

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino
Назва теми

КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Виконав: студент III курсу, група КІ2с-22-1


Підпис

Анна ЦИБУЛЬСЬКА
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Дмитро ДЕНИСЮК
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСЛІВ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«12» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

Хмельницький 2025
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Освітній рівень БАКАЛАВР

Галузь знань 12 Інформаційні технології

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Анні ЦИБУЛЬСЬКІЙ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

Керівник проекту (роботи) Дмитро ДЕНИСЮК, старший викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Аналіз кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та ARDUINO

Проектування кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та ARDUINO

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та ARDUINO

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Схема електрична принципова

Схема структурна

Схема архітектури системи

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням gps та arduino	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням gps та arduino	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням gps та arduino	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Анна ЦИБУЛЬСЬКА

Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Дмитро ДЕНИСЮК

Підпис Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino».

Автор роботи: Анна ЦИБУЛЬСЬКА.

Керівник роботи: Денисюк Дмитро.

Пояснювальна записка: 55 с., 34 рис., 4 табл., 3 дод., 43 джерела.

Графічна частина: 3 креслення.

СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ.

Метою дипломної роботи є дослідження умов та особливостей розробки й впровадження апаратного і програмного забезпечення для кіберфізичної системи автоматизованого орієнтування сонячної панелі, що базується на мікроконтролері Arduino Nano з інтегрованим GPS-навігатором та сенсорними елементами. Робота має на меті забезпечення максимальної ефективності перетворення сонячної енергії шляхом динамічного коригування положення панелі відносно Сонця.

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування положенням сонячної панелі в умовах змінного освітлення.

Предметом дослідження виступає алгоритмічна та апаратна реалізація адаптивного відстеження положення Сонця за допомогою мікроконтролера та датчиків орієнтації.

Під час виконання роботи використовувалися методи системного аналізу, моделювання, а також огляд літературних джерел для визначення оптимальних архітектурних і програмних рішень у сфері автономних енергетичних систем із трекінговою функцією.


Підпис студента

12.06.2025
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO	5
1.1.1 Історія розвитку сонячних трекерів.....	5
1.1.2 Значення сонячних трекерів у сучасній енергетиці	6
1.1.3 Приклади існуючих сонячних трекерів.....	8
1.2 Програмне забезпечення та алгоритм роботи.....	11
1.3 Висновки до першого розділу	12
2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO	13
2.1 Архітектура системи	13
2.2 Логіка роботи сигнальної частини системи.....	15
2.3 Аналіз та вибір компонентів системи.....	18
2.3.1 Мікроконтролер.....	18
2.3.2 Кроковий двигун.....	24
2.3.3 Серводвигун	27
2.3.4 Компас та GPS-модуль.....	31
2.3.5 Фоторезистор	33
2.3.6 DC-DC перетворювачі.....	35
2.3.7 Плата заряджання	37
2.4 Висновки до другого розділу	39
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO	41
3.1 Опис алгоритму роботи модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу	41
3.2 Опис астрономічних формул для визначення положення сонця.....	43

КвРКІ 220042.22.01.39 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Анна ШЕБУЛЬСЬКА		12.06.23
Перевір.		Дмитро Денисюк		12.06.23
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		12.06.23
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		12.06.23
Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino				
Пояснювальна записка				
Літера		Аркуші		Арк. шів
у		2		55
ХНУ КІ2с-22-1				

3.3 Електрична схема кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino	45
3.4 Проектування фізичної плати кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino	50
3.5 Програмна реалізація кіберфізичної системи	52
3.5.1 Реалізація плавного старту для сервоприводу	56
3.6 Висновки до третього розділу.....	58
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	60
ДОДАТОК А	64
ДОДАТОК Б	65
ДОДАТОК В	66
ДОДАТОК Г	67

ВСТУП

Сонячна енергія сьогодні є одним із найперспективніших джерел відновлюваної енергії. Щоб ефективніше її використовувати, необхідно зробити так, щоб сонячні панелі могли постійно бути спрямованими прямо на Сонце. Для цього і використовуються спеціальні пристрої - сонячні трекери. Вони автоматично змінюють положення панелей протягом дня, слідкуючи за рухом Сонця. Це дозволяє отримати більше енергії у порівнянні зі звичайними нерухомими панелями.

Метою цієї дипломної роботи є створення простого, недорогого та ефективного сонячного трекера. Для цього використовується мікроконтролер Arduino Nano, GPS-модуль для визначення координат, фоторезистори для точного орієнтування на світло, а також кроковий і серводвигуни для зміни положення панелі. Така система дозволяє автоматично налаштовувати положення панелі відповідно до положення Сонця на небі.

Сонячний трекер, розроблений у межах цієї роботи, може бути корисним у домашніх умовах або для підприємств, які прагнуть зменшити витрати на електроенергію. Він може працювати автономно, що особливо важливо в місцях, де є перебої з живленням або потреба в резервному джерелі енергії.

У ході роботи було вивчено як апаратну частину системи - вибір компонентів, їх підключення та живлення - так і програмну, яка відповідає за логіку керування. Результатом є система, яка поєднує доступність, надійність і реальну користь для енергозбереження.

					КвРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АНАЛІЗ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO

1.1.1 Історія розвитку сонячних трекерів

Історія систем, які слідкують за Сонцем, сягає давніх часів. Ще в Стародавньому Єгипті та Месопотамії люди будували свої будівлі таким чином, щоб максимально використовувати сонячне світло для освітлення та обігріву. Це можна вважати першими спробами орієнтувати споруди на Сонце. У сімнадцятому та вісімнадцятому століттях важливі наукові роботи Галілео Галілея та Ісаака Ньютона, присвячені збору сонячного світла за допомогою лінз та дзеркал, заклали теоретичну основу для створення пристроїв, які могли б активно повертатися до Сонця [1].

У дев'ятнадцятому столітті швидкий розвиток механіки та електротехніки підштовхнув винахідників до отримання перших патентів на пристрої, здатні змінювати положення сонячних колекторів. Важливим досягненням стало створення у 1868 році Огюстом Мушо першого діючого сонячного трекера. Цей пристрій використовував систему лінз та дзеркал для фокусування сонячного проміння, що значно підвищувало ефективність збору теплової енергії [2].

Поява фотоелектричної технології на початку двадцятого століття відкрила новий етап у розвитку сонячних трекерів. До 1930-х років у цих системах почали застосовувати гідравлічні та електричні приводи, що дозволило набагато точніше регулювати кут нахилу колекторів і суттєво покращити коефіцієнт корисної дії [3].

Потреби освоєння космосу в 1950-х та 1960-х роках стали ще одним важливим стимулом для досліджень у галузі сонячного стеження. Хоча перший супутник NASA "Вангард-1", запущений у 1958 році з нерухомими сонячними панелями, сам не мав системи стеження, його місія показала велику необхідність у повністю автоматизованих системах, які б слідкували за Сонцем на борту космічних апаратів майбутнього [4].

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Паралельно з цим, наземні системи сонячного стеження швидко розвивалися протягом 1980-х років завдяки значним досягненням у виробництві напівпровідників та мікроелектроніці. Спочатку ці наземні трекери використовували ручне налаштування або прості аналогові фотоелементи. Проте вже на початку 2000-х років, коли світовий попит на відновлювану енергію різко зріс, на великих промислових сонячних електростанціях стали широко застосовувати цифрово керовані системи. Ці системи поєднують високоточні оптичні та інерційні датчики, блоки керування на основі мікропроцесорів та дані супутникової навігації для досягнення максимальної генерації енергії [5].

Сучасні наукові дослідження продовжують вдосконалювати роботу сонячних трекерів. Вчені розробляють алгоритми машинного навчання для прогнозування рівня сонячної радіації та оптимізації траєкторії руху панелей у реальному часі. Також активно впроваджуються бездротові та хмарні платформи для дистанційного керування системами, досліджуються нові композитні матеріали та механізми, натхненні природою, для підвищення міцності та довговічності конструкцій [6].

1.1.2 Значення сонячних трекерів у сучасній енергетиці

Сонячна енергія відіграє ключову роль у сучасному прагненні до сталого розвитку та переході світу на відновлювані джерела енергії. Сонячні панелі дозволяють виробляти чисту електроенергію, не завдаючи шкоди довкіллю, що допомагає зменшити нашу залежність від викопного палива та скоротити викиди парникових газів [7].

Дуже важливим фактором ефективності сонячних електростанцій є те, як орієнтовані панелі відносно сонця. Звичайні, нерухомі установки не можуть змінювати своє положення протягом дня, коли сонце рухається по небу. Через це вони втрачають значну частину потенційної енергії, яку могли б виробити [8].

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

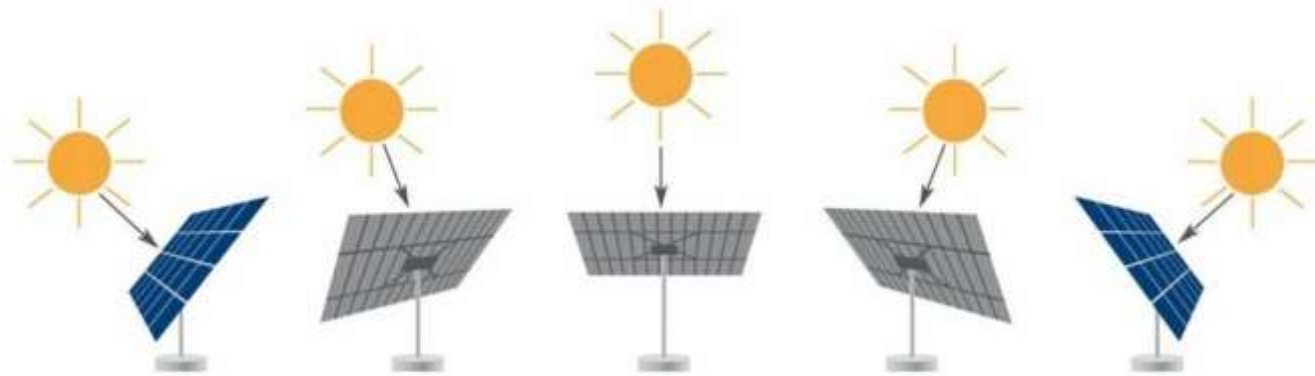


Рисунок 1.1 – Рух сонячної панелі за Сонцем [9]

Сонячні трекери – це автоматичні пристрої, які постійно повертають панелі, регулюючи їхній нахил та кут повороту, щоб вони завжди були спрямовані на сонце. Завдяки цьому вони виробляють в середньому на 25-40% більше енергії порівняно з нерухомими установками. Таке точне наведення дозволяє краще використовувати сонячне світло протягом усього дня, особливо вранці та ввечері, коли сонце знаходиться низько над горизонтом і звичайні системи працюють менш ефективно, а також максимально використовувати періоди найвищої сонячної активності [10].

Хоча системи з сонячними трекерами спочатку вимагають більших витрат, їхнє використання значно знижує вартість виробленої електроенергії та швидше повертає інвестиції завдяки вищій продуктивності та меншим експлуатаційним витратам. Впровадження сонячних трекерів у сучасну енергетичну інфраструктуру також суттєво сприяє зменшенню викидів вуглецю та стимулює економічне зростання в регіонах, створюючи кваліфіковані робочі місця та підтримуючи місцеву промисловість. Фінансові стимули, такі як "зелені" тарифи та податкові пільги, ще більше підвищують економічну привабливість високоефективних рішень з використанням трекерів, скорочуючи терміни окупності інвестицій та збільшуючи їхню прибутковість [11]. Сучасні технології "інтернету речей" дозволяють віддалено контролювати та керувати системами стеження в реальному часі, що забезпечує швидке виявлення відхилень у роботі та полегшує

профілактичне обслуговування. Крім того, використання прогнозних моделей на основі машинного навчання дає змогу адаптивно оптимізувати положення панелей залежно від прогнозів погоди та рівня сонячної радіації, що ще більше підвищує надійність та довгострокову ефективність роботи [12].

1.1.3 Приклади існуючих сонячних трекерів

На сучасному ринку представлено різноманітний спектр технічних рішень для реалізації систем стеження за Сонцем, починаючи від елементарних одноосних механізмів і закінчуючи складними двоосними платформами, що функціонують на основі передових алгоритмів керування. Прикладом перших є DuraTrack від Array Technologies, що здійснює орієнтацію фотоелектричних модулів вздовж азимутальної осі та характеризується високою надійністю та мінімальними експлуатаційними витратами. Трекер SF7 від Soltec (рисунок 1.2) також є одноосним, проте передбачає обмежену можливість регулювання кута нахилу, що сприяє зниженню структурних навантажень під час несприятливих погодних умов.



Рисунок 1.2 – Система трекінгу Soltec SF7 [13]

Система NX Horizon від NEXTracker(рисунок 1.3) розвиває цю концепцію, використовуючи алгоритм TrueCapture™ для оптимізації орієнтації панелей у реальному часі з урахуванням хмарності та особливостей рельєфу місцевості [14].



Рисунок 1.3 – Система трекінгу NX Horizon [15]

Більш складні двоосні рішення, такі як установки Exotrack® CPV від Exosun (рисунок 1.4) та безредукторні трекери Mechatron(рисунок 1.5), підвищують ефективність захоплення сонячної енергії шляхом регулювання як азимута, так і кута піднесення, однак це супроводжується зростанням складності монтажу та капітальних витрат [16].



Рисунок 1.4 – Система трекінгу Exotrack® CPV [16]

Експлуатаційні характеристики зазначених трекерів значною мірою залежать від умов навколишнього середовища та конкретних конструктивних рішень виробників.



Рисунок 1.5 – 3д модель системи трекінгу Mechatron [17]

У регіонах зі значними вітровими навантаженнями багато сучасних систем оснащуються автоматичним режимом "вітрова стоянка", який переводить панелі в захисне положення при досягненні встановлених порогових значень швидкості вітру. З метою підвищення надійності та зменшення витрат на обслуговування конструктори часто мінімізують кількість рухомих елементів у вузлах трекера. Водночас, сучасні стратегії керування динамічно адаптують орієнтацію панелей залежно від нерівностей рельєфу, характеру хмарності та сезонної зміни схилення Сонця [18]. Інтеграція інфраструктури Інтернету речей та хмарних сервісів забезпечує дистанційний моніторинг, діагностику несправностей та предиктивне обслуговування, тоді як моделі машинного навчання вдосконалюють прогнозування сонячної радіації та адаптивно оптимізують рухи трекера для підтримання пікової продуктивності [19].

