма (Т)	Проведення повторного інструктажу з ТБ. Розробка нових способів захисту. Встановлення заземлення.
НД ↓ НУ —→ НС —→ Т					

Відповідно до аналізу небезпечних умов, які існують у виробничому процесі виокремлено такі наступні за характером дії на працівника їх групи:

- характеризують стан або рівень безпеки обладнання, які використовуються.

- сприяють виникненню технологічних помилок обслуговуючого персоналу впродовж виробничого процесу;
- створювати умови та можливість проникнення працівника в небезпечну зону;
- приводять до виникнення небезпечних дій (внаслідок низького рівня професійної підготовки працівників та організації навчання з охорони праці).

Моделі формування та виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій в комп'ютерному кабінеті представлено у вигляді моделі формування та виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій – табл. 5.1.

4.2. Розрахунок освітлення приміщення комп'ютерного кабінету.

Освітленість виробничих приміщень може бути штучною і природною. Природне освітлення при правильному обладнанні найбільш сприятливе для людини. Основні вимоги для освітлення наступні:

- освітлення повинне бути достатнім для швидкого і легкого розпізнання об'єктів роботи;
- освітлення повинно бути рівномірне без різких тіней;
- джерело світла не повинно осліплювати працівника;
- рівень освітленості не повинен обмежуватись часом.

Природне освітлення забезпечується обладнанням вікон (бокове освітлення) фонарів і світильних покриттів приміщень (верхнє освітлення). Природне освітлення нормується коефіцієнтом природної освітленості. Коефіцієнт природної освітленості – це процентне відношення фактичної освітленості E_v в будь-якій точці приміщення до освітленості E_n розсіяної світлом небозводу точки, яка лежить на відкритій місцевості. Розрахунок природного освітлення через бокові вікна по нормам освітленості ведеться для самої дальньої від вікон точки, тобто знаходять мінімальне значення стик

коефіцієнта природної освітленості:

$$e_{\min} = \frac{F_b}{F_n} \cdot 100. \quad (4.1)$$

Значення коефіцієнта природної освітленості визначається не менше чим в п'яти точках. Значення коефіцієнта природної освітленості для сільськогосподарських виробничих приміщень в даному випадку ремонтній майстерні, беремо $e_{\min} = 5\%$.

Розрахунок природного освітлення зводиться до визначення площі світлових променів.

Сумарну площу світлових променів $\sum F_o (m^2)$ по коефіцієнту природної освітленості для бокових променів визначаємо по формулі:

$$\sum F_o = \frac{F_n \cdot e_{\min} \cdot r_o \cdot K}{100 \cdot \tau \cdot \Gamma_1}, \quad (4.2)$$

де F_n – площа підлоги; $e_{\min}$ – величина мінімального коефіцієнта природного освітлення; τ – загальний коефіцієнт світловикористання віконного отвору із врахуванням його забруднення, $\tau = 0,25$; r_o – світлова характеристика вікна, $r_o = 9,5$; Γ_1 – коефіцієнт, який враховує підвищення освітленості за рахунок світла, яке відбивається від стін і стелі, $\Gamma_1 = 1,2$; K – коефіцієнт, який враховує затінення вікон сусідніми приміщеннями і загорожею, $K = 1$.

$$\sum F_o = \frac{36 \cdot 0,5 \cdot 9,5 \cdot 1}{100 \cdot 0,25 \cdot 1,2} = 5,7 m^2.$$

Кількість світлових променів визначимо:

$$N = \frac{\sum F_o}{F_o}, \quad (4.3)$$

де F_o – площа вікна згідно стандарту, m^2 .

$$N = \frac{5,7}{6} = 0,95.$$

Приймаємо кількість вікон – одне вікно.

При розрахунку природного освітлення найбільш поширеним і простим є метод світлового потоку. При цьому методі розраховуємо світловий потік F_l (Лк), який повинна випромінювати кожна лампа (при заданій кількості ламп).

$$F_l = \frac{k \cdot S_n \cdot E}{n_l \cdot \eta \cdot r^2}, \quad (4.4)$$

де k – коефіцієнт запасу, $k = 1,3$; S_n – площа підлоги, м²; $S_n = 36$ м².

E – нормативна освітленість, $E = 300$ Лк; n_l – кількість встановлених ламп, $n_l = 6$ од; η – коефіцієнт використання світлового потоку, $\eta = 0,25$; r – коефіцієнт нерівномірності освітленості, $r = 0,545$.