1.2 Програмне забезпечення та алгоритм роботи

Програмне забезпечення, що керує сонячною трекінговою установкою, визначає точність орієнтації панелей, ефективність використання виконавчих механізмів та швидкість реакції на змінні екологічні параметри. Його основна функціональність охоплює безперервний збір та обробку геолокаційної інформації від модулів GNSS поряд з даними, що надходять у реальному часі від датчиків освітленості, температури та швидкості вітру, на основі яких обчислюються оптимальні кут нахилу та азимут панелей з використанням усталених астрономічних формул, доповнених оперативними даними від сенсорів [20]. Паралельно система здійснює реєстрацію експлуатаційних параметрів та станів пристроїв у внутрішній пам'яті або на зовнішніх серверах, а також забезпечує людино-машинний інтерфейс через вбудовані дисплеї, веб-панелі або мобільні застосунки [21].

Внутрішня структура програмного коду організована у вигляді дискретних, функціонально-специфічних модулів, відповідальних відповідно за комунікацію з апаратним забезпеченням, розрахунок орієнтації, керування двигунами, взаємодію з користувачем та діагностику несправностей [22]. Під час роботи програмне забезпечення виконує початкову процедуру завантаження, після чого переходить до циклічного процесу опитування датчиків, аналізу отриманих даних, математичного прогнозування положення Сонця, модуляції приводу із замкнутим контуром, що враховує як статичні, так і динамічні навантаження, та, нарешті, архівування або передачі зібраних показників продуктивності [23]. Для забезпечення дистанційного контролю та розширеної аналітики багато сучасних реалізацій доповнюють цю архітектуру хмарними сервісами, що забезпечують моніторинг у реальному часі, візуалізацію даних, прогнозування виробітку енергії та безперебійне оновлення програмного забезпечення "по повітрю" [24, 25].

Досягнення надійної продуктивності в умовах обмежених обчислювальних ресурсів та обсягу пам'яті вбудованих мікроконтролерів вимагає ретельної

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації алгоритмів для забезпечення детермінованого виконання, мінімального обсягу коду та низького енергоспоживання, зберігаючи при цьому гнучкість конфігурації та масштабованість інтеграції додаткових апаратних або програмних можливостей. Таким чином, така строга, модульна програмна архітектура є незамінною для максимізації як ефективності, так і довготривалої надійності енергетичних систем із сонячним стеженням [26].

1.3 Висновки до першого розділу

В межах першого розділу було ретельно розглянуто низку важливих питань, щоб визначити значення та потенційні переваги використання сонячних трекерів у сучасних системах сонячної енергетики. Для початку була підкреслена актуальність автоматизованих систем орієнтації сонячних панелей, що демонструє їх зростаючу роль у забезпеченні високої ефективності перетворення сонячного випромінювання завдяки здатності адаптуватися до змінних умов довкілля.

Аналізуючи концепцію побудови ефективного сонячного трекера, було виявлено низку важливих факторів, що визначають вибір оптимальної конфігурації обладнання, таких як правильний підбір мікроконтролера, інтеграція з GPS-модулями та сенсорами освітленості, а також використання надійних механічних вузлів для забезпечення стійкості конструкції.

Також було визначено та проаналізовано конкретні функції програмного забезпечення, необхідні для максимально ефективного використання можливостей сонячного трекера, такі як точне позиціонування панелей, швидке реагування на зміну погодних умов, моніторинг стану системи та інтеграція з віддаленими хмарними сервісами. У результаті розгляду цих питань стає очевидним, що комплексний підхід до розробки сонячних трекерів, який включає апаратну та програмну оптимізацію, має значний потенціал для підвищення продуктивності, надійності й автономності сонячних енергетичних систем, що є важливим кроком на шляху до ефективного впровадження відновлюваних джерел енергії в сучасній енергетиці.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO

2.1 Архітектура системи

Архітектура автоматизованої системи (рисунок 2.1) сонячного трекера побудована так, щоб забезпечити надійну та ефективну взаємодію між усіма її компонентами – як апаратними, так і програмними. Основна мета системи полягає в автоматичному орієнтуванні сонячної панелі на Сонце протягом усього світлового дня для максимального збору сонячної енергії. Це дозволяє суттєво підвищити продуктивність установки, зменшити втрати енергії та забезпечити автономну роботу навіть у складних польових умовах.

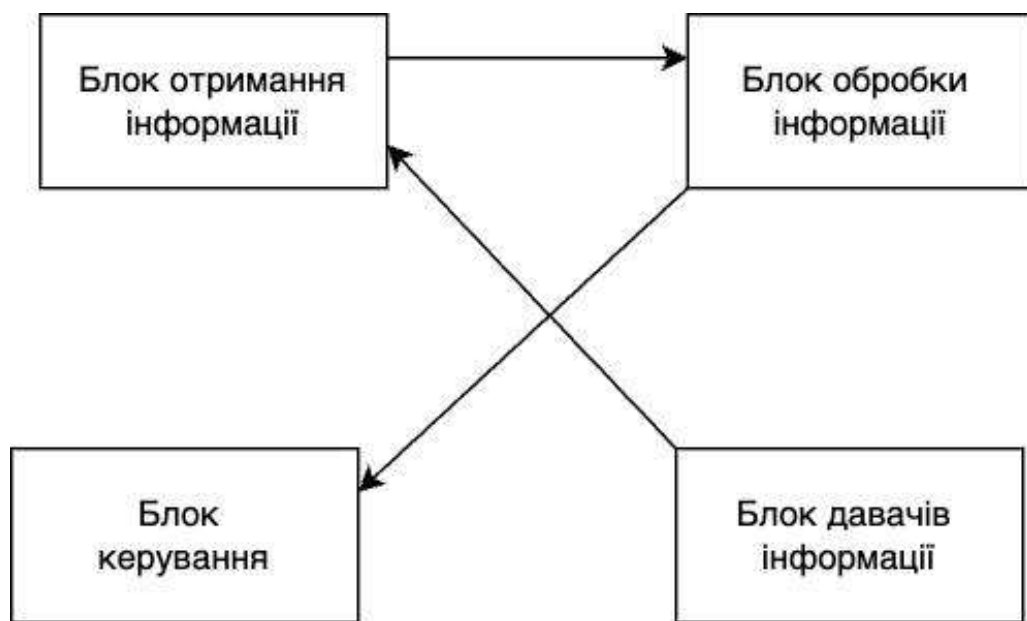


Рисунок 2.1 – Архітектура кіберфізичної системи

Центральним елементом архітектури виступає мікроконтролер, який координує всю роботу системи. Він обробляє сигнали від сенсорів, приймає дані з GPS-модуля, виконує розрахунки положення Сонця на небі та керує приводами, змінюючи положення панелі відповідно до поточних координат.

Для отримання точних координат використовується GPS-модуль. Ці дані використовуються для астрономічного розрахунку азимуту та висоти Сонця. У разі недостатньої точності GPS або для локальної корекції орієнтації застосовується блок фоторезисторів, що дає змогу системі реагувати на зміну інтенсивності освітлення в реальному часі та обирати напрямок з найвищим рівнем сонячного випромінювання.

Для переміщення панелі в горизонтальній площині (азимутальне обертання) застосовується кроковий двигун. У парі з ним використовується драйвер, який дозволяє точно керувати кроками та мікрокроками двигуна, забезпечуючи плавність руху та захист від перевантаження.

Для зміни кута нахилу панелі (висоти) використовується серводвигун. Серводвигуни мають вбудовану систему зворотного зв'язку, завдяки чому вони можуть точно втримувати панель у заданому положенні, що особливо важливо в динамічному режимі зміни освітлення.

Система живиться (рисунок 2.2) від акумуляторної батареї типу 1S Li-ion з номінальною напругою 3.6 В. Для зниження напруги до рівня, необхідного для стабільної роботи мікроконтролера та інших модулів, використовується DC-DC перетворювач. За потреби система може бути доповнена сонячною панеллю та контролером заряду для забезпечення повної енергонезалежності.

Комунікація між модулями забезпечується через інтерфейси UART (для GPS), PWM (для сервопривода) та цифрові шини з контролем імпульсів для крокового драйвера. У майбутньому архітектура дозволяє легко розширювати функціонал за рахунок використання шини I2C або SPI для підключення додаткових сенсорів, дисплеїв чи модулів зв'язку.

Програмна частина створена на базі Arduino IDE і складається з кількох функціональних блоків: ініціалізація пристроїв, зчитування сенсорних даних, астрономічні розрахунки положення Сонця, прийняття рішення про рух, формування сигналів керування та моніторинг стану системи.

У підсумку архітектура автоматизованого сонячного трекера з використанням крокового двигуна дозволяє забезпечити надійне та точне стеження за Сонцем. Завдяки високому крутному моменту та мікрошаговому режиму роботи двигуна забезпечується плавний і точний рух панелі, навіть при впливі зовнішніх факторів, таких як вітер чи нерівномірне навантаження.

Така конструкція є гнучкою, масштабованою та придатною до використання в реальних польових умовах як для приватного домогосподарства, так і для малих автономних сонячних станцій.

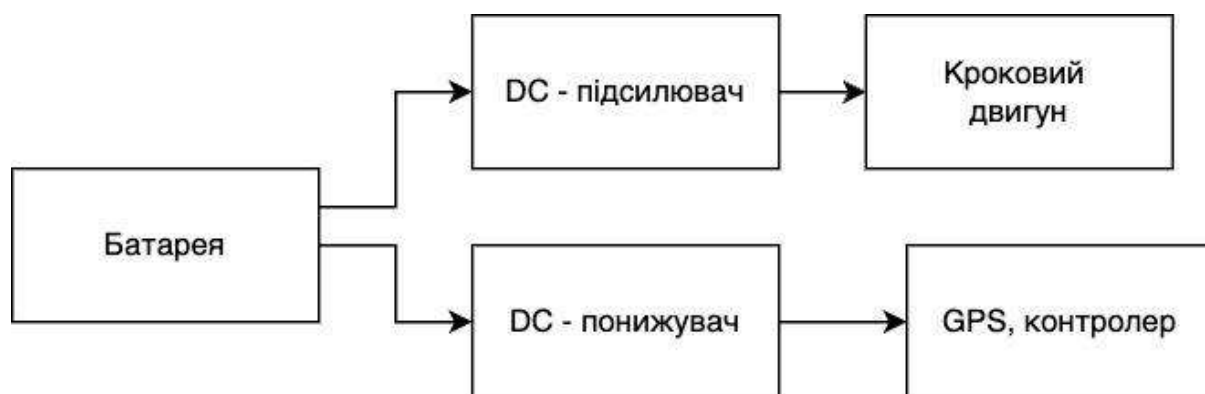


Рисунок 2.2 – Схема живлення компонентів системи

2.2 Логіка роботи сигнальної частини системи

Одними з найпоширеніших технологій, які забезпечують взаємодію між мікроконтролером та периферійними пристроями, є UART, I2C та PWM. Хоча ці інтерфейси істотно відрізняються за призначенням, принципами роботи та реалізацією, кожен із них виконує унікальну функцію в архітектурі пристрою й дозволяє налагодити ефективну й стабільну комунікацію між елементами системи.

UART, або асинхронний послідовний інтерфейс, забезпечує прямий двоточковий обмін даними між мікроконтролером і зовнішнім пристроєм, наприклад GPS-модулем. Його принцип роботи базується на передачі кожного біта інформації послідовно через один сигнальний провід, без супроводу тактового

імпульсу(Рисунок 2.3). Ініціатор і приймач повинні бути попередньо узгоджені за швидкістю передавання, яка зазвичай визначається в бодах.

Передача інформації відбувається шляхом генерації послідовності логічних рівнів, де кожне повідомлення містить стартовий біт, набір інформаційних бітів, опціональний біт парності та стоповий біт. Така структура дозволяє розпізнавати межі кожного символу та відновлювати інформацію навіть у разі короткочасного шуму на лінії.

Завдяки простоті реалізації UART став універсальним рішенням для обміну із зовнішніми модулями, що не вимагають високої швидкості, але потребують надійного з'єднання. У контексті сонячного трекера UART використовується для стабільного надходження координат, часу та допоміжної інформації з навігаційного пристрою.

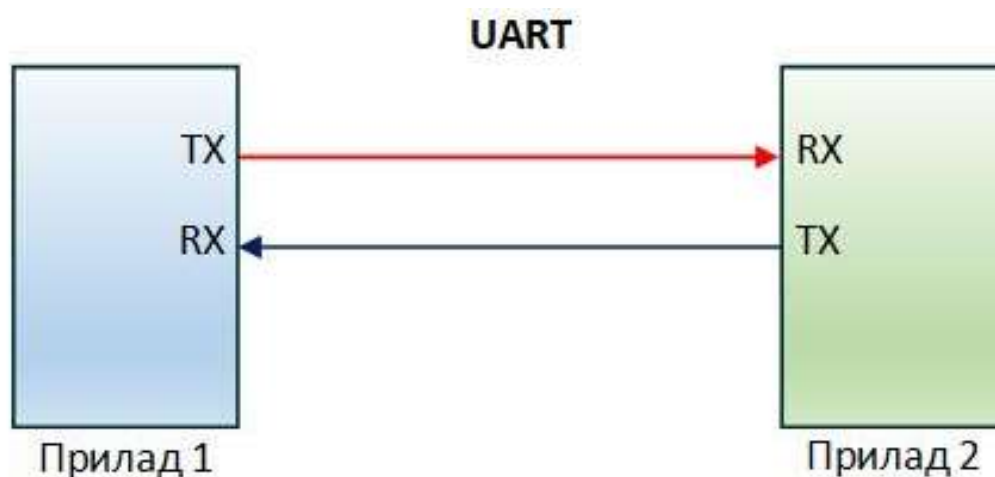


Рисунок 2.3 – Передача інформації по шині UART [27]

На відміну від UART, інтерфейс I2C (Inter-Integrated Circuit) передбачає синхронну передачу даних із використанням двох провідників: один відповідає за передачу сигналів даних, інший – за передачу тактових імпульсів (Рисунок 2.4). Цей інтерфейс дозволяє під'єднувати до однієї шини одразу кілька пристроїв, де кожен має свій унікальний адресний простір. Координацію обміну здійснює головний пристрій, яким зазвичай є мікроконтролер. У процесі обміну передається адреса потрібного пристрою, після чого здійснюється або читання, або запис.

Завдяки такій структурі I2C шина дає змогу економити піновий простір мікроконтролера та спрощує топологію з'єднання на друкованій платі. У проекті трекара через I2C зчитуються дані з компаса, а при необхідності можуть додатково підключатися й інші сенсори або дисплеї без потреби у зміні апаратної архітектури.

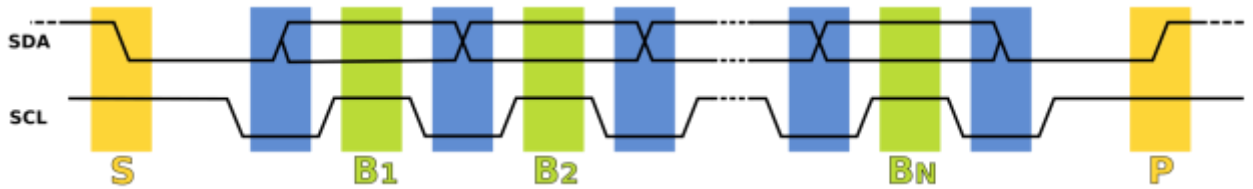


Рисунок 2.4 – Схема передачі інформації по I2C шині [28]

Третім важливим механізмом у складі системи є широтно-імпульсна модуляція, або PWM (Pulse Width Modulation) (Рисунок 2.5), яка слугує способом передачі аналогової інформації через цифрові пульсуючі сигнали.

Мікроконтролер формує послідовність імпульсів із фіксованою частотою, але змінною тривалістю кожного імпульсу. Саме ця тривалість визначає середнє значення напруги на виході. Завдяки інерційним властивостям електричних і механічних систем, сприймається не окремий імпульс, а усереднене значення сигналу, що дозволяє керувати швидкістю, кутом або положенням виконавчого пристрою.

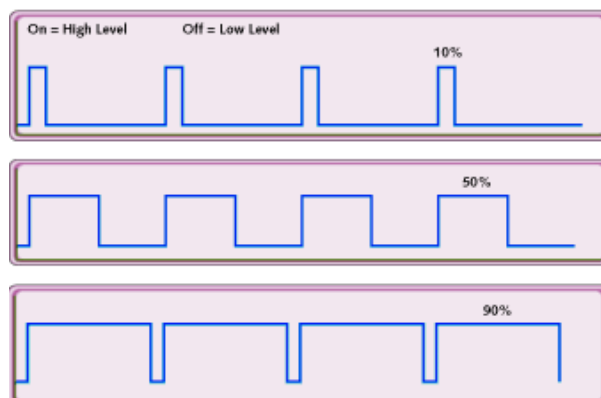


Рисунок 2.5 – Схема роботи PWM сигналу [29]

В рамках системи сонячного трекера PWM-сигнал використовується для керування серводвигуном MG90S, який приймає команду у вигляді імпульсу певної тривалості та встановлює вал у відповідне положення, забезпечуючи плавне та точне регулювання кута нахилу панелі.

Усі три технології є взаємодоповнюючими у контексті побудови інтегрованої автоматизованої системи. Вони забезпечують обмін даними, отримання зворотного зв'язку й реалізацію активних керуючих впливів, створюючи міцний фундамент для взаємодії мікроконтролера з сенсорами, приводами та допоміжними електронними блоками. Гармонійне поєднання цих інтерфейсів у єдиній архітектурі системи демонструє ефективність сучасних принципів кіберфізичного проектування.

2.3 Аналіз та вибір компонентів системи

Почнемо з того, що потрібно проаналізувати усі потрібні нам компоненти, вибрати ті, які найбільше підходять для нашої кіберфізичної системи.

2.3.1 Мікроконтролер

У межах розробки сонячного трекера важливо було обрати такий мікроконтролер, який би справлявся з усіма основними завданнями, а саме: прийом даних від сенсорів, розрахунок положення Сонця, формування керуючих сигналів для двигунів, і при цьому залишався надійним, простим в роботі та не потребував великої кількості енергоживлення.

Вибір став між Arduino Nano, Arduino Uno, Raspberry Pi Zero W та ESP32, кожен з яких має відмінні характеристики, що визначають їхню ефективність за певних умов. Основні характеристики приведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики мікроконтролерів для системи сонячного трекінгу

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

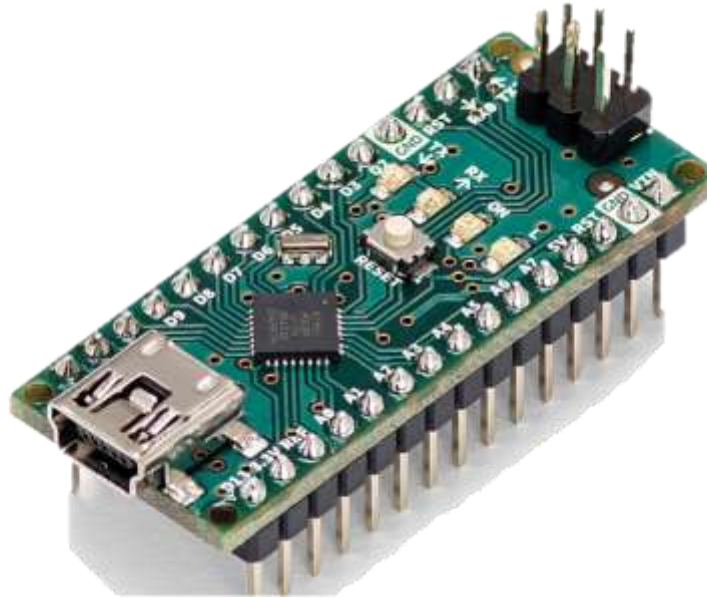


Рисунок 2.6 – Arduino Nano [30]

Arduino Nano (Рисунок 2.6) відзначається мінімалістичним форм-фактором із розмірами 45×18 мм і масою близько 7 г, що робить її оптимальною для вбудованих і портативних застосунків, де важливий кожен міліметр. У контролері ATmega328P із тактовою частотою 16 МГц поєднуються 32 КБ флеш-пам'яті, з яких 2 КБ зайнято bootloader'ом; 2 КБ статичної оперативної пам'яті і 1 КБ EEPROM для зберігання налаштувань і даних користувача. Живлення може здійснюватися як від USB-порту, так і через високовольтний вхід (7-12 В), а на борту передбачені стабілізовані виходи 5 В і 3,3 В для підключення датчиків і периферії.

Arduino Uno (Рисунок 2.7), навпаки, має класичний розмір плати $68,6 \times 53,4$ мм і масу близько 25 г, що забезпечує більшу стійкість при монтажі на макетній платі або в корпусі. Її апаратною основою також є ATmega328P, але флеш-пам'ять у повному обсязі (32 КБ), 2 КБ SRAM і 1 КБ EEPROM реалізуються без обмежень bootloader'ом.

Для зручності користувача Uno оснащена вбудованим USB-to-serial конвертером, роз'ємом живлення, роз'ємами ICSP і кнопкою reset: це спрощує підключення до ПК та інтеграцію в стійкіші прототипи без додаткових перехідників.



Рисунок 2.7 – Arduino Uno [31]

Порівняння обох плат свідчить, що Nano забезпечує компактне рішення з широкою підтримкою периферії водночас легко інтегруючись у невеликі пристрої, тоді як Uno пропонує розширений простір для пайки й додаткові інтерфейси, необхідні для серійних макетів і промислових прототипів. Обидві платформи підтримують однаковий набір програмних бібліотек Arduino IDE, що уніфікує процес розробки, але вибір між ними має базуватися на вимогах до габаритів, конструктивної надійності та необхідності розширених апаратних інтерфейсів.

Raspberry Pi Zero W (Рисунок 2.8) є мінімалістичною версією одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, вперше представлена у лютому 2017 року з метою надання надкомпактної платформи для вбудованих і IoT-застосунків. Серцем пристрою виступає одномодульна система Broadcom BCM2835, що поєднує 1-гігагерцевий одиядерний процесор ARM11 та графічне ядро VideoCore IV, здатне апаратно прискорювати обчислення OpenGL ES 1.1 і 2.0. Обсяг оперативної пам'яті LPDDR2 SDRAM становить 512 МБ, що забезпечує достатню швидкодію для розгортання легких Linux-дистрибутивів та виконання скриптів мов високого

рівня. Завантаження операційної системи та користувацьких даних відбувається зі знімної microSD-картки, що додає гнучкості в налаштуванні середовища виконання та оновленні програмного забезпечення.



Рисунок 2.8 – Raspberry Pi Zero W [32]

Унікальною особливістю Zero W стало вбудоване радіомодульне рішення, яке підтримує бездротовий зв'язок IEEE 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.1 із низьким енергоспоживанням, усуваючи потребу в зовнішніх USB-адаптерах і одночасно зберігаючи ультранизький профіль плати¹. Інтерфейсні можливості охоплюють міні-HDMI для цифрового відеовиходу, micro-USB-OTG для підключення периферії та micro-USB-порт живлення, а також CSI-роз'єм для підключення камери. Незважаючи на те, що стандартний 40-контактний GPIO-хедер не розпаяний за замовчуванням, передбачені пайовані виводи дозволяють реалізувати широкий спектр цифрових та аналогових підключень.

Габарити плати (66,0 × 30,5 × 5,0 мм) і вага близько 9 г роблять Zero W ідеальною платформою для носимих пристроїв, дронів та інших компактних систем, у яких критичним є мінімізація розмірів і маси. При цьому типове енергоспоживання в режимі очікування не перевищує 0,7 Вт, що дозволяє експлуатувати пристрій від невеликих акумуляторних блоків або сонячних панелей у автономних системах моніторингу.

Завдяки відкритому апаратному дизайну та широкій підтримці спільноти Raspberry Pi Zero W поєднує доступність, гнучкість і надійність, необхідні для наукових досліджень і промислових прототипів.

Мікроконтролер ESP32 (рисунок 2.9), розроблений компанією Espressif Systems, базується на подвійному 32-бітному процесорі Tensilica® Xtensa® LX6 із тактовою частотою до 240 МГц на кожне ядро, що забезпечує загальну обчислювальну потужність до 600 DMIPS. Вбудовані ресурси пам'яті складаються з 520 КБ оперативної SRAM, 448 КБ ROM та додаткових 16 КБ RTC-SRAM, призначених для виконання завдань у режимах з наднизьким енергоспоживанням. Інтегровані бездротові підсистеми підтримують протокол IEEE 802.11 b/g/n у діапазоні 2,4 ГГц та двомодовий Bluetooth 4.2 із можливістю одночасної роботи як Classic, так і Low Energy профілів.



Рисунок 2.9 – ESP32 [33]

Переферійні можливості включають до 34 програмованих GPIO, ємнісні сенсорні входи (до десяти каналів), два 12-бітні SAR-АЦП із можливістю опрацювання до 18 аналогових сигналів і декілька каналів ЦАП. Підтримка комунікаційних інтерфейсів охоплює кілька шин SPI, I2C та I2S, численні UART-канали, інтерфейс SDIO для карт пам'яті та eMMC, а також Ethernet MAC із підтримкою IEEE 1588 і контролер CAN Bus, що забезпечує універсальне підключення периферії й високошвидкісну передачу даних. Система управління

живленням із вбудованим ультранизьковольтовим співпроцесором дає змогу реалізувати динамічне масштабування частоти й напруги та переводити пристрій у режими глибокого сну з струмом всього близько 5 μ A. Безпека платформи гарантується завдяки механізмам secure boot, шифруванню флеш-пам'яті, одноразовій програмуваній OTP-пам'яті та апаратним прискорювачам для алгоритмів AES, SHA-2, RSA і ECC. Можливості зовнішнього розширення пам'яті через інтерфейс QSPI дозволяють підключати до 16 МБ флеш-модулів і додаткову PSRAM, що значно підвищує обсяг доступного сховища даних.

Після ретельного порівняльного аналізу та врахування специфічних вимог даного проєкту сонячного трекера було обрано Arduino Nano. Вибір Arduino Nano ґрунтується на оптимальному балансі між компактністю, простотою інтеграції з різноманітними сенсорами та виконавчими механізмами, низьким енергоспоживанням та легкістю програмування. Даний мікроконтролер забезпечує достатню кількість портів для підключення ключових компонентів, таких як GPS-модулі, датчики освітленості, крокові двигуни та сервоприводи, що забезпечує надійну роботу та точне позиціонування сонячних панелей. Таким чином, враховуючи всі вищезазначені фактори, Arduino Nano представляє найбільш раціональне та ефективне рішення для створення автономної та компактної системи сонячного стеження. Даний вибір підтверджується широким застосуванням Arduino Nano в аналогічних інженерних проєктах.

2.3.2 Кроковий двигун

Кроковий двигун – це електричний двигун, який обертається не плавно, а по кроках. Один повний оберт вала поділений на певну кількість кроків. Кожен крок відбувається після подачі керуючого сигналу з драйвера, тому можна точно контролювати кут обертання, не маючи зворотного зв'язку. Крокові двигуни ідеально підходять для позиціонування у системах, де потрібна точність,

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передбачуваність та стабільність, особливо в умовах, коли немає датчика положення.

Кроковий двигун у конструкції трекера виконує завдання точного обертання сонячної панелі в горизонтальній площині - тобто реалізує стеження за азимутом Сонця. Це обертання повинно бути повільним, але дуже точним, із можливістю зафіксувати положення панелі в заданому напрямку без зворотного прокручування чи тремтіння. Важливо також, щоб привід міг утримувати свою позицію, навіть без механічного стопора, що характерно саме для крокових двигунів.

Саме тому вибір було зосереджено на кроковому двигуні типу NEMA 17, який поєднує в собі високу точність, механічну стабільність та просту інтеграцію з мікроконтролерними системами.

NEMA 17 (Рисунок 2.10) став технічно обґрунтованим рішенням через свою здатність обертатися з дискретним кутом у 1.8° на кожен крок. Завдяки мікрокроковому режиму, який реалізується через драйвер A4988 (Рисунок 2.11), можна досягти ще вищої роздільної здатності аж до 0.1125° на крок, що є більш ніж достатнім для системи, де зміна положення відбувається поступово протягом дня. Ключовим чинником також стала можливість утримання позиції без зовнішніх зворотних зв'язків чи гальмівних механізмів. Після завершення обертання кроковий двигун залишається у статичному стані, створюючи магнітне поле в обмотках, яке протидіє випадковому зсуву положення.