Коефіцієнт запасу (K) враховує можливість забруднення світильників пилом, що залежить від характеру виробництва.

Розрахунок штучного освітлення починаємо із визначення висоти розташування світильника і їх кількості. Висоту h_n (м) розташування світильників над робочим місцем знаходимо за формулою:

$$h_n = H - (h_1 + h_2), \quad (4.5)$$

де H – висота приміщення, м; h_1 – віддаль від підлоги до освітлювальної поверхні, м; h_2 – віддаль від стелі до світильника, м.

$$h_n = 4,5 - (2,2 + 1,5) = 0,8 \text{ м.}$$

При симетричному розміщенні світильників по вершинах квадратів їх кількість визначається за формулою:

$$n_c = \frac{S_n}{l^2}, \quad (4.6)$$

де l – віддаль між світильниками, м.

Підставивши значення отримаємо:

$$n_c = \frac{36}{9} = 4 \text{ од.}$$

Тоді світловий потік буде становити

$$F_n = \frac{1,3 \cdot 36 \cdot 300}{4 \cdot 0,25 \cdot 0,545} = 2576,2 \text{ Лк.}$$

При світловому потоці 2576,2 Лк для заданої лампи вибираємо тип і потужність.

Вибираємо тип лампи – люмінесцентну, потужністю 40Вт.

4.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення захисту населення і території у разі загрози і виникнення надзвичайних ситуацій є одним з найважливіших завдань держави.

Захист населення є системою загально-державних заходів, які реалізуються центральними і місцевими органами виконавчої влади, виконавчими органами влад, органами управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення, підпорядкованими їм системами, та підприємств, що забезпечують виконання організаційних, інженерно – технічних, санітарно – гігієнічних, проти епідемічних та інших заходів у сфері запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Принципи захисту випливають з основних положень Женевської конвенції щодо захисту жертв війни та додаткових протоколів до неї, можливого характеру воєнних дій, реальних можливостей держави щодо створення матеріальної бази захисту. З метою захисту населення, зменшення втрат та шкоди економіці в разі виникнення надзвичайних ситуацій має право проводитись спеціальний комплекс заходів.

Оповіщення та інформування, яке досягається завчасним створенням і підтримкою в постійній готовності загально-державної, територіальних та об'єктивних систем оповіщення населення.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі детально досліджено процес розробки інтелектуальної системи автоматичного керування положенням сонячної панелі з використанням трекара. Основна увага приділялася теоретичним засадам побудови трекерів, їх класифікації та принципам дії, а також їх практичному впливу на ефективність перетворення сонячної енергії. Було розглянуто механічні компоненти приводу, типи сенсорів, контролери й алгоритми, які забезпечують точне орієнтування панелі на джерело світла протягом усього світлового дня. В межах дослідження також проведено моделювання поведінки системи в середовищі MATLAB Simulink. На основі моделі було створено функціональний прототип сонячного трекара. Апаратна частина реалізована на базі мікроконтролера Arduino Uno та двох фоторезисторів, які забезпечують визначення напрямку найінтенсивнішого світла. Система керування запрограмована мовою C++ з використанням фреймворку Wiring в середовищі Arduino IDE. Було реалізовано логіку реагування на зміну освітленості, а також функцію автоматичного повороту через заданий проміжок часу. Після складання пристрою проведено натурні випробування, під час яких проводився порівняльний аналіз ефективності роботи панелі з трекером і без нього. Особливу увагу приділено температурному режиму, оскільки перевищення оптимального значення (близько 25°C) може призвести до зниження вихідної напруги та загальної продуктивності.