Рисунок 2.10 – Кроковий двигун NEMA 17 [34]

Порівняння з іншими кроковими двигунами наведено в таблиці 2.2.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Порівняльні характеристики крокових двигунів для кіберфізичної системи

Параметр	NEMA 14	NEMA 17	NEMA 23
Габарити фланця	~35×35 мм	~42×42 мм	~57×57 мм
Довжина корпусу	20–35 мм	34–48 мм	55–115 мм
Крок (Step angle)	1.8°	1.8°	1.8°
Крутний момент (holding)	~0.1–0.25 Н·м	~0.3–0.6 Н·м	~1.0–2.5 Н·м
Струм фази	~0.4–1.0 А	~1.0–1.5 А	~2.0–3.5 А
Напруга живлення	5–12 В	12–24 В	24–48 В
Сфера застосування	Принтери, малі приводи	3D-принтери, CNC, трекери	Важкі CNC, промислова автоматика
Споживання енергії	Низьке	Середнє	Високе
Ціна (середня)	Низька	Помірна	Висока

Практичний досвід показав, що NEMA 17 легко справляється з навантаженням, яке створює сонячна панель малого або середнього розміру. При правильному передавальному механізмі або редукторі його крутного моменту вистачає, щоб обертати конструкцію з потрібною плавністю та точністю, навіть у разі помірного тертя в шарнірах чи направляючих. До того ж, двигун чудово працює в поєднанні з напругою 12 В, яку забезпечує попередньо підібраний підвищувальний перетворювач, і стабільно тримає навантаження при струмі до 1.2 А на фазу, що цілком вкладається у можливості драйвера A4988 (Рисунок 2.11).

Ще одним важливим аргументом на користь вибору саме цього типу двигуна стала його популярність і стандартизація. NEMA 17 - це індустріальний формат, який використовується у 3D-принтерах, ЧПУ-верстатах і інших точних пристроях. Завдяки цьому для нього легко знайти кріплення, муфти, вали, а також

документацію й приклади підключення, що значно спрощує практичну реалізацію трекера в умовах обмеженого бюджету або часу.



Рисунок 2.11 – Драйвер крокового двигуна A4988 [35]

Порівняно з іншими рішеннями, такими як серводвигуни або звичайні двигуни постійного струму, кроковий двигун NEMA 17 виграє за рахунок відкритої архітектури, прогнозованої поведінки та високої точності навіть без зворотного зв'язку. У той час як серво потребує складного ПІД-регулювання або обмежується кутом 180° , а двигуни постійного струму вимагають енкодера для визначення положення, кроковий двигун працює просто, надійно і передбачувано.

2.3.3 Серводвигун

У межах розробки автоматизованого сонячного трекера було поставлене завдання реалізувати механізм, який дозволить змінювати кут нахилу сонячної панелі у вертикальній площині – тобто слідкувати за тим, як Сонце змінює свою висоту над горизонтом протягом дня. Для реалізації цієї функції ми мали вибір між двома основними типами серводвигунів: обмеженого обертання (зазвичай $0-180^\circ$) і повного обертання, тобто повного обертання.

Вибір було зроблено на користь стандартного сервоприводу з кутом повороту до 180° , такого як SG90 або MG90S. Цей вибір був цілком обґрунтованим як з технічної, так і з алгоритмічної точки зору.

По-перше, варто розуміти принципову різницю між двома типами сервоприводів. Серводвигуни на 180° мають вбудований потенціометр, який надає зворотний зв'язок щодо поточного кута, і сам контролер двигуна точно позиціонує вісь у задане положення. У той час серво на 360° не призначене для позиціонування, воно працює як редукторний двигун, де сигнал широтно-імпульсної модуляції лише задає швидкість і напрямок обертання, а не конкретний кут. Зворотного зв'язку про положення валу в такому моторі немає.

Тому, при використанні сервоприводу на 360° нам би довелося реалізовувати повноцінну систему зворотного зв'язку через додаткові датчики положення, наприклад енкодер або потенціометр. Це суттєво ускладнило б конструкцію, підвищило споживання енергії, вимоги до програмного забезпечення та додало потенційних точок відмови.

Із прикладної точки зору, кут в 180° є більш ніж достатнім для зміни нахилу сонячної панелі протягом дня. Сонце змінює висоту над горизонтом приблизно від 0° на світанку до максимуму в zenіті (наприклад, $60-70^\circ$ улітку в Україні). Це означає, що реальний робочий діапазон кута нахилу панелі за день зазвичай не перевищує 90° , а іноді достатньо й $60-70^\circ$. Тобто сервопривід із діапазоном до 180° має великий запас для адаптації до змін кута сонячного освітлення впродовж усього року.

Крім того, 180 -градусні серво мають вбудовану функцію утримання положення завдяки зворотному зв'язку, що дозволяє панелі залишатись у фіксованому положенні без постійного корегування. У 360° -серво такої функції немає, через те, що у ньому вал обертається без обмеження, і двигун не має інформації, де саме він зараз знаходиться.

Також важливо зазначити, що серво на 180° легко інтегрується з Arduino, оскільки вона має стандартні бібліотеки, що дозволяють керувати кутом напряду.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.12 – MG90S [36]

MG90S, будучи мікросерводвигуном з обмеженим кутом обертання, оснащений вбудованим потенціометром і мікроконтролером, що дозволяє здійснювати керування положенням вала за допомогою простого PWM-сигналу. Важливою перевагою цього сервоприводу є наявність внутрішньої системи зворотного зв'язку, завдяки чому двигун автоматично утримує вал у заданому положенні без потреби зовнішніх енкодерів або складних ПІД-регуляторів. У нашій системі це означає, що навіть за умови короткочасного поривчастого вітру чи вібрації конструкції, серво залишиться в потрібному положенні, що гарантує точне спрямування панелі на Сонце.

Причина вибору саме MG90S полягає також у його збалансованих характеристиках. Його крутного моменту (понад 2 кг·см при 5 В) достатньо для зміни положення невеликої сонячної панелі або важільного механізму з відповідною передачею. При цьому він залишається достатньо компактним і енергоефективним - зазвичай споживання не перевищує 250–300 мА під час активного обертання, що не є критичним для системи, яка живиться від 1S Li-ion

батареї через стабілізатор. Ще одна перевага - це його сумісність із Arduino Nano, яку ми використовуємо в основі системи.

Варто зазначити, що при тестуванні SG90 –пластикової версії цього серво спостерігалось певне тремтіння та люфт під навантаженням. MG90S, завдяки металевому редуктору, позбавлений цих недоліків і має значно більший ресурс зносостійкості, що важливо при щоденній експлуатації на відкритому повітрі, в умовах вологи, пилу і змін температури. Він також менше піддається пошкодженням в умовах тривалого навантаження, оскільки внутрішні компоненти мають підвищену термостійкість та кращу передачу моменту.

Розгляд інших альтернатив, таких як MG995 чи серво на 360 градусів, не дав переваг у нашій ситуації. Потужні MG995 вимагають значно більше місця, важать в декілька разів більше та споживають більше струму, що суперечить принципу енергоефективності автономної системи. А серво з безперервним обертанням не мають функції позиціонування, тобто не можуть точно утримувати панель під заданим кутом, що критично для нашої задачі.

2.3.4 Компас та GPS-модуль

У системі було прийнято рішення використовувати комбінований модуль HGLRC M10(Рисунок 2.13) з інтегрованим компасом QMC5883L. Основною перевагою даного модуля є поєднання двох ключових функцій в одному пристрої – точного визначення координат завдяки GPS-приймачу на базі u-blox M10, а також визначення орієнтації установки в просторі через тривісний цифровий компас QMC5883L, який уже інтегрований у друковану плату. Це дозволяє відмовитися від використання окремих модулів для навігації та орієнтації, що не лише скорочує кількість підключень і провідників, але й знижує ймовірність помилок монтажу, перешкод від близько розміщених джерел шуму та загальну вагу блоку сенсорів.

Порівняння з іншими GPS та компасами наведено в таблиці 2.4.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Порівняльні характеристики GPS та компасів для кіберфізичної системи

Характеристика	Arduino Nano	Arduino Uno	Raspberry Pi Zero W	ESP32
Частота оновлення (Hz)	До 5 Гц	До 10 Гц	До 10 Гц	До 10 Гц
Кількість каналів	22	72	72	72
Підтримка супутників	GPS	GPS, GLONASS, Galileo, QZSS	GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS	GPS, GLONASS
Холодний старт	~27 сек	~26 сек	~24 сек	~26 сек
Гаряча фіксація	~1 сек	~1 сек	<1 сек	~1 сек
Компас	Немає	Немає	QMC5883L	HMC5883L
Інтерфейс	UART	UART, I2C	UART, I2C	UART, I2C
Напруга живлення (В)	3.3–5 В	3.3–5 В	3.3–5.5 В	3.3–5 В
Розміри (мм)	~25×35	~18×18	~18×18	~28×28
Частота оновлення (Hz)	До 5 Гц	До 10 Гц	До 10 Гц	До 10 Гц
Кількість каналів	22	72	72	72

GPS-приймач на основі чіпа M10 забезпечує високу чутливість і швидкий час фіксації, що є перевагою при періодичних запусканнях системи без постійного живлення. Модуль підтримує мультисистемний прийом супутників, включаючи GPS, BeiDou, Galileo та QZSS, що особливо корисно для забезпечення стабільної роботи в різних зонах або при частковому перекритті горизонту. Завдяки цьому координати трекера завжди визначаються точно і швидко, незалежно від зовнішніх

умов, що дозволяє з високою достовірністю обчислювати поточний астрономічний азимут і висоту Сонця.

Вбудований магнітометр QMC5883L, у свою чергу, доповнює GPS, забезпечуючи визначення орієнтації самого трекера щодо магнітної півночі, що особливо важливо для коректної ініціалізації положення панелі після запуску або збою. Це дозволяє алгоритму точно знати, в який бік повернена платформа на початку роботи, і синхронізувати реальні обчислення з фізичним положенням об'єкта.



Рисунок 2.13 – HGLRC M100 [37]

Ще однією суттєвою перевагою модуля HGLRC є мала вага, компактність та наявність активної керамічної антени, яка покращує якість прийому сигналу супутників без необхідності додаткових антен. Наявність стандартизованого виходу спрощує підключення до Arduino Nano – GPS працює через стандартний серійний порт, а компас – через I2C-шину, сумісну з іншими сенсорами системи.

2.3.5 Фоторезистор

У системі автоматизованого сонячного трекера фотосенсори відіграють ключову роль, адже саме вони допомагають «бачити» світло і визначати, в який бік

слід орієнтувати панель. Щоб система працювала ефективно, важливо обрати такі сенсори, які не лише точно реагують на зміну освітлення, а й будуть простими у використанні, і легко підключатимуться до мікроконтролера. Через це, для реалізації було обрано фоторезистори типу LDR (Рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – LDR фоторезистор [38]

Фоторезистори змінюють свій опір залежно від кількості світла, що на них потрапляє: чим більше світла, тим менший опір. Це дозволяє системі швидко зрозуміти, де зараз найяскравіше, і відповідно повернути панель у цей бік. У трекері використовується кілька таких сенсорів, розміщених по кутах – наприклад, у вигляді «хреста», навколо невеликого екрана, який створює тінь. Така проста конструкція дозволяє точно визначати напрямок на Сонце без складних обчислень або додаткових приладів.

Хоча фоторезистори й не найшвидші з точки зору реакції на зміну світла (у порівнянні з фотодіодами), у контексті сонячного трекера це не є проблемою. Рух Сонця відбувається повільно, тож і надмірна чутливість не потрібна. Навпаки, деяка інерційність навіть корисна – вона допомагає уникнути частих і непотрібних поворотів панелі, що, у свою чергу, зменшує навантаження на двигуни й зберігає енергію.

Ще однією перевагою є простота використання фоторезисторів. Вони безпосередньо підключаються до аналогових входів Arduino Nano, не потребують складного налаштування, а їхня вартість настільки низька, що це дає змогу

реалізувати систему навіть із мінімальним бюджетом. Програмна логіка зчитування даних з таких сенсорів теж досить проста й легко реалізується навіть початківцем у роботі з мікроконтролерами.

З практичної точки зору, фоторезистори дуже зручні. Вони стабільно працюють у звичних погодних умовах, не потребують частого обслуговування, і навіть у разі виходу з ладу один можна швидко замінити. Це особливо важливо для систем, які розраховані на тривалу автономну роботу.

Варто зазначити, що використання фоторезисторів не виключає інших способів орієнтації. У поєднанні з GPS-модулем вони можуть створювати так звану «гібридну систему», де GPS надає координати і час, а фоторезистори коригують положення панелі, виходячи з реального освітлення. Такий підхід дозволяє досягти високої точності навіть у складних умовах, наприклад, при хмарності або частковому затіненні.

2.3.6 DC-DC перетворювачі

Живлення всієї системи забезпечується від акумулятора типу Li-ion конфігурації 1S, що дає на виході номінальну напругу близько 3.6 В із діапазоном від 4.2 В (повністю заряджена батарея) до приблизно 3.2 В (при розряді). Такий рівень напруги є некритичним для окремих компонентів, але в більшості випадків потребує додаткової стабілізації або трансформації. Саме тому архітектура живлення трекера включає два основних вузли перетворення напруги - понижувальний і підвищувальний DC-DC перетворювачі. Їх вибір і інтеграція стали не лише технічно необхідним, а й критичним етапом забезпечення стабільності та енергоефективності роботи всієї системи.

Першим компонентом у цій підсистемі виступає понижувальний перетворювач, що знижує напругу до стабільного рівня 5 В, необхідного для живлення систем обробки інформації, а саме мікроконтролера Arduino Nano, а також GPS-модуля, компаса, фоторезисторів, температурного сенсора та

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сервоприводу. Для цього завдання було обрано модуль MP1584, який вирізняється компактністю, високим коефіцієнтом корисної дії та здатністю стабільно витримувати струмові навантаження до 2.5 А.

У процесі відбору особливу увагу було звернено на те, як саме перетворювач поводить себе в умовах пульсуючого навантаження, зокрема, при імпульсному споживанні енергії сервоприводом. MP1584 (Рисунок 2.15) виявився достатньо стабільним для таких умов, не створюючи перешкод для роботи інших цифрових елементів та не допускаючи критичних просідань напруги. Його форм-фактор дозволив інтегрувати модуль безпосередньо на спільну монтажну плату без необхідності зовнішнього охолодження, що особливо важливо в умовах обмеженого простору.



Рисунок 2.15 – MP1584 [39]

Що ж до підвищувального перетворювача, то він необхідний для живлення рухомої частини системи – драйвера A4988, який у свою чергу керує кроковим двигуном типу NEMA 17. Цей двигун розрахований на роботу при напрузі не нижче 12 В, оскільки при зниженій напрузі суттєво погіршується його динаміка, зменшується крутний момент, і система може втрачати точність позиціонування. Саме тому для стабільної роботи мотора було вирішено використати boost-перетворювач на базі модуля XL6019 (Рисунок 2.16), який дозволяє піднімати вхідну напругу до 12 В і вище з високим коефіцієнтом ефективності та стабільністю

навіть при значному струмі навантаження. Важливо зазначити, що XL6019 також вирізняється хорошими параметрами фільтрації, а його робота не створює значних електромагнітних завад, що могло би негативно вплинути на точність GPS або магнітометра.

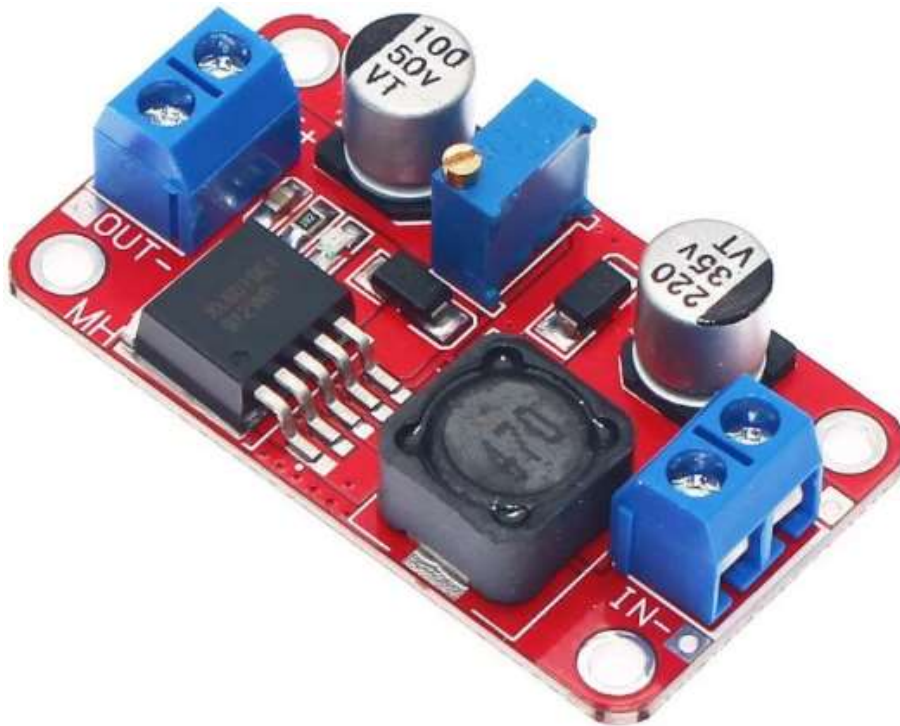


Рисунок 2.16 – XL6019 [40]

2.3.7 Плата заряджання

У системах автономного живлення на базі однієї літій-іонної комірки (1S), доцільним вибором плати зарядки є модуль на основі мікросхеми TP4056 (Рисунок 2.17) із вбудованими функціями захисту. Така плата здатна ефективно керувати процесом заряджання акумулятора від джерела постійного струму, зокрема від сонячної панелі з відповідними параметрами. Основна перевага TP4056 полягає в її простоті інтеграції, компактності та високому ступені надійності при відносно низькій вартості. Вона підтримує режим лінійного заряджання з обмеженням струму, а також передбачає автоматичне завершення процесу зарядки при

досягненні повної ємності, що захищає акумулятор від перезаряду – критично важливого чинника довговічності елементів живлення.

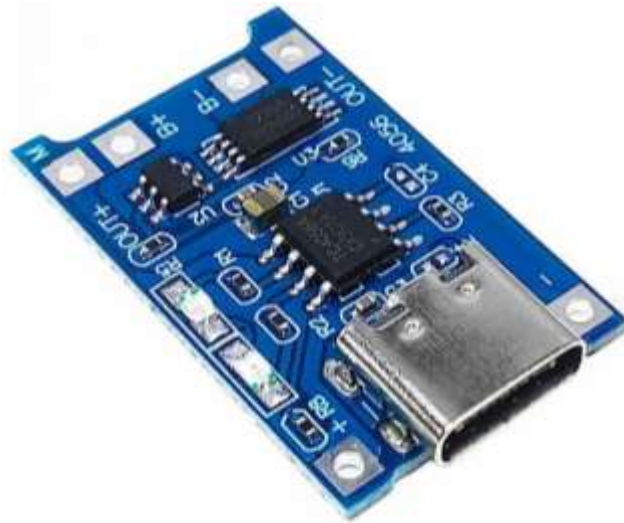


Рисунок 2.17 – TP4056 [41]

Окрім базової версії, модифікований варіант TP4056 з інтегрованою системою керування акумулятором (Battery Management System, BMS) забезпечує захист від глибокого розряду, короткого замикання, зворотної полярності та перевантаження по струму. У практичному сенсі це означає, що навіть у випадку нестабільного надходження енергії від сонячної панелі чи раптового стрибка навантаження система продовжить стабільну роботу без ризику пошкодження акумулятора. Такий модуль також дозволяє контролювати напругу на виході, захищаючи підключені пристрої – включно з мікроконтролером, сенсорами та приводами. У порівнянні з більш складними рішеннями, такими як MPPT-контролери або імпульсні зарядні схеми, TP4056 є ідеальним вибором для систем із помірним енергоспоживанням. Її компактність і простота дозволяють розмістити модуль навіть у мініатюрних корпусах, що є перевагою при побудові мобільних чи портативних пристроїв.



Рисунок 2.18 – Комірка живлення 18650 [42]

2.4 Висновки до другого розділу

У межах розділу 2 проведено аналіз архітектури апаратної частини системи сонячного трекера та обґрунтовано вибір основних її компонентів з урахуванням вимог до точності, надійності, енергоспоживання та компактності конструкції. У результаті аналізу сучасних мікроконтролерів було обрано Arduino Nano як центральний елемент керування завдяки його простоті програмування, достатній кількості входів/виходів, низькому енергоспоживанню та зручності інтеграції з іншими модулями.

Особливу увагу приділено вибору сенсорних елементів. Зокрема, обґрунтовано застосування GPS-модуля HGLRC M10 для забезпечення геоприв'язки в астрономічних розрахунках, а також компаса QMC5883L як засобу для уточнення орієнтації системи відносно магнітного поля Землі. Також аргументовано доцільність використання фоторезисторів для локального визначення напрямку максимальної інтенсивності освітлення.

Після ретельного порівняння приводів, для реалізації горизонтального обертання було вибрано кроковий двигун NEMA 17 у парі з драйвером A4988, що забезпечує високий крутний момент і точність позиціонування. Для зміни кута нахилу панелі обрано серводвигун MG90S, як оптимальний за габаритами, енергоспоживанням та точністю.

Окремо було проаналізовано підсистему живлення, де доцільним стало використання понижувального перетворювача MP1584 для стабілізації живлення

логічних модулів, підвищувального XL6019 для двигунів, а також TP4056 з BMS для зарядки акумулятора. Така схема забезпечує повну автономність системи, її енергоефективність та безпеку експлуатації в польових умовах.

Таким чином, обрані рішення дозволяють створити надійну, компактну і функціональну систему сонячного трекера з високим ступенем адаптивності до зовнішніх умов, що є основою для її подальшої програмної реалізації та впровадження в практичні задачі енергозабезпечення.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ GPS ТА ARDUINO

3.1 Опис алгоритму роботи модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу

Розробка алгоритму роботи системи сонячного трекера, побудованого на базі мікроконтролера Arduino Nano з використанням GPS-компаса, фоторезисторів, серводвигуна MG90S та крокового двигуна NEMA 17, є ключовим етапом проектування, оскільки саме він визначає логіку функціонування всієї системи у реальних умовах. Для досягнення максимальної ефективності енергозбирання, алгоритм має адаптуватися до змін положення Сонця впродовж дня, погодних умов і часу доби. Алгоритм формує двокомпонентну логіку – астрономічну та сенсорну, що разом забезпечують як прогнозовану орієнтацію, так і реакцію на реальні світлові умови.

Після запуску системи відбувається ініціалізація всіх модулів. Мікроконтролер проводить тестування підключених пристроїв – фоторезисторів, GPS-компаса HGLRC M10, крокового драйвера A4988, серводвигуна, а також перевіряє наявність напруги живлення. Далі виконується початкове встановлення положення панелі в "нейтральну" або стартову орієнтацію, що у більшості випадків відповідає положенню на схід при куті нахилу, близькому до горизонтального. Після цього мікроконтролер зчитує координати широти, довготи, а також точний UTC-час із GPS-модуля, а за допомогою магнітометра визначає орієнтацію відносно магнітного півночі.

Отримані координати використовуються для обчислення положення Сонця в небесній сфері. Використовуючи вбудовану реалізацію алгоритму, Arduino розраховує азимут та висоту Сонця відповідно до поточної дати й часу. Це значення потім порівнюється з фактичним положенням панелі, збереженим у пам'яті, і формується команда на обертання крокового двигуна на відповідну кількість

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кроків, яка приведе панель до нового положення по азимуту. У вертикальній площині система керує серводвигуном, що змінює кут нахилу за допомогою PWM-сигналу. Зазвичай, значення кута вираховується із формули висоти Сонця, але коригується відповідно до різниці в сигналах від фоторезисторів.

Фоторезистори розміщені в чотирьох напрямках по відношенню до панелі, утворюючи просторову матрицю, яка дозволяє виявляти, де інтенсивність світла максимальна. Якщо система виявляє, що один із фоторезисторів реєструє значно більший рівень освітлення, ніж інші, вона здійснює незначне регулювання положення панелі відповідно до цього напрямку. Такий механізм дозволяє враховувати локальні умови, як-от хмарність або часткове затінення.

Протягом дня система циклічно опитує сенсори кожні кілька секунд або хвилин залежно від режиму роботи та рівня освітленості. При настанні сутінок або повної темряви, коли фоторезистори фіксують низький рівень освітлення, а GPS передає час, що відповідає вечірньому періоду, система автоматично переводить панель у "нічне положення" – наприклад, горизонтально вниз або в бік із найменшим навантаженням. Це дозволяє знизити опір вітру й захистити механізм від зносу.

Удень, якщо протягом кількох циклів система не фіксує суттєвих змін у положенні Сонця або якщо освітлення стабільно високе і розподілене рівномірно, коригування не відбувається, щоб зменшити споживання енергії та продовжити ресурс двигунів. У разі збою з'єднання з GPS або порушення сигналу від фоторезисторів, система переходить в аварійний режим, використовуючи останні збережені координати або обираючи фіксоване положення до відновлення зв'язку.

Таким чином, запропонований алгоритм поєднує точність астрономічного позиціонування з чутливістю сенсорної корекції, забезпечуючи адаптивну й надійну орієнтацію панелі протягом усього світлового дня. Це дозволяє досягнути максимальної продуктивності системи при мінімальних енергетичних витратах на керування.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За даним алгоритмом було побудовано структурну схему, наведену на рисунку 3.1.

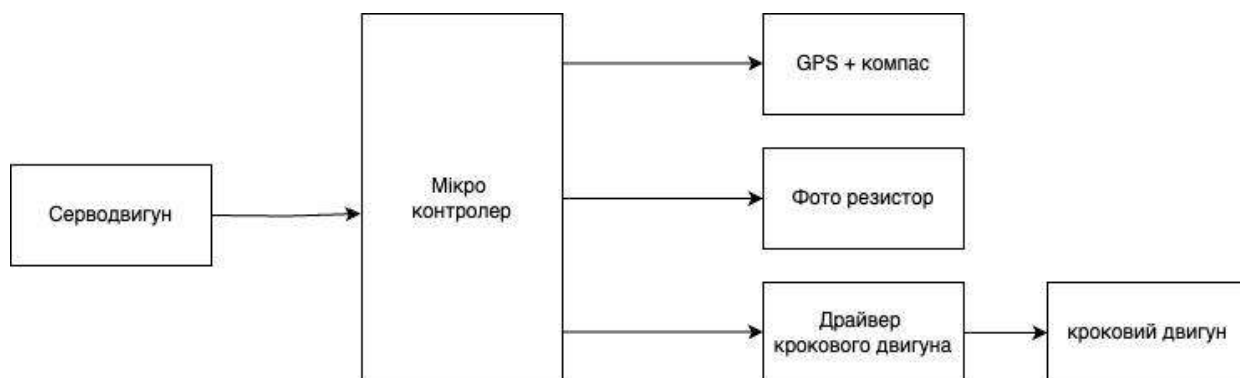


Рисунок 3.1 – Структурна схема кібезфізичної системи

3.2 Опис астрономічних формул для визначення положення сонця

Для обчислення положення сонця (азимуту та висоти) в системі автоматизованого стеження використано астрономічні рівняння, які залежать від географічного розташування, дати та часу.

Основною метою є визначення кута, під яким має бути орієнтована сонячна панель у конкретний момент. Для цього використовується система формул, базована на сферичній астрономії.

Основні формули для визначення положення сонця. Рівняння сонячного часу обчислюється за формулою 3.1

$$T_S = T_{local} + \frac{4 \times (L_{std} - L_{loc})}{60} + \frac{E}{60}, \quad (3.1)$$

де T_s – час, що відображає фактичну позицію сонця в небі. На відміну від стандартного годинника, він враховує географічну довготу та еліптичність орбіти Землі;

T_{local} – локальний час (у годинах, наприклад, 13.5 для 13:30), який отримано від модуля GPS;

L_{std} – довгота центрального меридіана часового поясу (30° для UTC+2);

L_{loc} – географічна довгота вашого місця (27.0° для Хмельницького);

E – рівняння часу (у хвилинах), що враховує сезонні відхилення, обчислюється за апроксимаційною формулою 3.2:

$$E = 9.87 \times 7.53 \times \cos(B) - 1.5 \times \sin(B), \quad (3.2)$$

де $B = \frac{360^\circ}{365} \times (n - 81)$;

n – номер дня у році.

Сонячна деклінація обчислюється за формулою 3.3

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(\frac{360^\circ}{365} \times (284 + n)\right), \quad (3.3)$$

де δ – кут між променем сонця та площиною екватора Землі. Вона змінюється протягом року від -23.45° до $+23.45^\circ$;

n – день року.