Розроблена система відзначається точністю, стабільністю, високою адаптивністю та може бути масштабована для ширшого використання — як у побутових умовах, так і в промислових фотоелектричних установках. Завдяки модульному підходу, використанню візуального моделювання в Simulink та відкритій архітектурі на базі Arduino, система легко підлягає вдосконаленню, налаштуванню та розширенню в залежності від потреб користувача.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hnatov A., et al. Solar energy – basic kinds and types of solar power stations // *Automobile Transport*. – 2017. – С. 163.
2. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. *Фотоенергетика : навч. посібник* / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. *Електроніка і мікросхемотехніка : підручник* / за ред. А. Г. Соскова. – 2-ге вид. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.
4. Contributors to Wikimedia projects. Boltzmann constant – Wikipedia [Електронний ресурс]. – 2002. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann_constant.
5. Чайка О. Повернення сонячного буму // *Forbes.ua* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://forbes.ua/company/povernennya-sonyachnogo-bumu-biznes-znovu-rochav-investuvati-u-sonyachnu-energetiku-dlya-svoikh-pidpriemstv-naskilki-tse-vigidno-12042023-12979>.
6. П'ять найкращих країн у сфері виробництва сонячної енергії // *BIZAGRO* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bizagro.com.ua/p-yat-najkrashhih-krayin-u-sferi-virobnitstva-sonyachnoyi-energiyi/>.
7. Xiong S. та ін. Waterproof and ultraflexible organic photovoltaics with improved interface adhesion // *Nature Communications*. – 2024. – Т. 15, № 1. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44878-z>.
8. Contributors to Wikimedia projects. Multi-junction solar cell – Wikipedia [Електронний ресурс]. – 2008. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell.
9. Awasthi A. та ін. Review on sun tracking technology in solar PV system // *Energy Reports*. – 2020. – Т. 6. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>.
10. Hafez Z., Shazly H., Eteiba B. Comparative evaluation of optimal energy efficiency designs for solar tracking systems // *Proc. of the Third Intl. Conf. on Advances Science and Environmental Engineering*. – 2015. – P. 134–141.
11. Hubach J. O. Solar Tracking Using a Parallel Manipulator Mechanism to Achieve Two-Axis Position Tracking // *Other Mechanical Engineering Commons : Thesis*. – 10 квіт. 2019 р.

12. Andriamahefa M. H. та ін. Control strategy for a dual-axis sun tracker based on a radiometric cube to maximize the power output of the PV system // *EPJ Photovoltaics*. – 2023. – Т. 14. – С. 35. – DOI: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2023022>.
13. Chin C. S., Babu A., McBride W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink // *Renewable Energy*. – 2011. – Т. 36, № 11. – С. 3075–3090. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.026>.
14. Contributors to Wikimedia projects. Dark current (physics) – Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_(physics)) (дата звернення: 22.05.2024).
15. Getting Started with Simulink // *MathWorks – MATLAB & Simulink* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/videos/getting-started-with-simulink-69027.html>.
16. Vaidya S. Mathematical model and analysis of single axis solar tracking mechanism using artificial neuron network (ANN) // *IRJETS*. – 2021. – Т. 3, № 12. – С. 247–254.
17. Що таке полістирол і для чого він потрібен? – *Старкон.City* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://starkon.city/articles/299335/scho-take-polistirol-i-dlya-chogo-vin-potriben>.
18. Учасники проєктів Вікімедіа. Сервопривод – Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Сервопривод>.

ДОДАТОК А

КОД КЕРУВАННЯ ДЛЯ МК

```

#include <Servo.h>

const int photoresistorPin1 = A0; // Пін, до якого підключено перший фоторезистор
const int photoresistorPin2 = A1; // Пін, до якого підключено другий фоторезистор
const int servoPin = 9; // Пін, до якого підключений сервопривод
Servo servo; // Створюємо об'єкт для керування сервоприводом
const int initialAngle = 90; // Початкова позиція сервопривода
const int maxAngleOffset = 180; // Максимальне відхилення від початкової позиції
const uint32_t rotationTime = 2UL * 60UL * 1000UL; // Час до автоматичного
повороту в мілісекундах (2 хвилини)
uint32_t previousMillis = 0; // Змінна для зберігання часу останнього повороту
bool rotated = false; // Прапор, що вказує, чи був вже здійснений автоматичний
поворот

void setup() {
    Serial.begin(9600); // Ініціалізація серійного зв'язку для відладки
    servo.attach(servoPin); // Підключення сервопривода до піна
    // Встановлення сервопривода в початкову позицію
    servo.write(initialAngle);
    previousMillis = millis(); // Встановлення часу першого повороту
} void loop() {
    // Зчитуємо значення опорів фоторезисторів
    int resistance1 = analogRead(photoresistorPin1);
    int resistance2 = analogRead(photoresistorPin2);
    // Перетворюємо зчитані значення в кути повороту для сервопривода
    // Збільшуємо чутливість за допомогою коефіцієнту посилення
    int sensitivity = 5;
    int angle = map(sensitivity * (resistance2 - resistance1), -1023, 1023, initialAngle -
maxAngleOffset, initialAngle + maxAngleOffset);

```