Годинний кут сонця обчислюється за формулою 3.4

$$\omega = 15^\circ \times (T_s - 12), \quad (3.4)$$

де ω – кут між напрямком на сонце та напрямком на південь. Він дорівнює 0° опівдні, від'ємний до полудня та додатний після. Кожна година дорівнює 15° . Це дозволяє обчислити горизонтальне відхилення сонця від полуденної позиції.

Висота сонця обчислюється за формулою 3.5

$$h = \sin^{-1}(\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \delta \times \cos \omega), \quad (3.5)$$

де h – кут між сонцем та горизонтом;

φ – географічна широта;

δ – деклінація сонця;

ω – годинний кут сонця.

Азимут сонця вираховується за такою формулою 3.5

$$A_{\mu} = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \delta - \sin h \times \sin \varphi}{\cos h \times \cos \varphi} \right), \quad (3.6)$$

де A_{μ} – горизонтальний кут між напрямком на південь і напрямком на Сонце;

φ – географічна широта;

δ – деклінація сонця;

h – кут між сонцем та горизонтом.

3.3 Електрична схема кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

Процес створення електричної схеми автоматизованої системи сонячного стеження є одним із найважливіших етапів у проектуванні функціонального пристрою, що поєднує енергонезалежність, точність позиціонування та адаптивність до змін навколишнього середовища. В рамках реалізації проєкту, побудова принципової електричної схеми здійснювалася в середовищі EasyEDA, що забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, доступ до великої бібліотеки компонентів, а також інтеграцію з інструментами розведення друкованої плати.

Проєктування розпочалося з визначення логічної структури майбутнього пристрою, де мікроконтролер Arduino Nano був покладений в основу архітектури як центральний елемент, що відповідає за зчитування даних, обробку алгоритмів та керування елементами позиціонування.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей вибір був зумовлений як компактністю плати, так і її сумісністю з більшістю сенсорів та модулів, що використовуються у проєкті. У процесі створення схеми особливу увагу приділяли ергономіці розміщення компонентів – тобто розташування здійснювалося не випадковим чином, а з урахуванням логіки передачі сигналів і зручності подальшого розміщення в друкованому варіанті.

Коли було визначено основні блоки схеми, почалося їх поетапне додавання. Серед першочергових завдань стало підключення GPS-модуля, який забезпечує отримання координат і точного часу. Цей модуль було з'єднано з Arduino через UART-інтерфейс, де напрям сигналів визначається чітко: вивід TX модуля приєднується до RX контролера, а RX модуля – до TX(рисунок 3.2). Такий підхід дозволив забезпечити коректний обмін інформацією без конфліктів на лінії зв'язку.

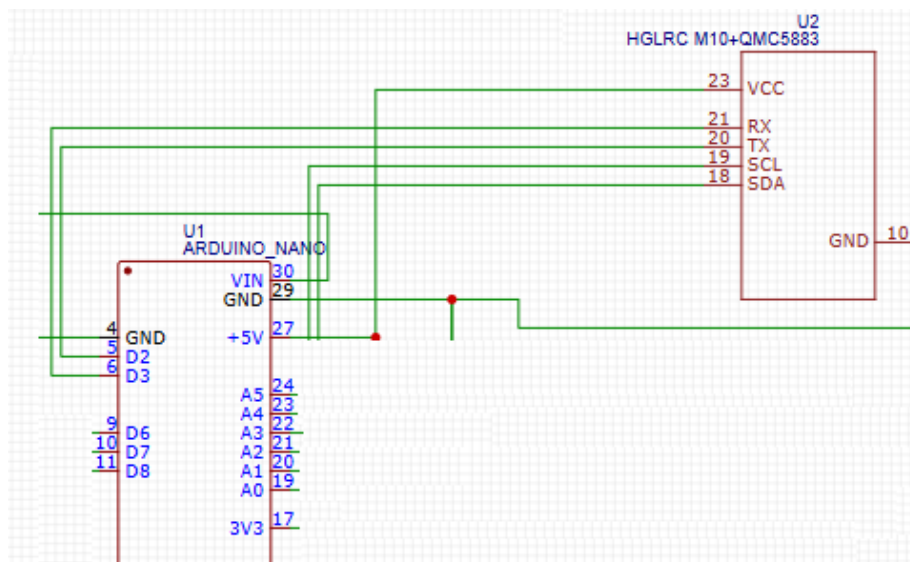


Рисунок 3.2 – Схема підключення GPS та компаса до мікроконтролера

Окрему увагу в процесі створення електричної схеми було зосереджено на підключенні магнітометра – цифрового компаса, функція якого полягає у визначенні напрямку на північ у реальному часі. Цей елемент суттєво доповнює GPS-модуль, який хоч і забезпечує точні географічні координати, проте не дає інформації про орієнтацію самої панелі у просторі. Саме тому на схемі було реалізовано підключення модуля QMC5883L.

Вибір цього датчика був зумовлений кількома технічними аргументами. По-перше, він забезпечує достатню роздільну здатність і стабільну роботу навіть в умовах слабого магнітного поля. По-друге, його взаємодія з мікроконтролером також реалізована за допомогою I2C-інтерфейсу, що значно спрощує топологію схеми. У данній системі SDA і SCL лінії компаса були приєднані до відповідних контактів Arduino Nano, які традиційно використовуються для цієї шини. Враховуючи те, що GPS-модуль використовував UART, а інші сенсори були підключені до аналогових або цифрових входів, інтеграція компаса не викликала конфліктів на рівні портів вводу/виводу.

На цьому етапі виникла потреба реалізувати підсистему зворотного зв'язку по освітленості. Було використано чотири фоторезистори(рисунок 3.3), розміщені по кутах площини, що імітує орієнтацію сонячної панелі. Кожен фоторезистор утворював разом із резистором постійного опору подільник напруги, що дозволяло аналого-цифровому перетворювачу мікроконтролера реєструвати рівень світла з відповідного напрямку.

Такий підхід дозволив забезпечити швидке реагування на локальні зміни освітленості, що особливо важливо в умовах часткового затінення або вранці й увечері, коли положення Сонця змінюється найбільш динамічно.

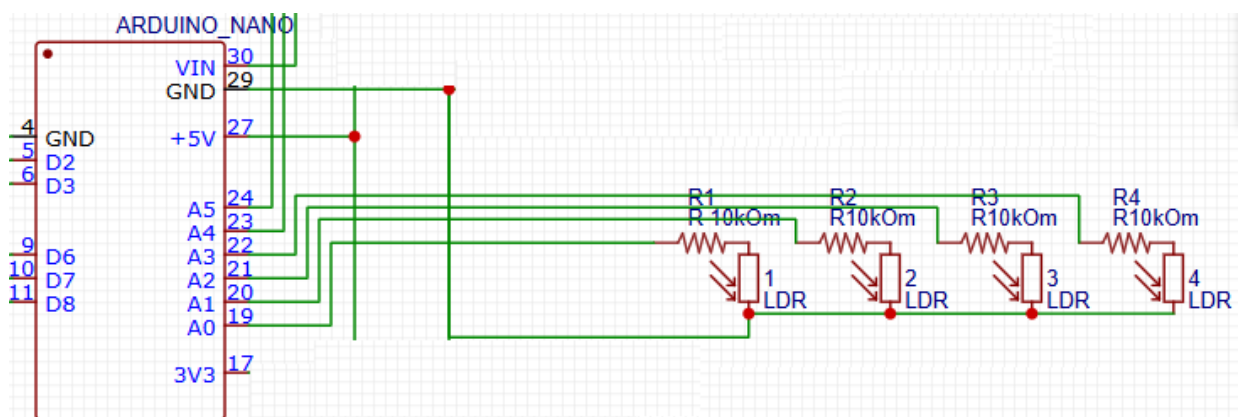


Рисунок 3.3 – Схема підключення фоторезисторів до Arduino

Що стосується рухомої частини, вона була реалізована за допомогою двох типів приводів. Серводвигун MG90S(рисунок 3.4) відповідає за зміну кута нахилу

Важливою частиною електричної схеми стала система живлення. Після аналізу варіантів було обрано конфігурацію з літій-іонною акумуляторною батареєю 1S у поєднанні з платою керування зарядом TP4056 із вбудованим BMS-модулем. Для забезпечення різних рівнів напруги в системі використовувалися два DC-DC перетворювачі: MP1584 як понижувач для логіки та сенсорів і XL6019 як підвищувач для приводу. Ці елементи інтегрувалися у схему як стандартні модулі, що дозволило зменшити складність проєкту без втрати функціональності (рис. 3.6).

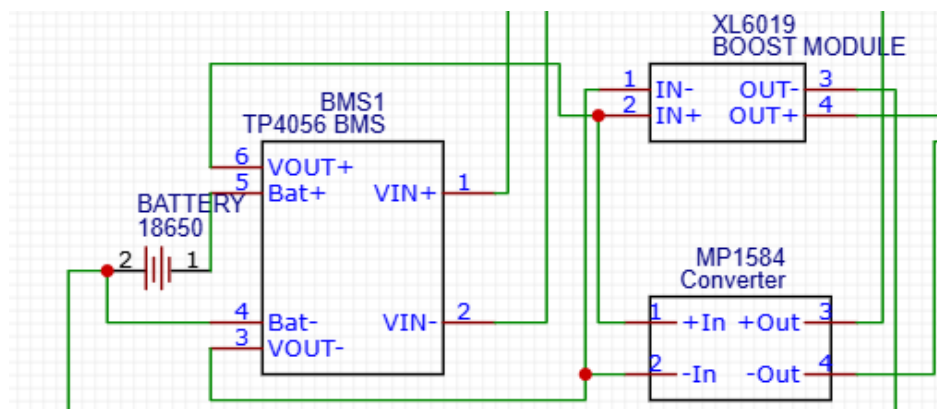


Рисунок 3.6 – Схема живлення кіберфізичної системи

Таким чином, побудова електричної схеми (рисунок 3.7) завершилася логічним і структурним відображенням усіх функціональних вузлів системи, що дозволило не лише встановити взаємозв'язки між модулями, а й забезпечити узгодженість їхньої взаємодії на апаратному рівні. У процесі проектування враховано як енергетичні параметри елементної бази, так і потреби в надійності, масштабованості та подальшій інтеграції з програмним забезпеченням. Особливу увагу було приділено раціональному розміщенню ключових компонентів, щоб мінімізувати втрати енергії, перешкоди в сигнальних лініях та полегшити трасування при переході до створення друкованої плати. Завершена схема фактично є основою майбутньої фізичної реалізації, на основі якої формуватиметься повноцінна кіберфізична система, здатна до автономного позиціонування сонячної панелі з високою точністю та стабільністю.

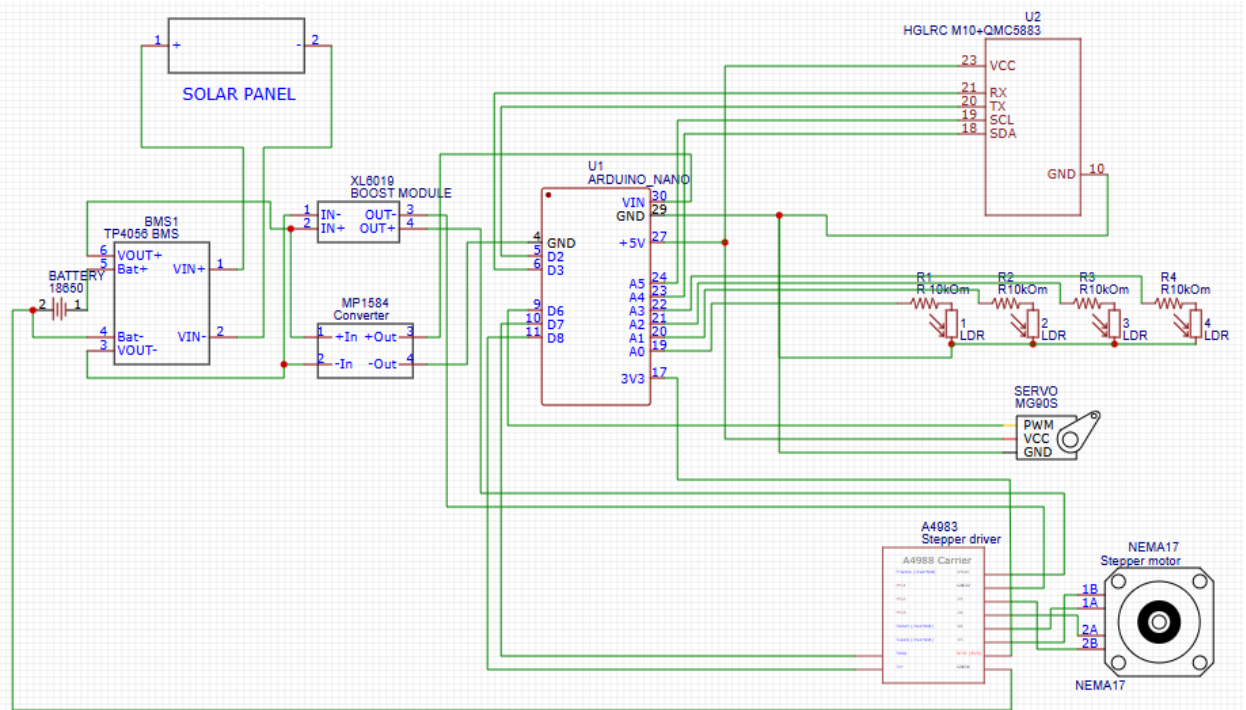


Рисунок 3.7 – Електрична схема кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

3.4 Проектування фізичної плати кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

В основі цього процесу була трансформація електричної принципової схеми в топологічне відображення провідників, контактів і посадкових місць на реальному фізичному носії – текстоліті, що слугує основою майбутнього пристрою.

Розпочато проектування з аналізу усіх логічних з'єднань між компонентами та визначення їхньої фізичної взаємодії на обмеженому просторі плати. Тут критично важливо було продумати розміщення модулів таким чином, щоб мінімізувати перехрещення провідників, уникнути паразитних наведень і забезпечити простий доступ до основних вузлів у процесі монтажу. В умовах застосування великої кількості як аналогових, так і цифрових сигналів, особливу увагу було приділено розділенню зон живлення та логіки, а також оптимізації прокладення доріжок, які передають сигнали управління двигунами, з урахуванням впливу імпульсних завад. (рисунок 3.8)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

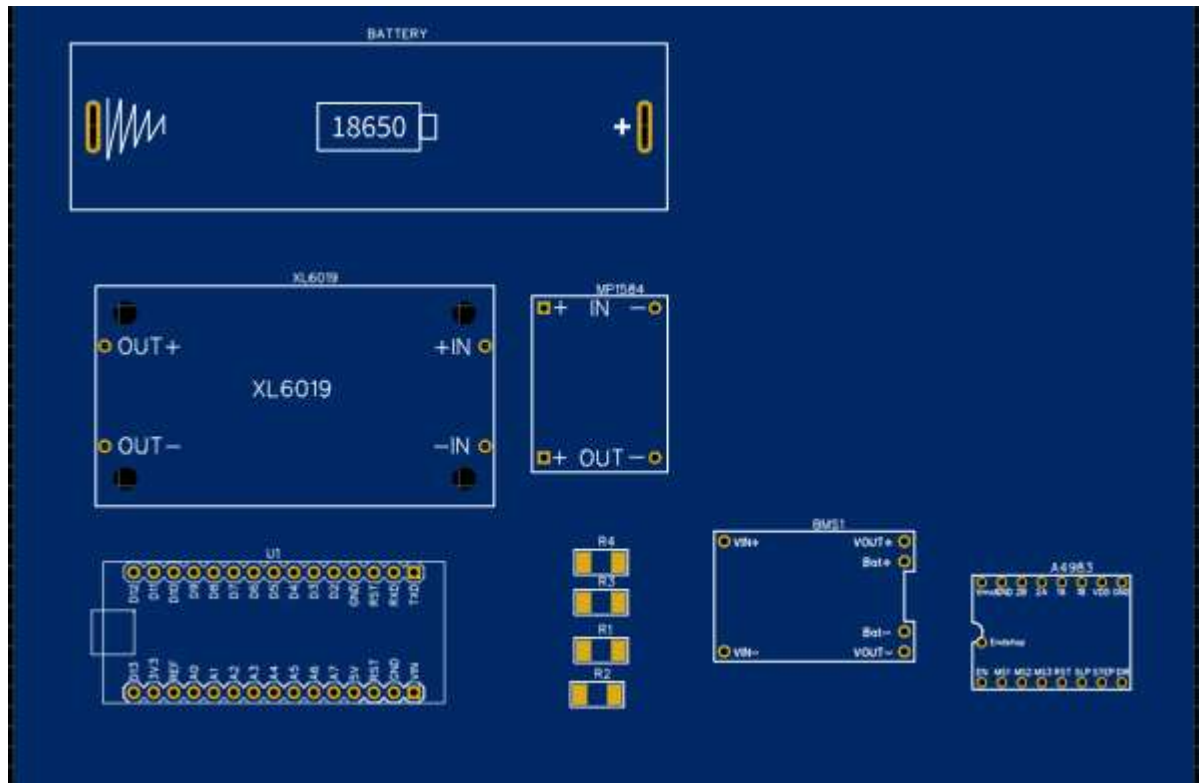


Рисунок 3.9 – Фізична плата кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

3.5 Програмна реалізація кіберфізичної системи

Створення програмного забезпечення для кіберфізичної системи сонячного трекера є процесом, у якому апаратна частина тісно взаємодіє з математичною логікою, реалізованою у вигляді коду. Саме на цьому етапі втілюється інтелектуальна поведінка пристрою, що забезпечує здатність системи не лише реагувати на зовнішні умови, а й приймати керовані рішення в режимі реального часу. Особливістю таких систем є постійна взаємодія між сенсорами, приводами, модулями живлення та обчислювальним ядром, яке контролює їхню координацію відповідно до закладеного алгоритму. Програмне забезпечення виконує функцію посередника, що пов'язує середовище з апаратними механізмами через сукупність обробки, інтерпретації, прийняття рішень та генерації керуючих сигналів.



Рисунок 3.10 – Робоче вікно Arduino IDE [43]

Розробка програмного коду відбувалася у середовищі Arduino IDE(рисунок 3.10), що забезпечує відкритий доступ до широкої екосистеми бібліотек та готових інструментів для інтеграції із сенсорними модулями, інтерфейсами обміну даними, алгоритмами навігації та системами керування рухом. Структура програмного забезпечення проектувалася модульно, із чітко розділеними логічними блоками: блоком ініціалізації, блоком зчитування даних, обчислювальним ядром, виконавчим контролером та діагностичним модулем. Цей підхід дозволив забезпечити масштабованість архітектури, гнучкість при подальшому вдосконаленні та підвищену стабільність під час роботи з великою кількістю асинхронних подій.

Початковим етапом у процесі написання коду стає оголошення всіх змінних, структур, об'єктів бібліотек та підключення зовнішніх модулів. На цьому рівні визначаються пін-коди для підключення фоторезисторів, сервоприводу, драйвера крокового двигуна, а також оголошуються об'єкти для роботи з GPS-модулем (наприклад, через бібліотеку TinyGPS++), компасом QMC5883L (через Wire.h та відповідні драйвери) й сервомеханізмом (через Servo.h). Тут також ініціалізується серійне з'єднання, що дозволяє виводити інформацію на монітор порту для налагодження.

Бібліотека TinyGPS++ є розширенням класичної бібліотеки TinyGPS, що дозволяє здійснювати парсинг стандартного NMEA-поток, який надсилається з GPS-модуля через послідовний інтерфейс. Саме завдяки цій бібліотеці програмне забезпечення отримує доступ до високоточних значень широти, довготи, швидкості, напрямку, часу та кількості супутників у видимості. Особливо важливо, що TinyGPS++ підтримує використання як апаратного, так і програмного серійного порту, що дозволяє адаптувати її для роботи на платформах із обмеженою кількістю UART-каналів, таких як Arduino Nano. У межах реалізації проєкту ця бібліотека використовується переважно для отримання координат місцевості та поточного часу в UTC-форматі, які, у свою чергу, передаються в алгоритм астрономічного розрахунку положення Сонця. Також за допомогою TinyGPS++ здійснюється обробка статусу фіксації супутників, що дозволяє системі визначати, коли GPS-модуль ще не готовий до роботи, й тимчасово відкладати виконання основного циклу логіки позиціонування.

Другим критично важливим елементом є бібліотека Wire, яка реалізує повноцінну підтримку двопровідного інтерфейсу I2C. Цей протокол використовується для зв'язку між мікроконтролером та компасом QMC5883L. Завдяки бібліотеці Wire, мікроконтролер ініціалізує передавання команд до компаса, читає регістри магнітного поля по кожній з осей та обробляє ці значення з метою визначення азимуту відносно магнітного півночі. У контексті реалізації алгоритму орієнтації панелі, дані з компаса дають змогу вивести напрямок, у який фактично зорієнтований корпус пристрою, що в сукупності з обчисленим положенням Сонця дозволяє визначити точний кут обертання. Wire забезпечує надійність у передачі даних, а також дозволяє працювати з кількома пристроями на одній шині, що в майбутньому відкриває можливість масштабування схеми або додавання нових модулів без зміни архітектури комунікації.

Третя бібліотека Servo забезпечує роботу сервоприводу MG90S, який використовується для керування нахилом сонячної панелі у вертикальній площині. Ця бібліотека дозволяє реалізовувати генерацію широтно-імпульсних сигналів, які

потрібні для позиціювання осі приводу з високою точністю. У межах програмного забезпечення вона використовується для визначення положення вала серводвигуна відповідно до висоти Сонця над горизонтом. При цьому бібліотека дозволяє задавати кут у градусах, а внутрішній механізм конвертує це значення в серію імпульсів з відповідною шириною, що значно спрощує реалізацію алгоритму й зменшує потребу у низькорівневому програмуванні таймерів. Окрім того, бібліотека Servo дає змогу налаштувати обмеження діапазону руху, що дозволяє захистити механіку від перевантаження або виходу за фізичні межі обертання.

У функції `setup()` реалізується ініціалізація всіх сенсорів, модулів і протоколів. Активується серійне з'єднання для обміну з GPS, стартує I2C-шина для роботи з компасом, визначаються режими пінів як виходи або входи відповідно до функціонального призначення. Тут також виконується тестове зчитування значень із сенсорів, аби впевнитися у коректності підключення. У випадку виявлення некоректної роботи, система може переходити в режим очікування або повторювати спробу з'єднання.

Основна логіка вбудовується у функцію `loop()`, яка виконується циклічно протягом усього часу роботи мікроконтролера. На початку кожного циклу здійснюється зчитування координат і точного часу з GPS-модуля. Ці значення зберігаються у відповідних змінних, після чого передаються у функцію, відповідальну за астрономічний розрахунок положення Сонця. У цій функції реалізуються тригонометричні формули для визначення азимуту та висоти Сонця на основі широти, довготи, дня року, часу доби та поправок на нахил земної осі. Зазвичай такий розрахунок реалізується як окремий модуль або бібліотека, але для спрощених систем можливе використання апроксимаційних формул із обмеженою точністю.

Після отримання координат Сонця відбувається порівняння з поточним положенням панелі. Якщо різниця в азимуті або висоті перевищує заданий поріг, система генерує команду на обертання. Для обертання по горизонталі підраховується кількість кроків для крокового двигуна й через пін STEP подається

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідна кількість імпульсів, враховуючи напрям, встановлений на піні DIR. Вертикальний рух виконується простіше – передається сигнал широтно-імпульсної модуляції на пін керування сервоприводом, причому кут задається відповідно до обчисленої висоти Сонця, масштабованої до діапазону обертання сервомеханізму.

На цьому етапі виконується коригування за фоторезисторами. Значення з аналогових входів зчитуються, і якщо спостерігається суттєва різниця між лівою та правою частинами або верхньою й нижньою, система вносить невеликі зміни в положення панелі, незалежно від астрономічного розрахунку. Це реалізується через порівняння показів світлових сенсорів та створення зсуву в куті або кількості кроків двигуна, що відповідає напрямку найбільшого світлового потоку.

Після цього цикл завершується діагностикою стану системи. Перевіряється, чи не настав вечір або ранок за допомогою даних з GPS і фоторезисторів. Якщо освітленість падає нижче критичного порогу або поточний час виходить за межі денного періоду, система автоматично переводить панель у горизонтальне безпечне положення й припиняє активне відстеження, переходячи в енергозберігаючий режим.

Усі функції програмного забезпечення реалізуються з урахуванням обмежень по оперативній пам'яті та швидкодії Arduino Nano. Значна увага приділяється ефективності коду, використанню цілочисельної арифметики там, де можливо, уникненню динамічного виділення пам'яті й збереженню важливих параметрів у EEPROM при потребі збереження стану між перезавантаженнями.

3.5.1 Реалізація плавного старту для сервоприводу

Плавний запуск і зупинка сервоприводу – це важливий практичний аспект проектування триваложивучих систем, особливо в автономних кіберфізичних пристроях, таких як автоматизований сонячний трекер. Замість миттєвого переходу з одного положення в інше, реалізація поступового змінення кута дозволяє зменшити механічне навантаження, знизити інерційний вплив на підвіс, а також

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

уникнути небажаних струмових стрибків, що могли б негативно позначитися на стабільності живлення або викликати передчасний знос редуктора приводу.

З точки зору апаратної реалізації, серводвигун MG90S очікує керуючий сигнал широтно-імпульсної модуляції (PWM), значення якого визначає кут обертання. Якщо значення різко змінити, серво намагається моментально досягти нового положення, що супроводжується різким стартом. Щоб цього уникнути, необхідно реалізувати поступове змінення кута із контрольованим інтервалом між кроками. Такий підхід дозволяє отримати ефект “м’якого старту” та “м’якої зупинки”, що в результаті підвищує довговічність пристрою.

Приклад реалізації м’якого старту та зупинки наведено нижче:

```
void smoothMoveServo(int fromAngle, int toAngle, int stepDelay)
{
    if (fromAngle < toAngle) {
        for (int i = fromAngle; i <= toAngle; i++) {
            servo.write(i);
            delay(stepDelay);
        }
    } else {
        for (int i = fromAngle; i >= toAngle; i--) {
            servo.write(i);
            delay(stepDelay);
        }
    }
    currentAngle = toAngle;
}
```

У цьому коді вся логіка плавності зосереджена в окремій функції `smoothMoveServo`, яка поступово змінює положення серво по одному градусу з паузою між кожним кроком. Інтервал паузи (`stepDelay`) можна адаптувати залежно від потреб системи: збільшення цього параметра забезпечує ще повільніший рух.

Такий підхід не лише мінімізує ризики пошкодження механіки, але й робить поведінку системи більш передбачуваною. В умовах польової експлуатації, де коливання температур, вібрації та механічні навантаження мають значний вплив на

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точність та ресурс приводу, плавне позиціонування дає змогу істотно подовжити життєвий цикл вузла без додаткових витрат на жорстке калібрування чи захисні механізми.

3.6 Висновки до третього розділу

У результаті опрацювання третього розділу було детально розглянуто процес реалізації програмного забезпечення для автоматизованої системи сонячного трекера на базі мікроконтролера Arduino Nano. Сформовано чітке розуміння логіки роботи пристрою, яка охоплює як зчитування й обробку даних від сенсорів, так і формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів, зокрема крокових і серводвигунів. Особливу увагу було приділено астрономічним розрахункам орієнтації панелі, алгоритмам адаптації до змін навколишнього середовища та реакції на нештатні ситуації, що забезпечує стабільну та безпечну роботу системи.

Розроблене програмне забезпечення реалізує модульний підхід, завдяки чому досягнуто високої гнучкості у його розширенні й адаптації. Використання зовнішніх бібліотек, таких як TinyGPS++, Wire і Servo, значно спростило інтеграцію з відповідними апаратними модулями, мінімізувало ризик помилок на низькому рівні та дозволило зосередитися на ключових аспектах системної логіки. У результаті вдалося досягти високого рівня точності позиціонування сонячної панелі та адаптивності до змін положення Сонця, що безпосередньо впливає на ефективність енергозбору.

Таким чином, створене програмне забезпечення виступає центральною ланкою у функціонуванні всієї кіберфізичної системи, забезпечуючи синхронізацію дій усіх компонентів, стабільність, функціональність і потенціал до масштабування.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та обґрунтовано архітектуру автоматизованої системи сонячного трекера на основі мікроконтролера з використанням GPS-навігації, сенсорної підсистеми та сервоприводів.

У першому розділі проведено детальний аналіз історії розвитку сонячних трекерів, їхнього значення в сучасній енергетиці, класифікації та існуючих технічних рішень. Окрему увагу приділено проблемам, що виникають при впровадженні таких систем, і потенційним напрямам удосконалення.

У другому розділі проведено обґрунтований вибір елементної бази, створено функціональну та електричну схеми, а також описано фізичну структуру з'єднання компонентів. Аналізувалися технічні характеристики датчиків, виконавчих механізмів і блоків живлення, що дозволило оптимізувати систему під умови автономного використання.

У третьому розділі було описано логіку створення програмного забезпечення, алгоритм керування сонячним трекером, а також реалізовано кроки до інтеграції апаратної та програмної частин у єдину кіберфізичну систему. Здійснено моделювання основних процесів функціонування, подано графічне та текстове представлення алгоритмів, що демонструють здатність системи ефективно реагувати на зміну положення Сонця.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Amelia A. R. et al. Technologies of solar tracking systems: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. P.5567-5569.
2. Fuentes-Morales R. F. et al. Control algorithms applied to active solar tracking systems. *Solar Energy*. 2020. №7. P. 203-219.
3. Shang H., Shen W. Design and implementation of a dual-axis solar tracking system. *Energies*. 2023. №2. P. 6330-6334.
4. Baouche F. Z. et al. Design and simulation of a solar tracking system for PV. *Applied Sciences*. 2022. №4. P. 9682-9683.
5. Kumba K. et al. Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions. *Energy Reports*. 2024. №3. P. 3566-3583.
6. Zhu Y., Liu J., Yang X. Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy*. 2020. P.114-118.
7. Jamroen C. et al. A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. P 100-116.
8. Said M., Jumaat S. A., Jawa C. R. A. Dual axis solar tracker with IoT monitoring system using arduino. *Int. J. Power Electron. Drive Syst*. 2020. P. 451-458.
9. Рух сонячної панелі за Сонцем URL: https://watt.ua/trekery_dlya_sonyachnykh_paneley.html (дата звернення 20.05.2025).
10. Pardosi C. H., Siregar M., Pandjaitan L. W. Design and implementation of a dual-axis solar tracking system using Arduino Uno Microcontroller // *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*. 2024. №3. P. 44-56.
11. Hassan R., Abubakar B. Intelligent arduino based automatic solar tracking system using light dependent resistors (LDRs) and servo motor. *Optics*. 2020. №2. P.13-14.
12. Hassan R., Abubakar B. Intelligent arduino based automatic solar tracking system using light dependent resistors (LDRs) and servo motor. *Optics*. 2020. №3. P.15-17.

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Soltec SF7 URL: <https://pv-magazine-usa.com/2017/05/24/soltec-to-launch-nextgen-sf7-tracker-at-intersolar-europe> (дата звернення 20.05.2025)
14. Fuentes-Morales R. F. et al. Control algorithms applied to active solar tracking systems. *Solar Energy*. 2022. №3. P. 203-219.
15. NX Horizon URL: <https://www.nextracker.com/2023/09/nextracker-unveils-next-generation-tech-suite-to-address-hail-undulating-terrain-and-rapidly-changing-atmospheric-conditions> (дата звернення 20.05.2025)
16. EXOTRACK CPV URL: <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/08/exosuns-exotrack-hz-v2-showcasing-first-solar-s4-s5-modules-spi> (дата звернення 20.05.2025)
17. Tracker Mechatron URL: <https://mechatron-solar.com/with-self-reliant> (дата звернення 20.05.2025)
18. El Hammoumi A. et al. Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels. *Energy Reports*. 2022. P. 11992-12010.
19. Said M., Jumaat S. A., Jawa C. R. A. Dual axis solar tracker with IoT monitoring system using arduino. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2020. P. 451-458.
20. Hussain A. S. T. et al. Unlocking solar potential: advancements in automated solar tracking systems for enhanced energy utilization. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2024. P. 1018-1027.
21. Singh B. et al. Design and Analysis of Solar Tracking System for PV Thermal Performance Enhancement. *Heat Transfer Enhancement Techniques: Thermal Performance, Optimization and Applications*. 2025. P. 251-267.
22. Mondal S., Pal M., Sonar S. Neural Network-Based Finite-Time Control for Solar Tracking Systems. *8th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. 2025. №1 .P.274-279.
23. Kawser M. A. et al. Performance Evaluation of an IoT Based Dual Axis Prototype Solar Tracker Over Fixed PV Installations. *IEEE 3rd International Conference*

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON). 2024. P. 183-187.

24. Shahzad M. W. et al. Machine learning assisted prediction of solar to liquid fuel production: a case study. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. P. 1119-1130.

25. Hidayatullah S. A., Styawati S. Rancang Bangun Single-Axis Solar Tracker untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Kecil. *Jurnal Pepadun*. 2024. P.64-71.

26. Safiullah, Hote Y. V. Design of Active Disturbance Rejection Controller Variants for Solar Tracker System. *IETE Journal of Research*. 2024. №3. P.570-583.

27. Передача інформації по шині UART URL: <https://www.itmaster.biz.ua/electronics/stm32/stm32-uart.html> (дата звернення 20.05.2025)

28. Схема передачі інформації по I2C шині URL: https://old.symmetron.ua/files/html/suppliers/freescale/HCS08_11_h-1-2-2.html (дата звернення 20.05.2025)

29. Схема роботи PWM сигналу URL: <https://itmaster.biz.ua/electronics/arduino/arduino-pwm.html> (дата звернення 20.05.2025)

30. Arduino Nano URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano> (дата звернення 20.05.2025)

31. Arduino Uno R3 URL: <https://store.arduino.cc/products/uno-r4-wifi> (дата звернення 20.05.2025)

32. Raspberry Pi ZERO URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w> (дата звернення 20.05.2025)

33. ESP32 URL: <https://www.espressif.com/en/products/devkits> (дата звернення 20.05.2025)

34. Кроковий двигун NEMA 17 URL: <https://www.ato.com/nema-17-stepper-motor-6v-1a-1-8-degree-2-phase-4-wires> (дата звернення 20.05.2025)

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

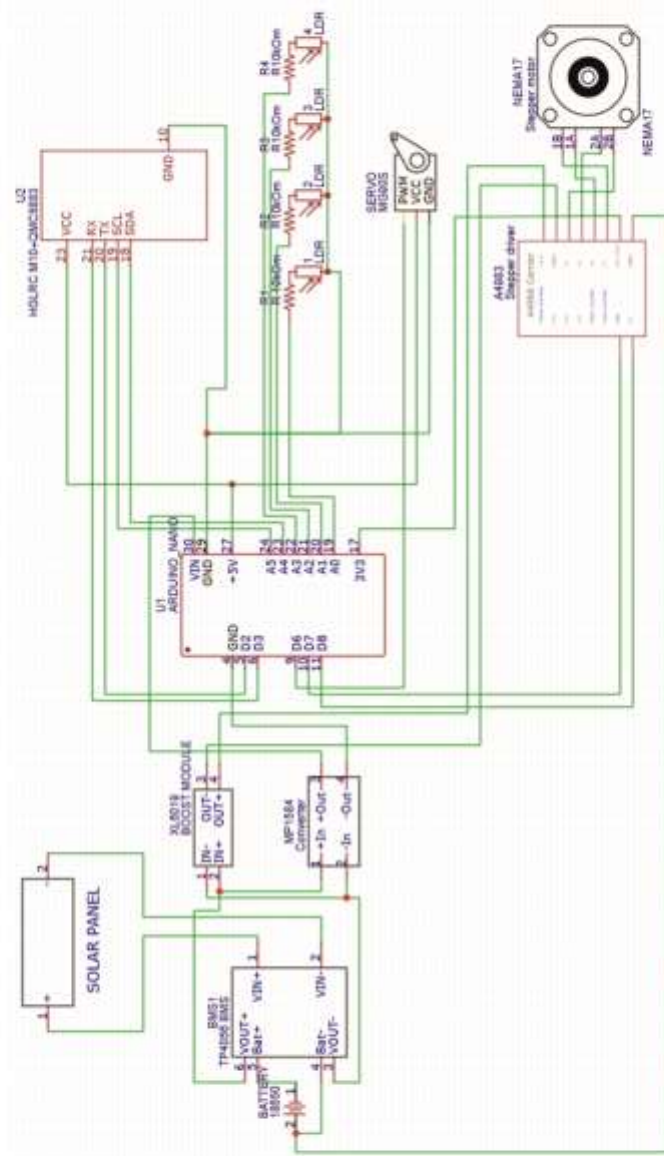
35. Драйвер крокового двигуна А4988 URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/drayer-shagovogo-dvigatelya-a4988> (дата звернення 20.05.2025)
36. MG90S URL: <https://arduino.ua/ru/prod4318-servoprivod-mg90s-v2> (дата звернення 20.05.2025)
37. HGLRC M100 URL: <https://fpvkit.com.ua/products/hglrc-m100-5883-m10-gps-module-with-compass> (дата звернення 20.05.2025)
38. LDR фоторезистор URL: <https://arduino-geek.pp.ua/product/fotorezistory-ldr-5528-5mm/> (дата звернення 20.05.2025)
39. MP1584 URL: <https://arduino.ua/ru/prod605-dc-dc-ponijaushhii-preobrazovatel-3a> (дата звернення 20.05.2025)
40. XL6019 URL: <https://www.mini-tech.com.ua/dc-dc-konverter-xl6019> (дата звернення 20.05.2025)
41. TP4056 URL: <https://arduino.ua/ru/prod4517-zaryadnii-modyl-tp4056-type-c-s-fynkciei-zashhiti-akkumulyatora> (дата звернення 20.05.2025)
42. Акумулятор 18650 URL: https://bestbattery.com.ua/ua/li_ion_1850_ua/li_ion_18650_ua/18650_not_protected_ua/samsung_inr18650_29e_ua (дата звернення 20.05.2025)
43. Arduino IDE URL: <https://apps.microsoft.com/detail/9nblggh4rsd8?hl=uk-UA&gl=UA> (дата звернення 20.05.2025).

					КВРКІ 220042.22.01.39 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А
(обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА»

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



КіРЧК 220042 22 01 38 ЕВ

КіРЧК 220042 22 01 38 ЕВ		Проект	Місце	Масштаб
Зм. №	№ докум.	Група	Лист	
Назва	Класифікація	Статус	Видаткованість	
№	№	№	№	№
Т. №	№	№	№	№
Затв.	Відмін.	Відмін.	Відмін.	Відмін.
Затв.	Відмін.	Відмін.	Відмін.	Відмін.
ХНУ, ГР МДЗ-22-1				

Додаток Г

КОД ПРОГРАМИ

```
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <QMC5883LCompass.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS++.h>

#define STEP_PIN 2
#define DIR_PIN 3
#define ENABLE_PIN 4

#define SERVO_PIN 9
#define LDR_LEFT A0
#define LDR_RIGHT A1
#define TEMP_PIN A2

Servo myServo;
QMC5883LCompass compass;
TinyGPSPlus gps;
SoftwareSerial gpsSerial(10, 11); // RX, TX

int servoAngle = 90;
const int stepDelay = 1000; // мікросекунди

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

  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
```

```

pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);

myServo.attach(SERVO_PIN);
myServo.write(servoAngle);

compass.init();
compass.setCalibration(-2445, 1346, -1962, 1503, -2740, 1853);

Serial.println("System Init");
}

void loop() {
  gpsUpdate();
  updateCompass();
  autoAdjustServo();
  autoAdjustStepper();
  delay(1000);
}

void gpsUpdate() {
  while (gpsSerial.available()) {
    gps.encode(gpsSerial.read());
  }
}

void updateCompass() {
  compass.read();
  int heading = compass.getAzimuth();
  Serial.print("Heading: ");
  Serial.println(heading);
}

void autoAdjustServo() {
  int ldrLeft = analogRead(LDR_LEFT);

```

```

int ldrRight = analogRead(LDR_RIGHT);

int error = ldrLeft - ldrRight;
if (abs(error) > 20) {
    if (error > 0 && servoAngle > 0) {
        servoAngle -= 1;
    } else if (error < 0 && servoAngle < 180) {
        servoAngle += 1;
    }
    myServo.write(servoAngle);
    delay(15);
}
}

void autoAdjustStepper() {
    static int stepCount = 0;
    int ldrDiff = analogRead(LDR_LEFT) - analogRead(LDR_RIGHT);

    if (abs(ldrDiff) > 40) {
        digitalWrite(DIR_PIN, ldrDiff > 0 ? HIGH : LOW);
        for (int i = 0; i < 10; i++) {
            digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
            delayMicroseconds(stepDelay);
            digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
            delayMicroseconds(stepDelay);
        }
    }
}
}

```

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Анни ЦИБУЛЬСЬКОЇ

ШБ здобувачи вищої освіти

ФГТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

18.06. 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Цибульська Анна Олександрівна

Тема: Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 55

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування кіберфізичної системи позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено детальний аналіз історії розвитку сонячних трекерів, їхнього значення в сучасній енергетиці, класифікації та існуючих технічних рішень. Окрему увагу приділено проблемам, що виникають при впровадженні таких систем, і потенційним напрямом удосконалення.

У другому розділі проведено обґрунтований вибір елементної бази, створено функціональну та електричну схеми, а також описано фізичну структуру з'єднання компонентів. Аналізувалися технічні характеристики датчиків, виконавчих механізмів і блоків живлення, що дозволило оптимізувати систему під умови автономного використання.

У третьому розділі було описано логіку створення програмного забезпечення, алгоритм керування сонячним трекером, а також реалізовано кроки до інтеграції апаратної та програмної частин у єдину кіберфізичну систему. Здійснено моделювання основних процесів функціонування, подано графічне та текстове

представлення алгоритмів, що демонструють здатність системи ефективно реагувати на зміну положення Сонця.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: не розглянуто процес збереження та запису інформації RFID міток.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.


7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: Добре

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Макафискін
Ремис Анатолієвич, доцент, к.т.н. кафедри АКІТ САР

"12" травня 2025 р.

 (підпис)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованою системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

Автор: Анна ЦИБУЛЬСЬКА

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Дмитро ДЕНИСЮК, старший викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданій поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданій поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з 10 джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.77% ; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС





Дмитро ДЕНИСЮК

Андрій НІЧЕПОРУК

Ольга ПАВЛОВА

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 12%

ID: 244752 Title: БКР Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino Added in a DB: 2025-06-10 Authors: Анна ЦИБУЛЬСЬКА Heads: Дмитро ДЕНИСЮК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	77949	532	837 (1%)	13 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Анна ЦИБУЛЬСЬКА

Співавтор:

Назва: Цибульська_Кіберфізична система позиціонування сонячних панелей з використанням GPS та Arduino

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.8%

Коефіцієнт подібності 2: 0.5%

Мікропробіли: 10

Заміна букв: 3

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-10 23:19:15.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-11

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт