

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ
СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Здобувача вищої освіти
Шевчука Василя Сергійовича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та
робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Кисельов В.Б.

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____ Наталія ОМЕЦІНСЬКА
« ____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Шевчука Василя Сергійовича

1. Тема роботи: Розроблення автоматизованої системи позиціонування сонячних панелей

керівник роботи: д.т.н., професор Кисельов В.Б.

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7» листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2026

3. Вихідні дані до роботи: двоосьова кінематична схема сонячного трекера; мікроконтролер сімейства STM32; алгоритм математичного розрахунку траєкторії руху Сонця (алгоритм SPA); технічні характеристики фотоелектричних модулів та лінійних актуаторів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати теоретичні засади сонячної енергетики та обґрунтувати доцільність застосування автоматизованих систем просторового орієнтування; Спроекувати апаратну частину керуючого комплексу; Розробити алгоритм функціонування та програмне забезпечення для мікроконтролера, що реалізує розрахунок координат Сонця і керування виконавчими механізмами; Проаналізувати умови праці інженера-програміста та розробити заходи з охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 2	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 3	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		
Розділ 4	професор Володимир КИСЕЛЬОВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	07
ВСТУП.....	08
РОЗДІЛ 1 СОНЯЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ ЕНЕРГІЇ.....	11
1.1 Принцип дії та характеристики сонячних фотоелементів.....	13
1.2 Обґрунтування необхідності автоматизації просторового орієнтування сонячних модулів.....	17
1.3 Класифікація та кінематичні схеми механізмів сонячного трекінгу.....	20
1.4 Дослідження продуктивності автоматизованих систем позиціонування порівняно зі стаціонарними.....	26
1.5 Будова сонячного трекера.....	29
1.6 Методи та алгоритми автоматичного керування системами позиціонування.....	32
1.7 Огляд існуючих рішень.....	37
Висновок до розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ КЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....	45
2.1 Проектування керуючої логіки та алгоритмічного забезпечення системи.....	45
2.2 Проектування архітектури та структурної побудови пристрою.....	47
2.3 Розробка функціональної архітектури та апаратно-програмних рішень системи.....	48
Висновок до розділу 2.....	54
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....	56
3.1 Мікроконтролер.....	56
3.2 Дисплей LCD.....	59
3.3 Схема перетворювача інтерфейсу.....	62
3.4 Датчик прискорення і нахилу.....	64
3.5 Модуль годинника реального часу.....	67
3.6 Магнітний компас.....	69
3.7 Виконавчий механізм повороту панелей.....	70
Висновок до розділу 3.....	73
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	75
4.1 Опис робочого місця програміста.....	75
4.2 Освітленість робочого столу.....	78
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	79
Висновки до розділу.....	81
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84

АНОТАЦІЯ

Шевчук В. С. Розроблення автоматизованої системи позиціонування сонячних панелей. – Рукопис. Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні засади сонячної енергетики та кінематичні схеми існуючих механізмів просторового орієнтування фотоелектричних модулів. Розроблено апаратно-програмний комплекс двоосьової системи позиціонування сонячних панелей на базі мікроконтролера STM32. Запропоновано алгоритм програмного керування з відкритим контуром для розрахунку ідеальних координат Сонця, структурну та принципову електричну схеми пристрою з використанням сенсорної мережі (годинник реального часу, магнітометр, акселерометр) і драйверів керування лінійними актуаторами. Проведено розрахунки ефективності, які підтвердили приріст генерації електроенергії на 36,1 % порівняно зі стаціонарною установкою. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробленого сонячного трекера для оптимізації роботи та підвищення продуктивності як приватних, так і промислових сонячних електростанцій.

Об'єкт дослідження – процес управління просторовим положенням сонячних панелей для максимізації видобутку електроенергії. Предмет дослідження – апаратні та програмні засоби автоматизованої двоосьової системи позиціонування сонячних панелей.

Мета роботи – розробка та апаратно-програмна реалізація інтелектуальної системи автоматичного позиціонування сонячних модулів для підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних станцій.

Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання астрономічної траєкторії руху Сонця, алгоритмізація, мікропроцесорне керування.

Ключові слова: СОНЯЧНИЙ ТРЕКЕР, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР STM32, I2C, АКТУАТОР.

ABSTRACT

Shevchuk V. S. Development of an automated positioning system for solar panels. – Manuscript. Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – Tavrichesky National University named after V.I. Vernadsky, Kyiv, 2026.

The bachelor's qualification work investigated the theoretical foundations of solar energy and kinematic schemes of existing mechanisms for spatial orientation of photovoltaic modules. A hardware and software complex of a two-axis positioning system for solar panels based on the STM32 microcontroller was developed. An open-loop software control algorithm for calculating the ideal coordinates of the Sun, a structural and schematic electrical diagram of the device using a sensor network (real-time clock, magnetometer, accelerometer) and drivers for controlling linear actuators are proposed. Efficiency calculations were performed, which confirmed an increase in electricity generation by 36.1% compared to a stationary installation. The practical significance lies in the possibility of implementing the developed solar tracker to optimize the operation and increase the productivity of both private and industrial solar power plants.

The object of research is the process of controlling the spatial position of solar panels to maximize electricity production. The subject of research is the hardware and software of the automated two-axis positioning system for solar panels.

The purpose of the work is to develop and implement an intelligent system for automatic positioning of solar modules to increase the energy efficiency of photovoltaic stations.

Research methods are system analysis, mathematical modeling of the astronomical trajectory of the Sun, algorithmization, microprocessor control.

Keywords: SOLAR TRACKER, AUTOMATED POSITIONING SYSTEM, PHOTOELECTRIC STATION, STM32 MICROCONTROLLER, I2C, ACTUATOR.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AADAT – Azimuth Altitude Dual-Axis Trackers

DAT – Dual Axis Trackers

HSAT – Horizontal Single-Axis Trackers

I²C – Inter- Integrated Circuit

PSAT – Polar Single-Axis Trackers

SAT – Single-Axis Trackers

TTDAT – Tip-Tilt Dual Axis Trackers

TSAT – Tilted Single-Axis Trackers

VSAT – Vertical Single-Axis Trackers

WHSAT – Wall Horizontal single axis tracker

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ІЕЕЕ – інститут інженерів з електротехніки та електроніки

ККД – коефіцієнт корисної дії

МК – мікроконтролер

ОП – операційний підсилювач

СЕС – сонячна електростанція

ФЕМ – фотоелектричні модулі

ФЕС – фотоелектрична станція

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку цивілізації енергетичні ресурси стали невід’ємною частиною практично всіх аспектів людської життєдіяльності. Спостерігається стійка тенденція до щорічного зростання енергетичних потреб, що зумовлено як промисловим прогресом, так і підвищенням стандартів побутового комфорту. Водночас традиційна енергетична парадигма, що базується на використанні викопних видів палива, таких як нафта, кам’яне вугілля та природний газ, стикається з критичною проблемою вичерпності цих природних ресурсів. Глобальний дефіцит вуглеводнів у поєднанні з екологічними викликами робить перехід до нетрадиційної енергетики не просто альтернативою, а стратегічною необхідністю. Серед найбільш перспективних напрямків виділяють енергію вітру, геотермальні джерела та сонячну радіацію, які характеризуються практично необмеженим потенціалом відновлення.

У широкому спектрі відновлюваних джерел енергії саме сонячна інсоляція посідає чільне місце завдяки своїм колосальним ресурсним масштабам та високим показникам екологічної безпеки. В українському контексті впровадження фотоелектричних технологій для генерування електроенергії набуло статусу одного з пріоритетних національних векторів розвитку. Історичною точкою відліку для вітчизняної галузі став 2010 рік, коли було введено в експлуатацію першу промислову сонячну електростанцію (СЕС). З того часу галузь демонструє стрімку динаміку: якщо на початку 2020 року сумарна встановлена потужність об’єктів сонячної енергетики вже перевищувала 752 МВт [1], то сучасні показники свідчать про масштабне масштабування сектору як на промисловому рівні, так і в приватному сегменті.

Методологія прямої конверсії енергії сонячного випромінювання в електричний струм має низку незаперечних переваг. По-перше, вона забезпечує максимальну автономність та зручність для кінцевого споживача. По-друге, цей підхід є одним із найбільш екологічно нейтральних способів енерговиробництва, оскільки він позбавлений шкідливих викидів, які супроводжують спалювання палива, ризиків, притаманних атомній енергетиці, або значного впливу на

ландшафт і екосистеми річок, як у випадку з великими гідротехнічними спорудами.

Незважаючи на очевидні переваги, експлуатація фотоелектричних систем пов'язана з певними технологічними викликами та обмеженнями. Суттєвий вплив на ефективність генерації мають метеорологічні умови та географічні чинники. Критики часто вказують на високу капітальну вартість напівпровідникових елементів та тривалий термін окупності інвестицій. Однак ринкові тенденції свідчать про зворотне: стабільне зростання попиту на СЕС в Україні стимулює конкуренцію, що призводить до суттєвого зниження ринкової ціни на обладнання. Водночас актуальною проблемою залишається складність технічного обслуговування великих «сонячних ферм», де питання сервісної підтримки та моніторингу працездатності обладнання виходять на перший план.

Практичний досвід використання сонячних модулів виявив, що надмірне термічне нагрівання фотоелектричних комірок негативно впливає на їхню вольт-амперну характеристику, суттєво знижуючи загальний ККД системи. Це обумовлює необхідність розробки ефективних методів охолодження панелей. Крім того, на продуктивність впливає чистота поверхні: накопичення пилу та органічних забруднень потребує регулярної очистки, що у випадку станцій площею в кілька квадратних кілометрів перетворюється на складне логістичне завдання. Проте ключовим фактором, що обмежує вихід енергії, є пряма залежність від інтенсивності світлового потоку та кута його падіння на поверхню.

Для досягнення максимальних показників потужності площа сонячної панелі має знаходитися в положенні, максимально наближеному до ортогонального (перпендикулярного) відносно джерела випромінювання. Оскільки видимий шлях Сонця по небосхилу безперервно змінюється як протягом світлового дня, так і впродовж річного циклу, статичне розміщення модулів призводить до значних втрат потенційної енергії. Ефективним рішенням цієї проблеми є впровадження інтелектуальних систем трекінгу (стеження), які в режимі реального часу коригують просторову орієнтацію панелей. Сучасні конструкції таких систем класифікуються на пасивні та активні, а також за кількістю осей свободи — одноосьові та двоосьові.

Хоча може здатися, що сучасна сонячна енергетика має велику кількість технічних недоліків, вони є лише етапом еволюційного розвитку технології. Стрімкий прогрес у галузі автоматизації та мікропроцесорної техніки дозволяє нівелювати ці бар'єри. Таким чином, основна мета даного дипломного проекту полягає в оптимізації процесів енерговидобутку через усунення одного з головних технологічних недоліків. Це планується реалізувати шляхом розробки та впровадження системи автоматичного позиціонування сонячних елементів, яка забезпечуватиме їх перебування у найбільш енергоефективному положенні незалежно від зовнішніх умов.

РОЗДІЛ 1 СОНЯЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ ЕНЕРГІЇ

Згідно з аналітичними прогнозами та експертними оцінками Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ), світова сонячна енергетика володіє колосальним потенціалом, що в найближчому майбутньому дозволить їй повноцінно конкурувати з традиційними методами генерації на основі викопних вуглеводнів. Масштаби енергії, яку постачає Сонце, вражають: за теоретичними розрахунками, трансформація лише 0,0125 % сонячного випромінювання, що досягає поверхні Землі, здатна повністю задовольнити поточний сукупний попит людства на енергоресурси. Більш того, освоєння всього 0,5 % цього невичерпного ресурсу дозволило б з великим запасом перекрити будь-які прогнозовані потреби світової економіки у довгостроковій перспективі. Така надлишковість ресурсної бази робить сонячну генерацію фундаментом енергетичної безпеки майбутнього.

Незважаючи на такі оптимістичні показники, фахівці ІЕЕЕ виділяють два ключові бар'єри, які на поточному етапі стримують масове витіснення викопного палива сонячними технологіями. Першим стримуючим фактором є висока собівартість виробництва напівпровідникових фотоелектричних елементів, що безпосередньо впливає на капітальні витрати при будівництві станцій. Другою критичною проблемою залишається відносно низький коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних перетворювачів, що обмежує кількість отриманої енергії з одиниці площі обладнання [2]. На сьогоднішній день для найбільш поширених комерційних рішень на основі монокристалічного кремнію середній показник ККД коливається в межах 15 %.

Зауважемо, що значення ефективності є досить умовними, оскільки вони досягаються лише за ідеальних лабораторних або специфічних природних умов: у літній період, в ясну погоду близько полудня та за умови суворо перпендикулярного падіння променів на світлопоглинальну поверхню модуля. У реальних експлуатаційних умовах сонячна інсоляція постійно змінюється через рух Сонця по небосхилу зі сходу на захід. Зміна кута падіння променів та коливання інтенсивності випромінювання протягом світлового дня призводять до

того, що статично закріплені панелі працюють на піку своєї потужності лише короткий проміжок часу.

Для мінімізації негативного впливу геометричних факторів та підвищення загальної енергоефективності фотоелектричних установок впроваджуються системи автоматичного позиціонування (трекери). Такі інтелектуальні системи дозволяють сонячним панелям безперервно стежити за джерелом світла, підтримуючи оптимальний кут взаємодії з випромінюванням. Використання механізмів орієнтації дає можливість значно збільшити видобуток електроенергії (у деяких випадках до 30–40 %) та суттєво покращити техніко-економічні показники сонячних електростанцій, роблячи їх більш вигідними порівняно з традиційними енергосистемами.

Постановка задачі дослідження

На основі ґрунтовного аналізу теоретичного матеріалу та виявленої проблематики в галузі підвищення енергоефективності відновлюваних джерел, було сформовано ключовий вектор даного дослідження. Для досягнення головної мети роботи та практичної реалізації повноцінного автоматизованого комплексу необхідно вирішити ряд взаємопов'язаних науково-практичних завдань. Насамперед, передбачається розробка та математичне обґрунтування оптимізованого алгоритму функціонування системи просторового позиціонування фотоелектричних панелей. Наступним критичним етапом є проєктування апаратної частини, що включає створення повного комплексу технічної документації: розробку структурної, функціональної та детальної принципової електричної схем керуючого пристрою. Невід'ємною складовою цієї стадії є проведення аналізу та обґрунтованого вибору сучасної мікроелектронної елементної бази і компонентів сенсорної мережі, які гарантуватимуть високу надійність, завадостійкість та точність роботи майбутньої системи автоматичного керування.

Відповідно до висунутих технічних вимог, спроектована кіберфізична система повинна функціонувати в жорсткому режимі реального часу. Її базовий робочий цикл полягатиме у безперервному вимірюванні фактичних просторових параметрів — поточних значень зенітного кута та азимута — за допомогою

інтегрованих первинних перетворювачів (датчиків). Отримані масиви телеметричних даних мікроконтролер має алгоритмічно порівнювати з еталонними астрономічними координатами розташування Сонця. Ці ідеальні координати динамічно обчислюватимуться математичним ядром системи на основі поточних хронологічних маркерів: точного часу, дня, місяця та поточного року.

Спираючись на результати цього безперервного порівняльного аналізу та обчислення кутів неузгодженості, мікропроцесорний блок генеруватиме широтно-імпульсні керуючі впливи для двох виконавчих електродвигунів. Завдяки роботі цих приводів, кінематика двоосьового сонячного трекера відпрацьовуватиме команди таким чином, щоб механічно направляти несучу платформу в оптимальне положення. Кінцевою механічною метою цього процесу є постійне підтримання строго перпендикулярного (прямого) кута між площиною сонячних панелей та вектором падіння прямого сонячного випромінювання. Для забезпечення ефективної людино-машинної взаємодії, зручного моніторингу та візуального контролю за роботою установки, поточні координати просторової орієнтації трекера та статуси виконавчих механізмів будуть виводитися на інформаційний цифровий дисплей.

1.1 Принцип дії та характеристики сонячних фотоелементів

Сучасне суспільство стикається з глобальним енергетичним викликом, який поступово набуває масштабів світової кризи. Традиційні ресурси викопного палива, які десятиліттями слугували основою світової економіки, стрімко виснажуються, водночас завдаючи непоправної шкоди екологічному балансу нашої планети. Ці негативні тенденції, разом із безперервним зростанням чисельності населення та бурхливим технологічним прогресом, що потребує колосальних обсягів електрики, стали потужним каталізатором для масштабного переходу до відновлюваної енергетики. У цьому контексті технології сонячної генерації виступають одним із найбільш динамічних та перспективних напрямків. Сонячна радіація є практично невичерпним природним ресурсом, раціональна експлуатація якого здатна забезпечити людство екологічно чистою

електроенергією, не порушуючи при цьому природний баланс довкілля.

Величезний енергетичний потенціал Сонця можна ефективно акумулювати та трансформувати в електричний струм завдяки явищу внутрішнього фотоефекту, що реалізується у спеціалізованих напівпровідникових комірках. Незважаючи на технологічну досконалість сучасних матеріалів, базова ефективність одиничного фотоелемента все ще залишається на відносно низькому рівні. Головним обмежувальним фактором виступає пряма залежність вихідної потужності від густини світлового потоку, що поглинається активною площею пристрою. Оскільки траєкторія руху Сонця по небосхилу постійно змінюється, жорстко зафіксовані (статичні) сонячні модулі не здатні забезпечити максимальний рівень абсорбції. Найвищий коефіцієнт корисної дії досягається виключно за умови перпендикулярного падіння променів на приймальну площину, що обумовлює необхідність впровадження автоматизованих засобів управління їх просторовим положенням.

Для проектування надійних та продуктивних комплексів генерації необхідне глибоке розуміння фізико-технічних принципів функціонування фотоелектричних перетворювачів. Стандартна сонячна панель є складною матрицею, утвореною з множини окремих фотоелементів, які можуть комутуватися між собою послідовно або паралельно. Послідовна конфігурація з'єднань застосовується для пропорційного збільшення вихідної напруги системи, тоді як паралельна інтеграція дозволяє нарощувати сумарний генеруючий струм. Базовим матеріалом для виготовлення більшості комерційних комірок слугує кристалічний кремній, проте сучасна індустрія також активно використовує стрічкові структури та інноваційні тонкоплівкові полімерні з'єднання.

Функціональне призначення сонячних батарей полягає в безпосередньому вловлюванні сонячної радіації з подальшим її перетворенням на корисну електричну енергію (рис. 1.1). Складаючись із масиву комірок, такі панелі діють за аналогією з потужними акумуляторними блоками. Вони є ключовим, системоутворюючим елементом будь-якої фотоелектричної станції, незалежно від її цільового призначення чи масштабу. Серед головних експлуатаційних переваг таких модулів варто виділити конструктивну простоту, високу стабільність

електричних параметрів протягом тривалого часу та стійкість до зовнішніх завад. Крім того, класичні панелі не містять рухомих механічних вузлів, що мінімізує знос обладнання, знижує ризики аварійних відмов і суттєво полегшує процедури технічного обслуговування.



Рисунок 1.1 – Сонячна батарея Altek ALM-160P

Фізичний механізм генерації базується на взаємодії світлових частинок (фотонів) із напівпровідниковою структурою. Робочий елемент формується з кількох шарів кремнію, які цілеспрямовано легуються різними хімічними домішками для створення р-n-переходу. Шар р-типу характеризується надлишковою концентрацією позитивних зарядів («дірок»), тоді як шар n-типу перенасичений негативно зарядженими електронами. На межі їхнього контакту виникає специфічна збіднена зона з нейтральним зарядом, яка виконує функцію потенційного бар'єра.

При опроміненні р-n-переходу світловим потоком, фотони з відповідною енергією генерують додаткові електронно-діркові пари. Проте наявне внутрішнє електричне поле бар'єра перешкоджає вільному переміщенню електронів на інший бік. Внаслідок цього електрони змушені рухатися через зовнішній металевий провідник до споживача (навантаження), і лише після цього замикають коло на протилежному контакті переходу. Таким чином формується спрямований потік заряджених частинок, що дозволяє розглядати кожну фотоелектричну

комірку як джерело постійного струму. Величина цього струму строго корелює з обсягом світлової енергії, яку здатна поглинути поверхня (рис. 1.2).

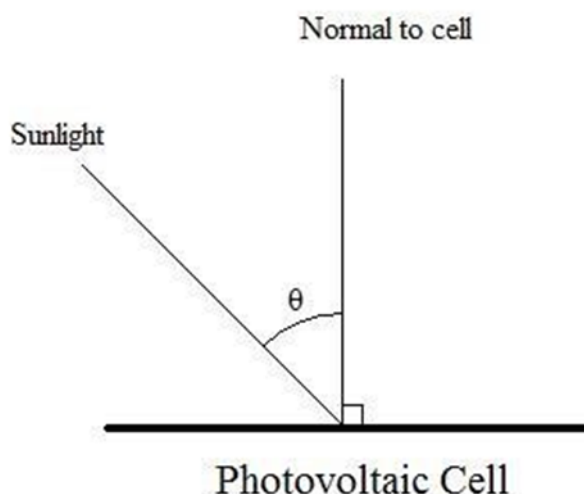


Рисунок 1.2 – Кут падіння на фотоелектричну комірку

Вектор, спрямований строго перпендикулярно до площини фотоелемента, утворює нормаль. Сонячні промені у реальних умовах переважно падають на поверхню під певним кутом відхилення від цієї нормалі. Кількість доступної світлової енергії, яку напівпровідниковий елемент може ефективно конвертувати в електрику, описується наступною математичною залежністю:

$$W = A \lambda \cos(\theta) \quad (1.1)$$

де A – обмежувальний коефіцієнт перетворення, зумовлений конструкцією панелі;;

λ – інтенсивність падаючого світла;

θ – кут відхилення вектора сонячного випромінювання від нормалі до площини.

Аналіз даного рівняння доводить, що максимальна генерація потужності можлива виключно у тому випадку, коли вектор сонячного світла збігається з нормальною віссю фотоелемента (тобто коли $\cos(0^\circ) = 1$). Натомість, якщо світло ковзає перпендикулярно до нормалі, генерація відсутня. Використання жорстко зафіксованих конструкцій неминуче призводить до суттєвих втрат енергетичного потенціалу впродовж дня через постійну зміну кута падіння. Раціональним інженерним рішенням цієї проблеми є інтеграція автоматичних систем стеження, які здатні динамічно підтримувати кут падіння променів у межах заданих

відхилень, що дозволяє максимізувати сумарний виробіток електроенергії [3].

1.2 Обґрунтування необхідності автоматизації просторового орієнтування сонячних модулів

Загальновідомим фактом у галузі геліоенергетики є те, що досягнення пікових значень коефіцієнта корисної дії (ККД) фотоелектричних перетворювачів можливе виключно за умови їх строго перпендикулярної орієнтації відносно вектора падіння сонячних променів. Однак, враховуючи безперервний видимий рух Сонця по небесній сфері протягом світлового дня, жорстко зафіксовані (статичні) сонячні модулі фізично не здатні забезпечити такий оптимальний кут освітленості на постійній основі. Це неминуче призводить до суттєвих енергетичних втрат і значного зниження загальної ефективності генерації електроенергії (рис. 1.3).

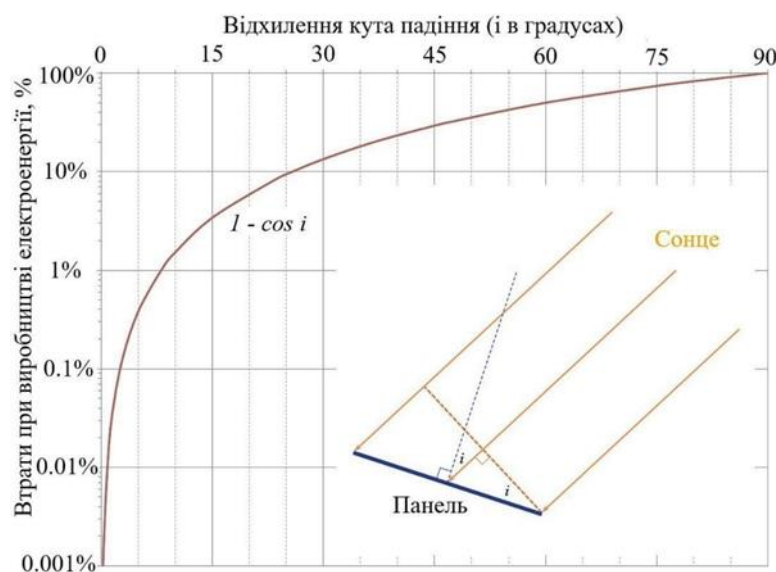


Рисунок 1.3 – Вплив похибки кута позиціонування на енергетичні втрати сонячної панелі

Наведений графік наочно ілюструє прямо пропорційну залежність між величиною кутового відхилення площини панелі від ідеального нормального (перпендикулярного) положення та обсягами втраченої електричної потужності. Аналіз цих даних дозволяє стверджувати, що застосування автоматизованої системи позиціонування (трекера), яка забезпечує точність наведення з похибкою не більше $\pm 5^\circ$, гарантує вловлення понад 99 % енергії прямого сонячного

випромінювання, а також 100 % розсіяного (дифузного) світла. Якщо аналізувати добову кінематику світила, оптимальний робочий сектор для рухомих панелей становить приблизно 150° .

Для наочності: стаціонарне розміщення сонячного модуля, спрямованого на бісектрису кута між географічними сходом та заходом, призводить до недоотримання близько 75 % енергії в ранкові та вечірні години у порівнянні з роботою автоматичного трекера. Поряд із добовим видимим рухом Сонця, критично важливо брати до уваги його сезонну кінематику. Протягом року площа сонячної траєкторії зміщується вздовж осі «південь-північ» у межах 45° (рис. 1.4). З огляду на це, статичне кріплення модулів під усередненим для всіх сезонів кутом гарантовано знижує загальнорічну генерацію електроенергії щонайменше на 8 % відносно її максимально можливого потенціалу.

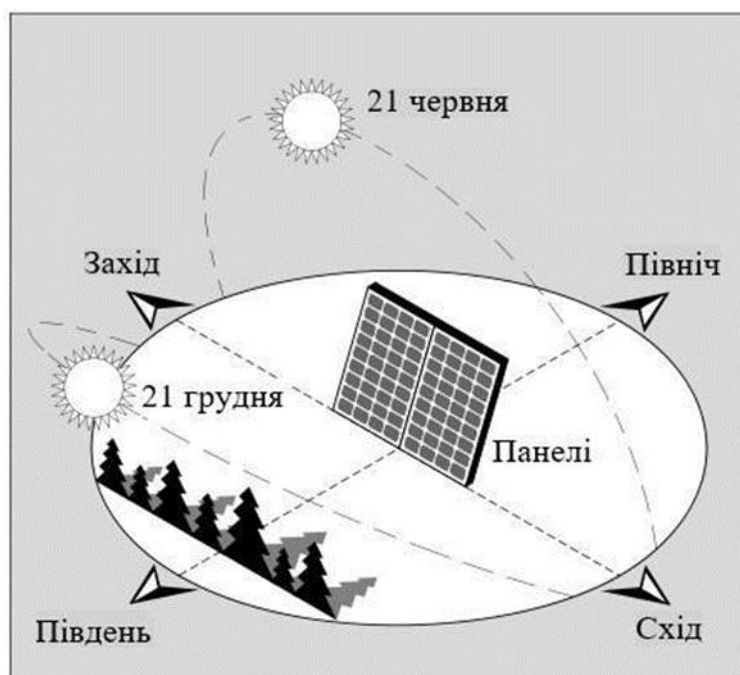


Рисунок 1.4 – Зміна положення Сонця в залежності від пори року

Ще одним критично важливим астрономічним параметром, що безпосередньо впливає на максимізацію генерації, є кут сонячного схилення. Цей параметр визначається як кут, утворений вектором сонячних променів та площиною земного екватора (рис. 1.5). Для практичних розрахунків у межах однієї доби величину схилення δ заведено вважати константою, яка дискретно змінюється з настанням наступного дня. Для математичного розрахунку цього

кута (у градусах) в інженерній практиці широко застосовується відоме емпіричне рівняння Купера:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + d)\right) \quad (1.2)$$

де d – порядковий номер дня у році (від 1 до 365).

З астрономічної точки зору, сонячне схилення також можна трактувати як кут між уявною лінією, що з'єднує центри мас Землі та Сонця, та її ортогональною проекцією на екваторіальну площину. Циклічна зміна цього параметра обумовлена нахилом осі обертання нашої планети до площини екліптики. Свого максимального позитивного значення ($+23,45^\circ$) схилення досягає 21 червня (у день літнього сонцестояння для Північної півкулі), а мінімального негативного ($-23,45^\circ$) — 21 грудня (у день зимового сонцестояння) [4].



Рисунок 1.5 – Геометрична інтерпретація кута сонячного схилення

Підсумовуючи вищезазначені фактори та враховуючи складну просторову кінематику видимого руху Сонця, стає очевидним: для забезпечення максимальної енергоефективності фотоелектричної станції необхідно реалізувати безперервне адаптивне керування просторовим положенням модулів. Ця задача успішно вирішується шляхом інтеграції сонячних трекерів — спеціалізованих електромеханічних пристроїв, які в автоматичному режимі здійснюють просторове стеження за світилом, динамічно змінюючи кут нахилу та азимут панелей (рис. 1.6).

Практичний досвід експлуатації доводить, що застосування трекінгових механізмів дозволяє підвищити сумарний виробіток електроенергії на 30–50 % порівняно зі статичними конструкціями. Це досягається завдяки тому, що панелі

залишаються орієнтованими під оптимальним кутом до Сонця впродовж усього світлового дня. Як наслідок, для досягнення цільової генеруючої потужності станції потрібна значно менша кількість сонячних модулів, що в підсумку оптимізує капітальні витрати та скорочує термін окупності всього енергетичного проєкту [5].

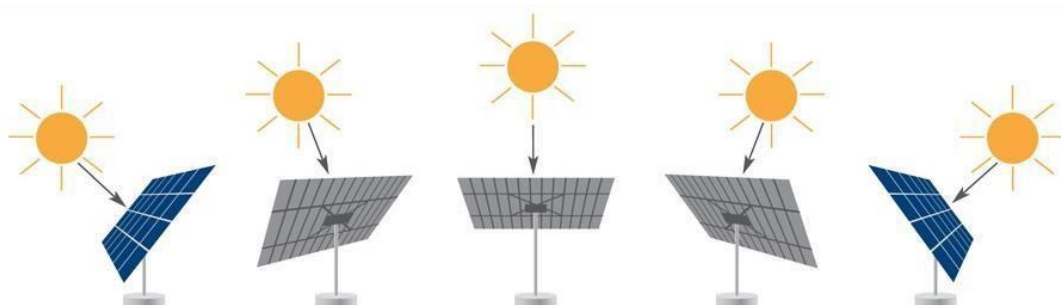


Рисунок 1.6 – Процес автоматичного просторового позиціонування фотоелектричного модуля

1.3 Класифікація та кінематичні схеми механізмів сонячного трекінгу

Процес вибору оптимальної конструкції сонячного трекера є багатовимірним інженерним завданням, вирішення якого безпосередньо залежить від конкретних експлуатаційних умов. Ключовими факторами, що детермінують вибір конфігурації опорно-поворотної системи, є регіональні метеорологічні умови, географічна широта об'єкта та доступна площа для інсталяції сонячної електростанції [6].

Сучасний ринок відновлюваної енергетики пропонує широкий спектр конструктивних рішень для монтажу фотоелектричних модулів (ФЕМ) від провідних світових та національних виробників. Ці рішення варіюються як за технічною складністю, так і за ціновим сегментом. Однак, незважаючи на різноманітність моделей, глобально всі інсталяційні системи поділяються на дві фундаментальні категорії: статичні та динамічні.

Статичні системи являють собою жорсткі металоконструкції, що забезпечують нерухому фіксацію ФЕМ. Такі конструкції орієнтуються переважно на південь (для Північної півкулі) із фіксованим кутом нахилу, який розраховується як оптимальний для конкретної географічної локації з метою максимізації середньорічного виробітку.

Натомість динамічні системи, які у професійній термінології називаються трекерами, обладнані електромеханічними приводами для автоматичного коригування просторового положення ФЕМ. Вони здатні змінювати кут нахилу до горизонту (зенітний кут) та азимутальний напрямок (орієнтацію за сторонами світу). На комерційному ринку найбільш поширені одноосьові та двоосьові трекінгові платформи [7]. Детальна класифікація систем стеження за кількістю та просторовим орієнтуванням осей обертання наведена на рисунку 1.7.

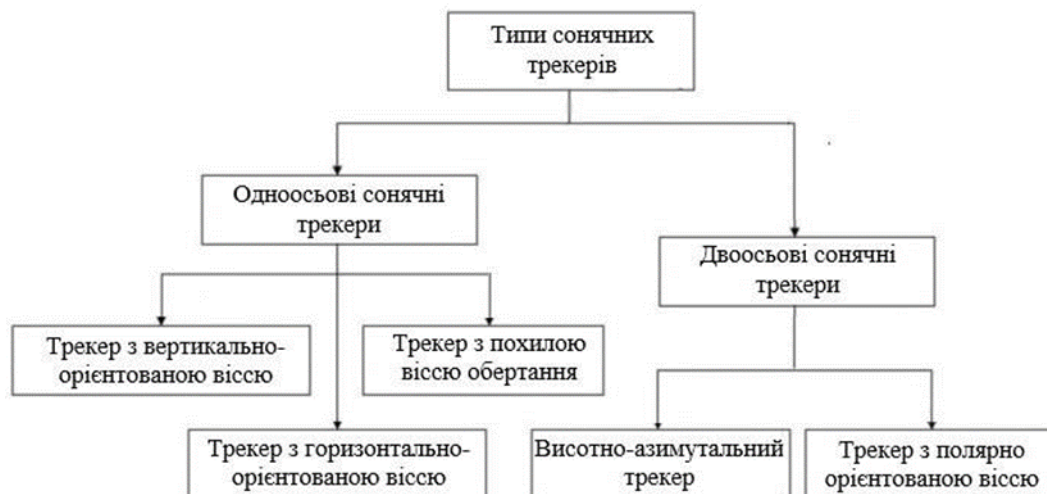


Рисунок 1.7 – Структурно-кінематична класифікація опорно-поворотних механізмів

1.3.1 Одноосьові сонячні трекери

Одноосьові трекери (Single Axis Trackers, SAT) — це механізми стеження, які здійснюють обертання сонячних панелей навколо однієї заданої осі. Просторова орієнтація цієї робочої осі може мати різні координатні напрямки, що дозволяє застосовувати різноманітні кінематичні алгоритми стеження. Залежно від положення осі обертання відносно земної поверхні, виділяють кілька базових модифікацій: з горизонтальною (HSAT), вертикальною (VSAT), похилою (TSAT) та полярно-орієнтованою віссю (PSAT). Експлуатаційна практика доводить, що застосування одноосьових рішень (зокрема, систем PSAT) здатне забезпечити приріст генерації електроенергії на рівні 35–55 % порівняно зі стаціонарними масивами [8]. Розглянемо детальніше основні підтипи:

1. Трекери з горизонтальною віссю (Horizontal Single Axis Tracker, HSAT) У конструкціях типу HSAT вісь обертання розташована строго паралельно до поверхні землі (горизонтально). Зовнішній вигляд такої системи представлено на рисунку 1.8.

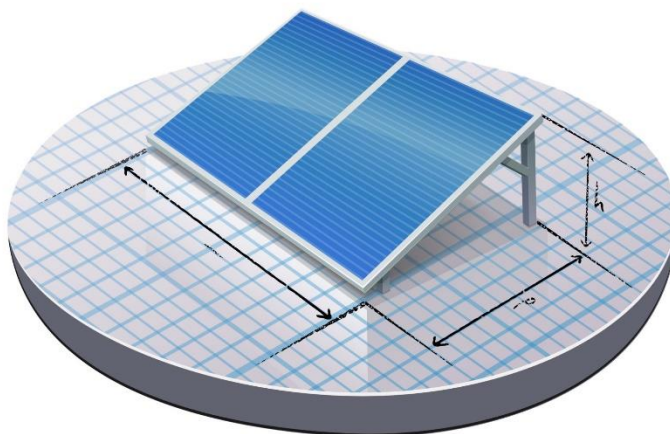


Рисунок 1.8 – Одноосьова система автоматичного позиціонування з горизонтальною віссю (HSAT)

HSAT це найбільш розповсюдженою та комерційно затребуваною конфігурацією серед одновісних систем. Принцип їхньої дії полягає в обертанні несучої труби зі встановленими ФЕМ зі сходу на захід уздовж нерухомої горизонтальної осі. Механічний рух зазвичай забезпечується малопотужним сервоприводом, який через систему важелів або редукторів синхронно обертає цілі ряди панелей. Хоча конструктивне виконання приводів може відрізнятися, базова мета залишається єдиною: нівелювати добовий рух Сонця, постійно орієнтуючи площину модулів назустріч прямим променям від світанку до заходу. Впровадження систем HSAT гарантує стабільний приріст генерації порівняно з фіксованими конструкціями. За статистичними даними, середньостатистична станція на базі HSAT щорічно генерує приблизно на 17 % більше електроенергії, ніж аналогічна за потужністю статична система. Специфічним архітектурним різновидом цієї технології є WHSAT (Wall Horizontal Single Axis Tracker) — трекери, адаптовані для фасадного монтажу на великих промислових або комерційних будівлях.

2. Трекери з вертикальною віссю (Vertical Single Axis Tracker, VSAT)

Конструкція VSAT передбачає обертання рухомої платформи навколо осі, розташованої перпендикулярно (вертикально) до площини землі (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Одноосьова система автоматичного позиціонування з вертикальною віссю (VSAT)

Такі трекери здійснюють азимутальне стеження за Сонцем протягом дня. Практика показує, що системи VSAT демонструють вищу енергоефективність у високих географічних широтах порівняно з горизонтальними аналогами HSAT. Проте при проектуванні полів на базі VSAT критично важливо проводити точні розрахунки взаємного затінення між сусідніми установками. Це необхідно для раціонального використання земельної ділянки та мінімізації втрат генерації від тіней у ранкові та вечірні години. Як правило, панелі на VSAT-трекерах монтуються не строго вертикально, а під певним фіксованим кутом нахилу до осі обертання, що відповідає оптимальному зенітному куту для даної місцевості [8].

3. Трекери з похилою віссю (Tilted Single Axis Tracker, TSAT) Системи TSAT є компромісним інженерним рішенням, де робоча вісь обертання закріплена під певним кутом відносно горизонту (між горизонтальним та вертикальним положеннями), як це проілюстровано на рисунку 1.10.

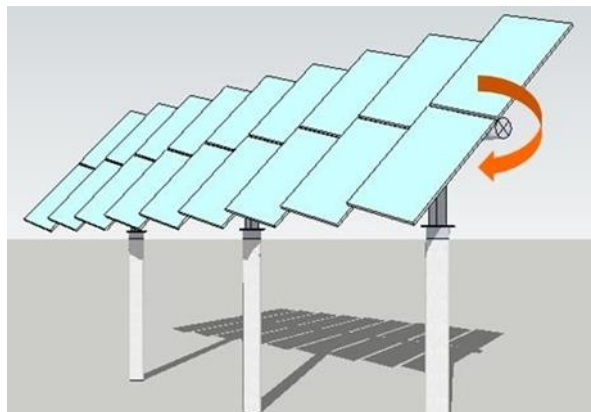


Рисунок 1.10 – Одноосьова система автоматичного позиціонування з похилою віссю (TSAT)

1.3.2 Двоосьові сонячні трекари

Двоосьові трекари (Dual Axis Trackers, DAT) являють собою високотехнологічні кінематичні системи, що володіють двома ступенями свободи. Наявність двох незалежних, але синхронізованих осей обертання дозволяє позиціонувати площину ФЕМ з абсолютною точністю відносно поточного положення Сонця на небосхилі. Головною і беззаперечною перевагою DAT-систем є їхня здатність підтримувати вектор падіння сонячних променів суворо перпендикулярно до поверхні панелей, що гарантує генерацію максимальної (пікової) потужності протягом усього світлового дня, незалежно від сезону. У світовій практиці домінують дві базові конструктивні схеми двоосьових трекерів: TTDAT та AADAT.

1. Двоосьові трекари на опорному стовпі (Tip-Tilt Dual Axis Tracker, TTDAT) Конструкція TTDAT (рис. 1.11) базується на використанні єдиної потужної вертикальної опори (стовпа), на вершині якої монтується рухома несуча рама з фотоелектричними модулями.



Рисунок 1.11 – Двоосьовий механізм просторового орієнтування на центральній опорі (TTDAT)

Стеження в площині "схід-захід" (азимутальне) забезпечується завдяки обертанню головного підшипникового вузла, розміщеного на вершині несучого стовпа. Безпосередньо на цьому поворотному механізмі змонтовано другий привід, який відповідає за зміну zenітного кута нахилу панелей (рух "північ-південь"). З огляду на габарити рухомої площини та амплітуду її поворотів, масиви TTDAT-трекерів вимагають встановлення з низькою щільністю забудови. Це критично для запобігання відкиданню довгих тіней від одного трекера на інший, особливо в періоди, коли Сонце знаходиться низько над горизонтом (на світанку, заході сонця та в зимові місяці). Для оптимізації цього процесу сучасні системи керування використовують алгоритми "backtracking", які примусово зменшують кут нахилу панелей до горизонтального положення в критичні години, свідомо жертвуючи ідеальним кутом падіння заради уникнення повного затінення робочих площин [9].

2. Двоосьові трекери азимутально-кутового типу (Azimuth Altitude Dual Axis Tracker, AADAT) Системи AADAT, на відміну від консольних TTDAT, базуються на великій опорній площині з поворотним кільцем (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Двоосьова система автоматичного позиціонування карусельного типу (AADAT)

Хоча функціонально системи AADAT і TTDAT виконують ідентичне завдання просторового позиціонування, вони суттєво відрізняються кінематикою та алгоритмами управління несучою конструкцією. AADAT-трекери монтуються на масивному поворотному кільці (схожому на карусель), яке встановлюється безпосередньо на підготовлений фундамент або спеціальну низьку платформу. Головною механічною перевагою такої архітектури є рівномірний розподіл величезної ваги несучої рами та самих панелей по всьому периметру опорного кільця. Це усуває проблему критичних точкових навантажень на центральну опору, що є слабким місцем систем TTDAT під час сильних вітрових поривів. Завдяки високій структурній жорсткості, платформи AADAT здатні нести значно більшу кількість ФЕМ на одній установці. Однак, як і у випадку з іншими двоосьовими системами, для забезпечення безтіньового режиму роботи та досягнення максимальної генерації, такі масивні трекери вимагають значних площ для встановлення [10].

1.4 Дослідження продуктивності автоматизованих систем позиціонування порівняно зі стаціонарними

Впровадження систем автоматичного позиціонування у сфері геліоенергетики є не просто технологічним трендом, а економічно та технічно обґрунтованим кроком, який виводить ефективність генерації на принципово новий рівень. Інтеграція засобів автоматики та електроприводів для керування

просторовим положенням фотоелектричних модулів надає цілу низку беззаперечних переваг у порівнянні з класичними статичними конструкціями.

По-перше, головною перевагою є суттєве збільшення обсягів виробленої електроенергії, яке може сягати до 40 % залежно від географічної широти та типу застосованого трекера. Це досягається завдяки постійному утриманню оптимального кута падіння сонячних променів, що дозволяє максимально ефективно використовувати ранкові та вечірні години інсоляції. По-друге, таке зростання генерації прямо конвертується у збільшення фінансових прибутків від реалізації електроенергії у довгостроковій перспективі. Підвищена продуктивність станції дозволяє значно пришвидшити термін окупності інвестицій у додаткове електромеханічне обладнання. По-третє, наявність автоматизованої системи керування вирішує критично важливе питання експлуатаційної безпеки. Завдяки інтеграції з метеорологічними датчиками (зокрема, анеометрами), система контролю здатна оперативно реагувати на штормові попередження або сильні пориви вітру. У таких випадках автоматика переводить площину з панелями у безпечне (флюгерне або горизонтальне) положення, мінімізуючи аеродинамічний опір та запобігаючи механічному руйнуванню несучої конструкції.

Для об'єктивного підтвердження високої ефективності використання трекінгових систем доцільно провести порівняльний аналіз емпіричних даних щодо виробітку електроенергії фотоелектричними станціями (ФЕС) з різними типами опорних конструкцій протягом повного календарного року. В якості базової моделі для розрахунку обрано ФЕС зі встановленою номінальною потужністю 10 кВт, яка територіально розміщена в місті Києві. Розрахункова модель враховує сумарні системні втрати на рівні 24,3 % (які включають втрати в інверторі, кабельних лініях, а також температурну деградацію модулів). Для статичної установки прийнято оптимальний для даної місцевості фіксований кут нахилу відносно горизонту, що становить 34° [11]. Деталізовані результати щомісячної генерації наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Кількість кВт·год вироблених кожного місяця для ФЕС з різним кріпленням

Місяць	Статична ФЕС	Одноосьова ФЕС	Двоосьова ФЕС
Січень	262	297	306
Лютий	417	494	501
Березень	847	1080	1090
Квітень	1010	1350	1370
Травень	1210	1720	1780
Червень	1160	1620	1670
Липень	1180	1620	1680
Серпень	1090	1480	1520
Вересень	817	1050	1080
Жовтень	591	721	753
Листопад	250	281	297
Грудень	195	218	243
Всього за рік	9029	11931	12290

Детальний аналіз статистичних даних, наведених у таблиці 1.1 та візуалізованих на рисунку 1.13, безапеляційно доводить технологічну перевагу станцій, оснащених системами автоматичного позиціонування. Найбільший приріст генерації спостерігається у весняно-літній період (з квітня по серпень), коли світловий день є найдовшим, а траєкторія Сонця має найширшу амплітуду. У цей період статичні панелі втрачають колосальну кількість енергії вранці та ввечері, тоді як трекери продовжують ефективно працювати.

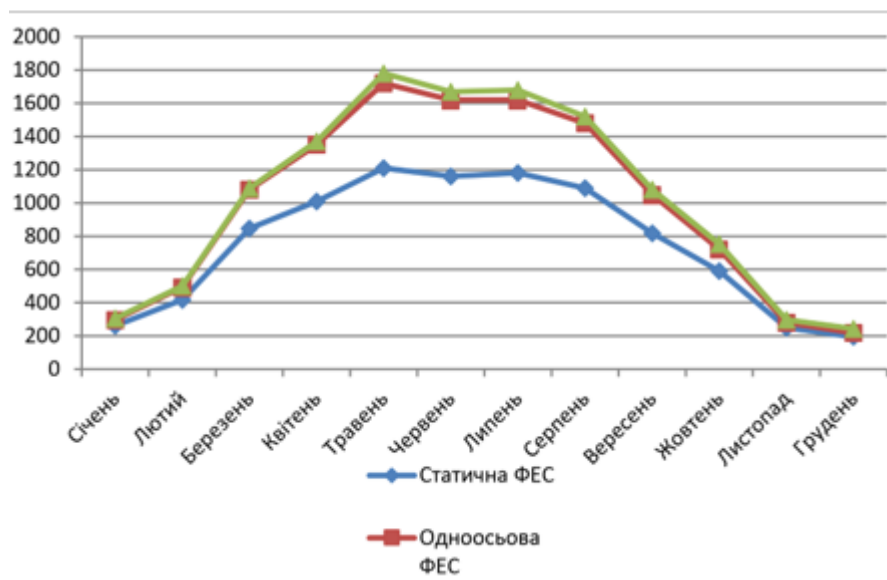


Рисунок 1.13 – Графік виробітку ФЕС з різним кріпленням

Підсумовуючи річні показники, можна констатувати, що базова статична ФЕС згенерувала 9029 кВт·год електроенергії. Водночас інтеграція одноосьового механізму дозволила підвищити цей показник до 11931 кВт·год, а впровадження високоточної двоосьової системи керування забезпечило максимальний виробіток на рівні 12290 кВт·год. Таким чином, у конкретних кліматичних та географічних умовах Києва, застосування повноцінного двоосьового трекера призвело до сумарного збільшення річної генерації електроенергії на 36,1 % у порівнянні з жорстко зафіксованою установкою. Це наочно демонструє, що автоматизація процесу орієнтації є ключовим фактором оптимізації сучасних систем відновлюваної енергетики.

1.5 Будова сонячного трекера

У сучасній геліоенергетиці сонячний трекер розглядається як спеціалізований багатокомпонентний електромеханічний комплекс. Його головне функціональне призначення полягає в динамічному просторовому орієнтуванні генеруючих робочих поверхонь безпосередньо на джерело світлового випромінювання. У контексті даного дослідження такими робочими поверхнями виступають масиви напівпровідникових сонячних фотоелектричних модулів (ФЕМ). Архітектурну будову та системну інтеграцію типової сонячної електростанції, що функціонує на базі системи автоматичного позиціонування, наочно продемонстровано на рисунку 1.14.

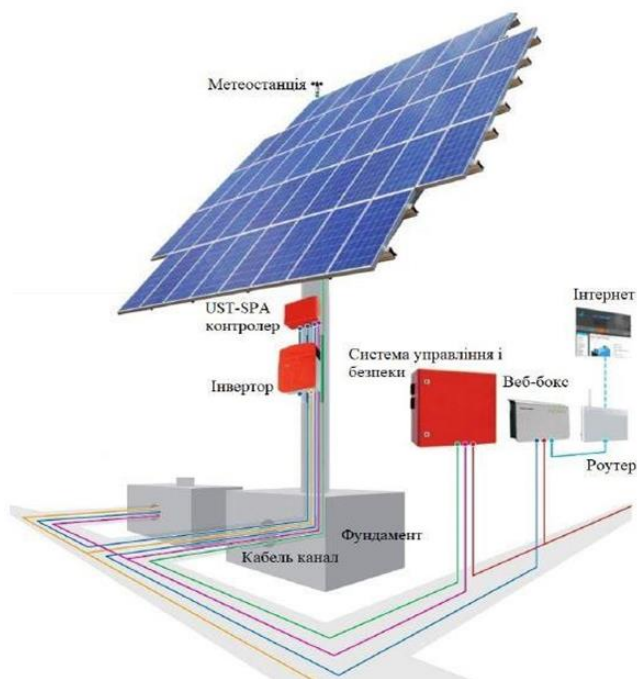


Рисунок 1.14 – Зображення сонячного трекера

З інженерної точки зору, сонячний трекер у своїй максимальній (повній) апаратній комплектації являє собою складний синтез механічних, електронних та програмних підсистем. Базовим опорним елементом є несуча металоконструкція, яка структурно розділяється на статичну (фундаментну) частину та рухому кінематичну раму, що забезпечує обертання системи навколо однієї або двох координатних осей. За безпосередній рух цієї масивної конструкції відповідає система просторового позиціонування. Її ключовими виконавчими механізмами є промислові електромеханічні приводи або лінійні актуатори (зовнішній вигляд та спосіб інтеграції яких проілюстровано на рисунку 1.15), а також відповідні мікропроцесорні пристрої та драйвери, що ними керують.



Рисунок 1.15 – Електромеханічний лінійний привід системи автоматичного позиціонування

Окремим важливим блоком є комплексна система безпеки та метеорологічного моніторингу. Вона включає апаратний захист від електричних перевантажень, підсистему блискавкозахисту, а також мережу первинних перетворювачів (датчиків) для безперервного аналізу поточних погодних умов, таких як швидкість вітру чи наявність опадів. Для забезпечення людино-машинної взаємодії, налаштування алгоритмів та проведення регламентного сервісного обслуговування енергокомплексу передбачена локальна система керування з відповідним операторським інтерфейсом (HMI). У сучасних умовах діджиталізації обов'язковою є наявність підсистеми віддаленого доступу та телеметрії. Зазвичай ця функція реалізується за допомогою промислових маршрутизаторів (роутерів), які забезпечують безперебійне підключення станції до глобальної мережі Інтернет для моніторингу статусу генерації в режимі реального часу.

Для точного обчислення астрономічних алгоритмів руху Сонця часто застосовується система супутникової навігації (наприклад, GPS-модулі). Вона дозволяє мікроконтролеру автоматично визначати точні географічні координати розташування станції та синхронізувати світовий час. Слід зазначити, що для стаціонарно змонтованих трекерів (які не змінюють свою локацію) інтеграція навігаційних модулів не є критично необхідною, оскільки географічні координати можна запрограмувати в пам'ять контролера одноразово на етапі пусконаладжувальних робіт. Завершальною ланкою енергетичного перетворення є силове обладнання — інвертор. Він виконує функцію трансляції згенерованого модулями постійного струму в змінний струм стандартизованої частоти та напруги для подальшої передачі кінцевому споживачеві або віддачі в загальну електромережу. Залежно від встановленої потужності поля та обраної архітектури (стринг-інвертори чи централізовані рішення), кількість інверторів на один трекінговий комплекс може варіюватися від одного до трьох [12].

Проте в реальних умовах комерційної експлуатації впровадження трекера у його вичерпній (максимальній) апаратній комплектації не завжди є економічно доцільним кроком. З метою оптимізації капітальних витрат (CAPEX), інженери

часто спрощують конфігурацію, виключаючи з неї певні допоміжні вузли та залишаючи лише ті, що є критично важливими для базового функціонування установки. Особливу увагу при проектуванні приділяють питанням механічної міцності та аеродинамічної стійкості. Архітектура трекера повинна гарантовано витримувати екстремальні вітрові навантаження. Це зумовлено тим фізичним фактором, що зі збільшенням сумарної площі сонячних панелей, розміщених на єдиній рухомій платформі, прямо пропорційно зростає і так звана «парусність» усієї конструкції. Високий аеродинамічний опір вимагає застосування більш надійних матеріалів, посиленних редукторних механізмів та впровадження спеціальних програмних алгоритмів захисного переведення системи у горизонтальне (флюгерне) положення при отриманні сигналів про штормове попередження.

1.6 Методи та алгоритми автоматичного керування системами позиціонування

Ефективність генерації електроенергії у фотоелектричних комплексах залежить від складної сукупності фізико-метеорологічних чинників, серед яких базова інтенсивність інсоляції, тепловий режим довкілля та прозорість атмосфери. Проте домінуючий вплив на рівень вихідної потужності має саме просторова геометрія — кут падіння світлового потоку на активну площину напівпровідника. Виходячи з цього, головне технічне призначення будь-якої автоматизованої системи стеження полягає у постійному та прецизійному відпрацюванні кутових координат робочої платформи для утримання її в ідеально перпендикулярному положенні до Сонця [13]. Враховуючи безперервну добову кінематику світила від сходу до заходу, вектор освітленості жорстко закріплених модулів невпинно відхиляється від нормалі. Через таку просторову неузгодженість, реальна густина світлової енергії, яку здатна абсорбувати нерухома панель, апріорі залишається нижчою від теоретично доступного максимуму прямого випромінювання.

Проблема оптимізації кута падіння для максимізації енерговидобутку є предметом численних сучасних досліджень. Впровадження систем стеження за Сонцем (трекінг-систем) визнано найбільш раціональним технологічним

рішенням для подолання цього бар'єру. Широкомасштабні експериментальні дані доводять: якщо система здатна підтримувати кут падіння променів близьким до прямого (90°) протягом усього періоду інсоляції, генерація потужності може зрости на величину до 40 % порівняно з аналогічними за площею статичними установками [14]. За принципом дії та способом формування керуючого впливу всі трекінгові механізми умовно поділяються на три базові категорії: пасивні, активні (із замкненим контуром) та програмні (з відкритим контуром).

Пасивні системи стеження

Ці системи функціонують без використання електронних компонентів чи електродвигунів. Їхня дія базується на термодинамічних властивостях специфічних рідин або газів (наприклад, фреону). Класичний пасивний трекер оснащений двома резервуарами (пнеумоупорами), розташованими на західному та східному краях конструкції. Під впливом сонячного тепла речовина в освітленому резервуарі розширюється, перетікає в тіньову зону, і зміщення центру мас змушує конструкцію механічно повертатися за Сонцем. Незважаючи на автономність, пасивні трекери характеризуються високою інерційністю та низькою точністю наведення, оскільки процес термодинамічного розширення сильно залежить від непередбачуваної температури навколишнього середовища та наявності холодного вітру.

Активні системи стеження (із замкненим контуром)

З розвитком мікроелектроніки домінуючу позицію зайняли активні системи, які використовують оптичні датчики (фоторезистори або фотодіоди) для формування зворотного зв'язку. Такі сенсори монтуються на різних площинах трекера (рис. 1.17).

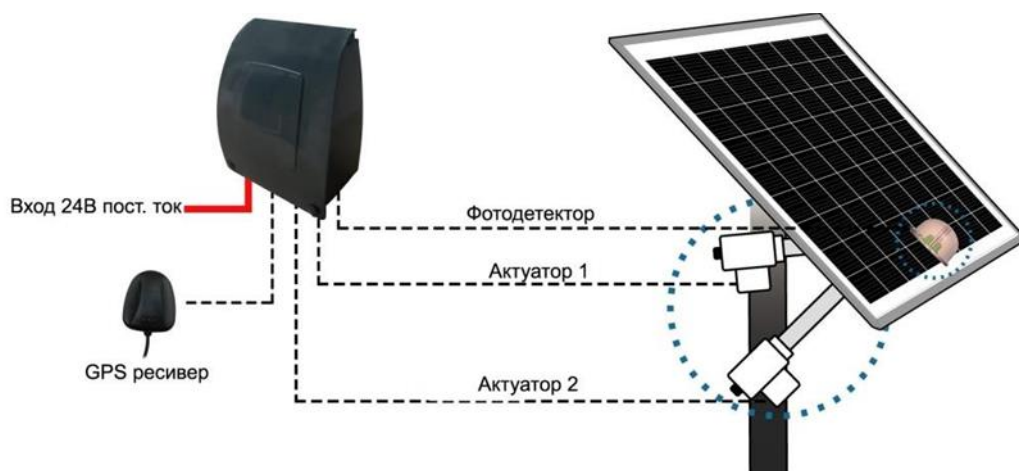


Рисунок 1.17 – Зображення трекеру на фотоприймачах

Суть методу полягає у порівнянні рівнів освітленості: якщо на один датчик потрапляє більше світла, мікроконтролер генерує сигнал неузгодженості та подає живлення на актуатори. Двигуни обертають конструкцію доти, доки сигнали від усіх датчиків не зрівнюються, що свідчитиме про перпендикулярне положення панелі до джерела світла [16]. Беззаперечною перевагою такого підходу є його відносна простота та низька вартість реалізації. Однак оптичні системи мають суттєві експлуатаційні недоліки. Їхня робота стає вкрай нестабільною в умовах мінливої хмарності: коли Сонце ховається за хмарами, розсіяне світло змушує систему хаотично "шукати" найяскравішу точку на небі, витрачаючи акумульовану енергію на марні рухи приводів. Крім того, на точність критично впливає забруднення лінз датчиків пилом або снігом.

Програмні системи стеження (з відкритим контуром)

Сучасним стандартом надійності є системи з відкритим контуром управління (Open-loop trackers), які не залежать від поточних погодних умов чи оптичних сенсорів. Їхня робота базується на математичному розрахунку астрономічної траєкторії руху Сонця (рис. 1.18).

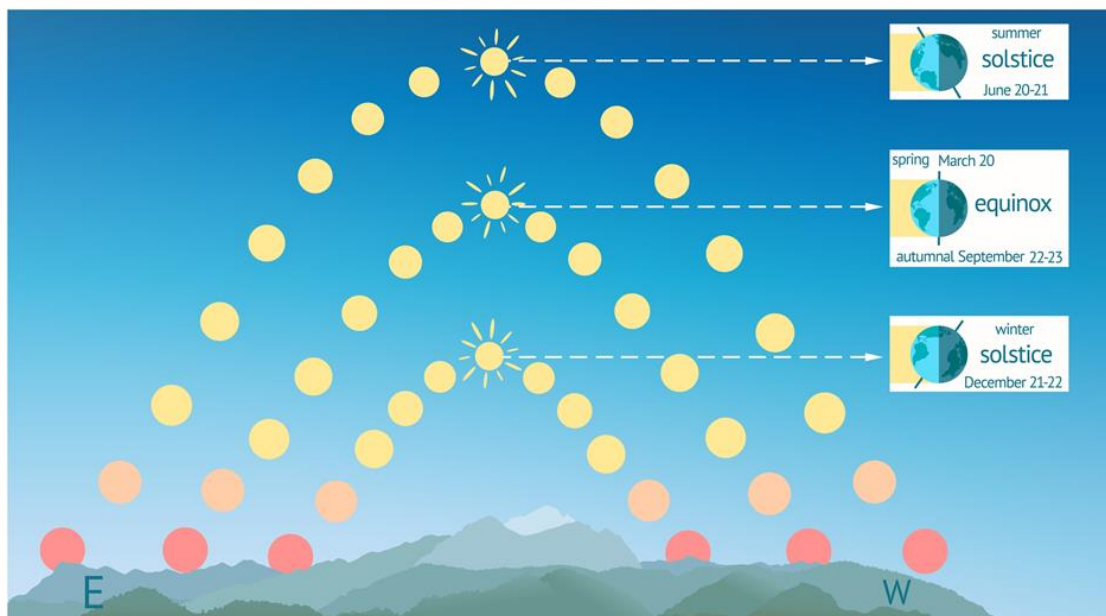


Рисунок 1.18 – Сферична система координат для розрахунку траєкторії Сонця

Для реалізації цього методу мікроконтролер використовує вбудований годинник реального часу (RTC) та заздалегідь завантажену астрономічну базу даних або спеціальні математичні алгоритми (наприклад, алгоритм SPA — Solar Position Algorithm). Знаючи точні географічні координати установки (широту та довготу), поточну дату і точний час, процесор з високою точністю обчислює дві ключові просторові координати Сонця: азимут та зенітний кут (рис. 1.19) [17].

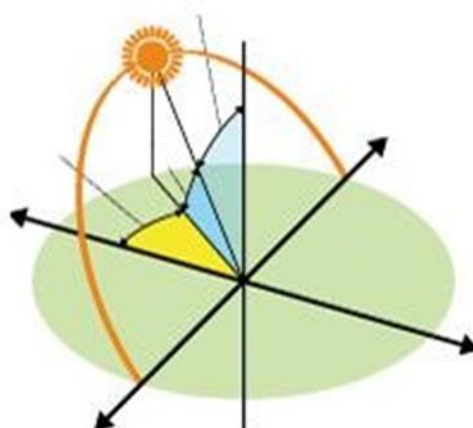


Рисунок 1.19 – Сезонні зміни сонячних треків для географічної широти 49°

- Азимут — є кут, що відраховується у горизонтальній площині від напрямку на географічний південь (або північ) до проекції Сонця на цю площину.

• **Зенітний кут** — є кут між вертикаллю (напрямком у зеніт) та вектором напрямку на центр сонячного диска (доповнює кут висоти Сонця над горизонтом до 90°).

Після розрахунку цих координат мікроконтролер перетворює їх у керуючі імпульси для двигунів, які переміщують панелі у розраховану позицію. Головна перевага такого підходу — абсолютна незалежність від хмарності, туману чи забруднень: трекер «знає», де має бути Сонце, і рухається туди навіть у суцільну темряву чи негоду, уникаючи зайвих енерговитрат на "пошуки". Основним недоліком відкритої системи є висока чутливість до початкових похибок монтажу. Якщо при встановленні опорної колони допущено відхилення від вертикалі, або початкова орієнтація на південь виконана неточно, розраховані координати не збігатимуться з реальним положенням світила, що призведе до систематичної втрати потужності [15].

Гібридні системи та ручне керування

Існують також спрощені хронометричні системи (на базі таймерів), де рух відбувається за жорстко заданим алгоритмом (наприклад, поворот на 15 градусів щогодини). Проте їхня точність є низькою, оскільки вони часто не враховують сезонні зміни сонячного схилення та різний час сходу/заходу Сонця протягом року. Наочну динаміку зміни сонячного шляху залежно від місяця року для широти 49° (яка є актуальною для більшої частини території України) наведено на рисунку 1.20[17].

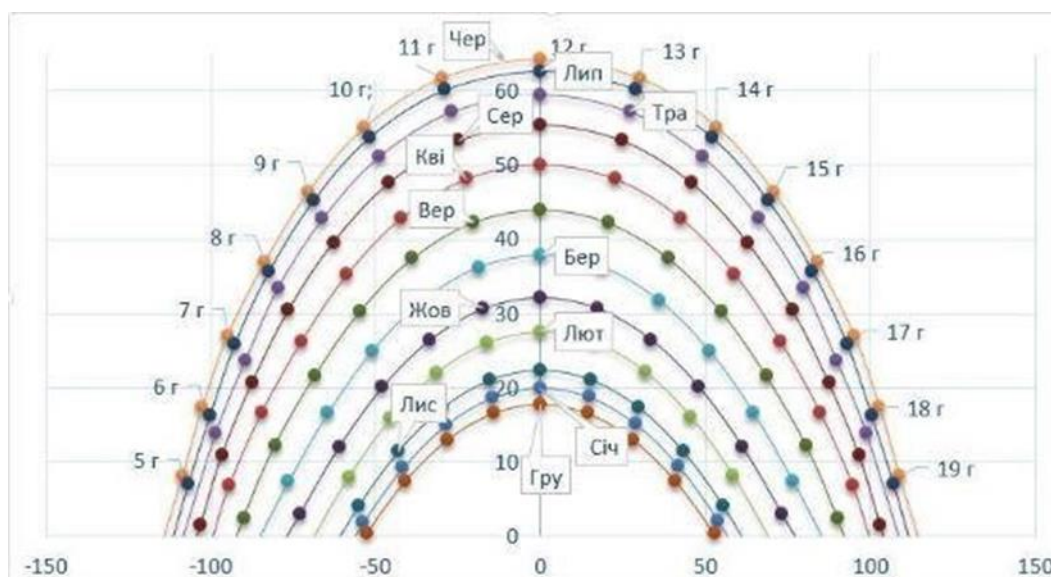


Рисунок 1.20 – Середнє значення сонячного шляху для одного дня кожного місяця на широті 49°

Теоретично можливою залишається і концепція ручного позиціонування систем, де оператор періодично змінює кут нахилу модулів (зазвичай по осі північ-південь) відповідно до зміни сезону. Хоча такий підхід і здатен забезпечити до 10 % приросту енергії на невеликих приватних станціях, для масштабних комерційних СЕС він є абсолютно нерентабельним через колосальні трудовитрати та неможливість оперативного реагування на щоденні зміни.

1.7 Огляд існуючих рішень

У сучасних реаліях сонячна енергетика стрімко інтегрується як у промисловий сектор, так і в побутову інфраструктуру, стаючи економічно обґрунтованою альтернативою традиційним джерелам. Продуктивність будь-якої геліосистеми має пряму кореляцію з обсягом поглиненої сонячної радіації. Саме тому впровадження автоматизованих систем стеження (трекерів) є найбільш дієвим інженерним методом максимізації рівня інсоляції, що потрапляє на робочу площу фотоелектричних модулів. Перед розробниками таких систем стоять два ключові завдання: максимізація енергетичної ефективності та мінімізація капітальних витрат на обладнання. Сучасний механізм просторового позиціонування має відповідати суворим критеріям надійності: забезпечувати високу точність наведення за азимутом і зенітом, мати алгоритм автоматичного повернення у стартове (східне) положення після заходу Сонця або в нічний час, а також підтримувати адекватну роботу в умовах щільної хмарності або часткового затінення робочої поверхні [18].

Наукова спільнота має багатий історичний досвід розробки різноманітних систем стеження. Першим задокументованим рішенням вважається повністю механічний трекер, сконструйований дослідником Фінстером (Finster) ще у 1962 році. Наступним еволюційним кроком стала робота Сааведри (Saavedra), який запропонував механізм, оснащений електронним блоком автоматичного керування, що застосовувався для просторової орієнтації вимірювального приладу

— піргеліометра Епплі. Значний науковий внесок зробив Мальдонадо (Maldonado), розробивши в стінах Університету UTFSM трекер, де координати Сонця динамічно обчислювалися за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми або визначалися сервоприводом. Це рішення гарантувало високоточну автоматичну орієнтацію піргеліометра [18]. З розвитком напівпровідникової бази та мікропроцесорної техніки кількість концептуальних прототипів зростала експоненціально. Для розуміння еволюції систем керування доцільно провести критичний аналіз кількох типових апаратних рішень.

Система на базі апаратних компараторів та драйвера моста

Перша з аналізованих систем належить до класу активних оптичних трекерів і функціонує на базі аналогових датчиків освітленості. Принципову електричну схему цього пристрою наведено на рисунку 1.20. Апаратним логічним ядром керуючої плати виступає мікросхема LM339, що містить чотири незалежні аналогові компаратори в єдиному корпусі. Для силового керування виконавчими електродвигунами застосовується інтегральна мікросхема L293D, яка реалізує конфігурацію зведеного Н-моста, що дозволяє керувати напрямком обертання двох моторів.

Окрім цих мікросхем, плата включає набір дискретних пасивних компонентів для узгодження сигналів. Роль первинних оптичних перетворювачів виконують чотири фоторезистори (LDR1 – LDR4). Вони утворюють сенсорний блок, який відповідає за визначення кута падіння променів відносно нормалі панелі. Сигнали з подільників напруги, утворених цими фоторезисторами, подаються на входи компараторів LM339. Останні формують логічні керуючі імпульси для силового драйвера L293D. Для реалізації двоосьового стеження фоторезистори LDR1 і LDR2 розміщуються вздовж осі X (азимутальної), а пара LDR3 і LDR4 — вздовж осі Y (зенітної). Схема калібрується балансувальними резисторами таким чином, щоб за умови перпендикулярного падіння променів на площину всі датчики мали однаковий опір. У цьому збалансованому стані на виходах компараторів формується низький рівень напруги, і приводи знаходяться у стані спокою.

Логіка функціонування даної схеми базується на принципі диференціального порівняння. Розглянемо алгоритм відпрацювання кінематики по осі X. Якщо

датчик LDR2 освітлюється інтенсивніше, ніж LDR1, його опір падає, що призводить до появи високої напруги на виході компаратора A2. Це активує відповідний канал драйвера, і двигун M1 починає обертати платформу в заданому напрямку (наприклад, проти годинникової стрілки), повертаючи панель до джерела світла. Натомість, якщо LDR1 отримує більше світлової енергії, баланс потенціалів змінюється в інший бік, що активує реверсний рух двигуна (за годинниковою стрілкою). За ідентичним диференціальним алгоритмом працює і система стеження по осі Y.

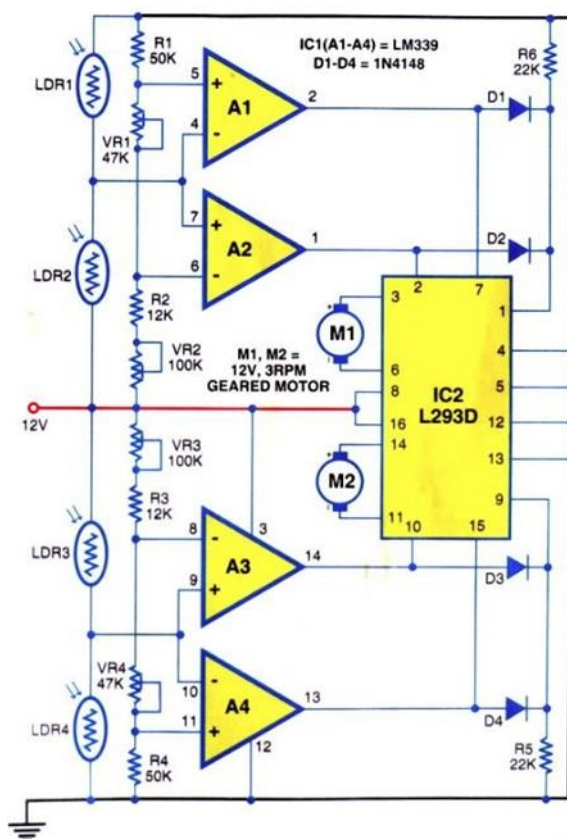


Рисунок 1.21 – Схема керування актуатором із використанням диференціального підсилювача та транзисторних ключів

Ця конфігурація системи позиціонування відрізняється масштабованістю: її потужності вистачає як для автономного енергозабезпечення домогосподарства, так і для інтеграції в більш масштабні комерційні проєкти. Вагомою апаратною перевагою схеми є її невибагливість до прецизійної точності застосованих дискретних резисторів. Однак суттєвим експлуатаційним недоліком є вразливість

до якості налаштування: ефективність відпрацювання траєкторії критично залежить від первинного балансування апаратної логіки потенціометрами.

Система на базі операційних підсилювачів та дискретних транзисторів

Друга аналізована апаратна схема також функціонує на принципі диференціального порівняння освітленості, але відрізняється класичною аналоговою реалізацією. Її обчислювальним ядром є здвоєний операційний підсилювач (ОП) LM1458, сигнал з якого надходить на силовий каскад, побудований на комплементарній парі біполярних транзисторів BD139 (NPN) та BD140 (PNP). Схема доповнена фоторезисторами та захисними діодами 1N4004 (рис. 1.22).

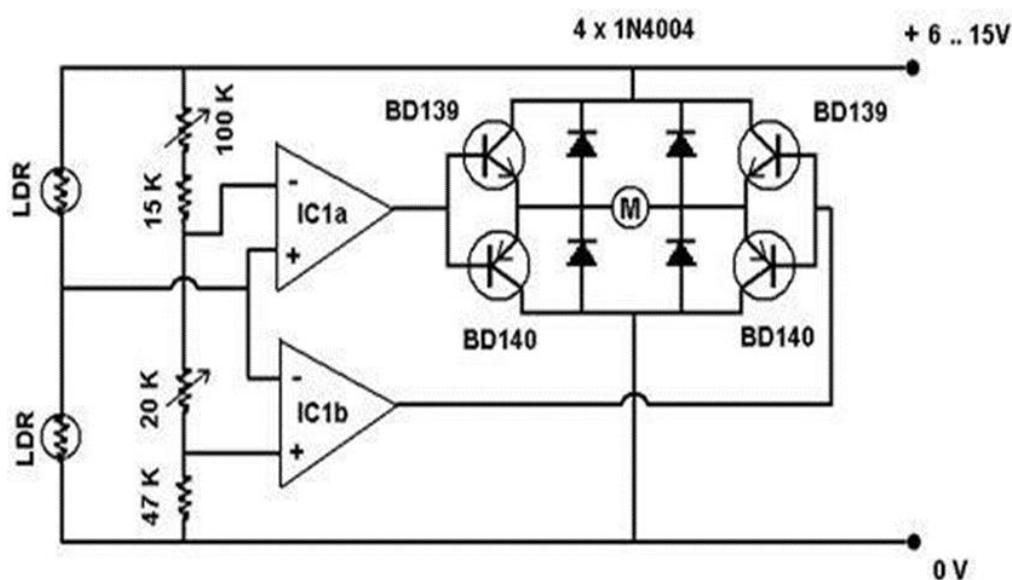


Рисунок 1.22 – Схема сполучення мікроконтролера з виконавчими механізмами та сенсорною мережею

Як видно з принципової схеми, керування виконавчим двигуном постійного струму М здійснюється залежно від комбінації логічних рівнів, що формуються на виходах операційних підсилювачів IC1a та IC1b. Алгоритм роботи приводів при різних станах виходів ОП зведено у таблицю 1.2.

Транзистори в цьому дискретному Н-мості функціонують попарно по діагоналі, комутуючи позитивний (+Ve) або негативний (–Ve) потенціал джерела живлення безпосередньо на клемі двигуна, що дозволяє реалізувати як пряме, так і зворотне (реверсне) обертання. В інженерії електроприводів важливо враховувати, що під час зняття напруги живлення (зупинки), масивний ротор

двигуна з редуктором продовжує обертатися за інерцією. У цей момент електрична машина переходить у генераторний режим, продукуючи зворотну електрорушійну силу (ЕРС), амплітуда якої здатна спричинити тепловий пробій $\mu\text{-}$ переходів транзисторів. Саме для надійного шунтування цих індуктивних викидів струму в мостовій схемі застосовано чотири захисні (flyback) діоди [18].

Таблиця 1.2

Співвідношення входних сигналів позиціонування та вихідних станів виконавчих механізмів

Вихід IC1a	Вихід IC1b	Стан двигуна
Низький	Низький	Зупинений
Низький	Високий	Вперед*
Високий	Високий	Зупинений
Високий	Низький	Назад*

Примітка: фактичний напрямок обертання залежить від полярності фізичного підключення клем двигуна.

У стаціонарному режимі ця аналогова схема безперервно порівнює значення опадів напруги на фотодатчиках LDR. До того часу, поки рівень їхньої освітленості симетричний, на виходах обох ОП зберігається баланс (стан спокою). Однак, коли видиме положення Сонця змінюється і виникає світловий градієнт, баланс струмів порушується. ОП генерують сигнали, що відкривають відповідні транзисторні ключі, і двигун переміщує трекер у напрямку максимальної освітленості до відновлення балансу [19]. Дана недорога схема дозволяє отримати приріст генерації від 20 % до 30 % порівняно зі статичними установками. Проте її функціональність різко деградує у хмарну погоду через хаотичне розсіювання світла, а архітектура системи обмежує кінематику лише однією віссю обертання.

Система прямого позиціонування на базі мікроконтролера

Третя концепція керування, запропонована авторами дослідження [20], спирається на використання мікроконтролера сімейства 8051 — Atmel IC AT89C51 (рис. 1.23). Головна інновація цього підходу полягає у відмові від

зовнішніх оптичних датчиків: управління платформою цілком базується на програмному аналізі напруги, що генерується самою сонячною панеллю.

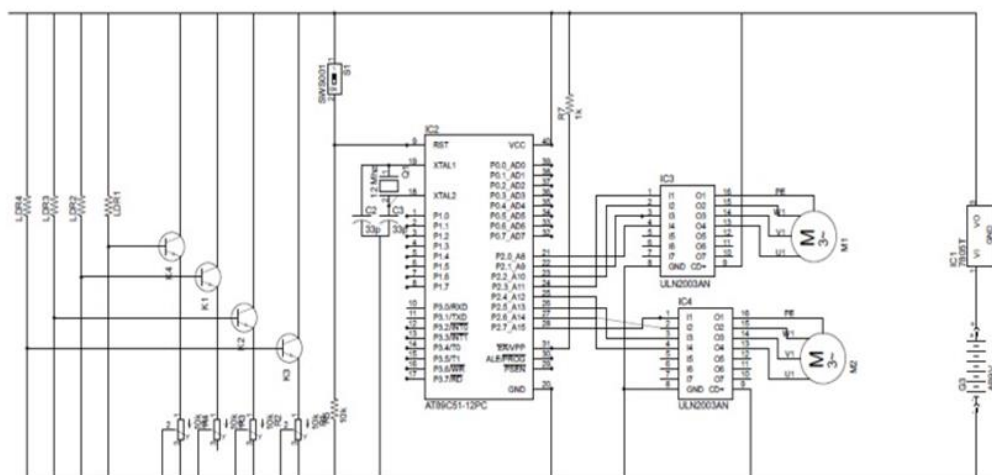


Рисунок 1.23 – Блок-схема алгоритму функціонування системи автоматичного позиціонування

Оптимальне просторове положення визначається точкою, де мікроконтролер фіксує максимальний рівень згенерованої напруги. Для цього сонячна панель (або окремий еталонний міні-модуль) підключається безпосередньо до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) системи керування. Таке інженерне рішення є винятково рентабельним у фінансовому плані та повністю усуває проблему забруднення або зносу зовнішніх фоторезисторів. Проте динамічна точність стеження в такій архітектурі поступається системам на компараторах, оскільки контролер змушений періодично виконувати "сліпе" сканування сектору для пошуку піку напруги. Незважаючи на це, теоретичні розрахунки та польові випробування показують, що мікроконтролерний метод здатний забезпечити розрахунковий річний приріст енергії до 35 % порівняно з нерухомо встановленим модулем [20].

Висновок до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексний аналіз теоретичних засад та існуючих технологічних рішень у галузі сонячної енергетики, що дозволило обґрунтувати високий потенціал та водночас виявити ключові обмеження галузі. Встановлено, що сонячна інсоляція є одним із найбільш перспективних джерел

відновлюваної енергії завдяки своїм колосальним масштабам та високим показникам екологічної безпеки. Проте ефективність сучасних комерційних фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію залишається на відносно низькому рівні — близько 15%, і цей показник критично залежить від зовнішніх чинників та геометричних параметрів падіння світлового потоку.

Дослідження виявило пряму залежність між просторовою орієнтацією модулів та обсягом генерованої потужності. Максимальний коефіцієнт корисної дії фотоелектричної системи досягається лише за умови перпендикулярного (ортогонального) падіння сонячних променів на активну поверхню напівпровідника, коли вектор випромінювання збігається з нормальною віссю елемента. Оскільки видимий шлях Сонця по небосхилу безперервно змінюється протягом доби та впродовж річного циклу, використання жорстко зафіксованих (статичних) конструкцій неминуче призводить до суттєвих втрат енергетичного потенціалу, які в ранкові та вечірні години можуть сягати 75% порівняно з автоматизованими системами.

На основі аналізу експлуатаційних даних доведено, що впровадження систем автоматичного трекінгу є економічно та технічно обґрунтованим кроком, який дозволяє підвищити річний виробіток електроенергії на 30–50%. Порівняльний аналіз для кліматичних умов міста Києва підтвердив, що застосування повноцінного двоосьового трекера забезпечує сумарне збільшення генерації на 36,1% порівняно зі стаціонарною установкою. Це досягається завдяки постійному утриманню оптимального кута падіння променів протягом усього світлового дня.

У розділі було детально класифіковано сучасні механізми сонячного трекінгу, зокрема виокремлено одноосьові (з горизонтальною, вертикальною або похилою віссю) та двоосьові системи. Двоосьові трекери типів TTDAT та AADAT визначено як найбільш технологічно досконалі рішення, оскільки вони мають два ступені свободи, що дозволяє з абсолютною точністю позиціонувати панелі відносно Сонця незалежно від сезону. Також було оцінено методи керування системами: від пасивних термодинамічних до активних оптичних та програмних систем із відкритим контуром.

Встановлено, що найбільш надійним сучасним стандартом є програмні системи керування, робота яких базується на математичному розрахунку астрономічної траєкторії руху Сонця (алгоритм SPA). Такі системи використовують годинники реального часу та географічні координати для прецизійного обчислення азимута й зенітного кута, що забезпечує стабільну роботу незалежно від хмарності чи забруднення датчиків. Таким чином, результати першого розділу підтверджують актуальність розробки інтелектуальної системи автоматичного позиціонування для оптимізації процесів енерговидобутку.

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ КЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

2.1 Проектування керуючої логіки та алгоритмічного забезпечення системи

Основоположним принципом роботи розроблюваного комплексу є безперервний моніторинг інтенсивності світлового потоку за допомогою групи фотоелектричних сенсорів, що інтегровані безпосередньо в конструкцію сонячних модулів. У межах реалізації цього процесу обчислювальне ядро системи одночасно здійснює математичну детермінацію ключових астрономічних параметрів — зенітного кута та азимутального положення світила. Отримані в режимі реального часу метрики візуалізуються на рідкокристалічному (LCD) дисплеї для забезпечення оперативного контролю з боку користувача. Після фіксації поточних значень система переходить до стадії компаративного аналізу, де виміряні дані зіставляються з еталонними величинами, що зберігаються в незалежній пам'яті мікропроцесорного модуля. На основі результатів порівняння генеруються відповідні керуючі імпульси для сервоприводів, які коригують просторову орієнтацію платформи таким чином, щоб забезпечити строго перпендикулярне падіння променів на фотоелектричну поверхню.

Додатково функціонал системи розширено завдяки можливості гнучкого налаштування географічних координат та часових параметрів через універсальний асинхронний інтерфейс USART, що дозволяє адаптувати роботу трекера до конкретних умов експлуатації. Важливою складовою алгоритму є безпека та енергозбереження: передбачено автоматичне повернення конструкції у вихідне (східне) положення після закінчення світлового дня, що готує установку до початку нового циклу генерації. Виходячи з означених вимог, формується детальна послідовність операцій проектованої системи автоматичного позиціонування.

Процес функціонування починається зі стадії ініціалізації апаратних засобів, після чого активується циклічне опитування підключеного сенсорного масиву. Збір інформації реалізується через сканування відповідних портів вводу-виводу

мікроконтролера з подальшим кешуванням показників у внутрішній пам'яті. Після верифікації отриманих даних система переходить до математичної обробки, обчислюючи динамічні координати Сонця відповідно до поточної дати та хронологічних маркерів. У разі виявлення неузгодженості між фактичним та розрахунковим положенням, керуючий блок ініціює роботу виконавчих двигунів. Рух триває до моменту повної синхронізації кутів нахилу трекера з положенням джерела світла. Графічна інтерпретація описаної послідовності операцій представлена у відповідній схемі алгоритму.

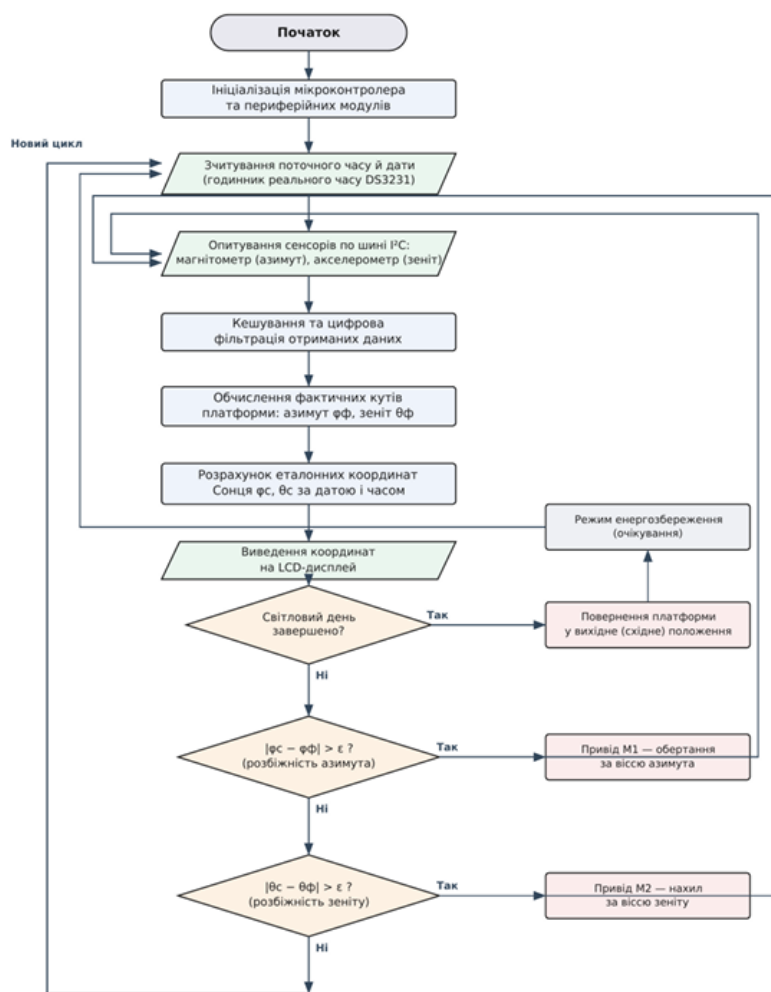


Рисунок 2.1 – Схема алгоритмічної структури функціонування системи просторового орієнтування

2.2 Проектування архітектури та структурної побудови пристрою

Для успішної технічної реалізації розробленого алгоритму функціонування системи необхідне створення чіткої ієрархічної структури, що складається з взаємопов'язаних функціональних вузлів. Архітектуру проектованого комплексу можна концептуально розділити на кілька ключових підсистем: модуль первинного збору телеметричних даних, центральний блок інтелектуальної обробки значень та периферійний пристрій візуалізації інформації. Основою інформаційного забезпечення є мережа датчиків, призначених для безперервного вимірювання фізичних величин, зокрема інтенсивності інсоляції, які підлягають постійному аналізу та динамічному порівнянню з еталонними параметрами.

Важливою складовою апаратної частини є спеціалізована система узгодження, що виконує роль силового драйвера для забезпечення коректного функціонування виконавчих механізмів. Безпосередній механічний розворот платформи, на якій закріплені сонячні фотоелектричні модулі, здійснюється за допомогою двох промислових актуаторів (електромеханічних приводів). Ці виконавчі пристрої відпрацьовують кінематику системи, отримуючи високоточні керуючі сигнали на виконання руху безпосередньо від обчислювального центру.

Центральний пристрій обробки даних, побудований на базі мікроконтролера, виступає головним координаційним вузлом усієї системи. Він бере на себе виконання критичних операцій: ініціює та контролює циклічне опитування сенсорного масиву, здійснює математичну обробку вхідної інформації згідно з заданими алгоритмами, забезпечує трансляцію поточних статусів на пристрій виведення та здійснює безпосереднє управління підключеним силовим навантаженням. Така структурна організація дозволяє забезпечити високу автономність, завадостійкість та точність позиціонування сонячних панелей у режимі реального часу.

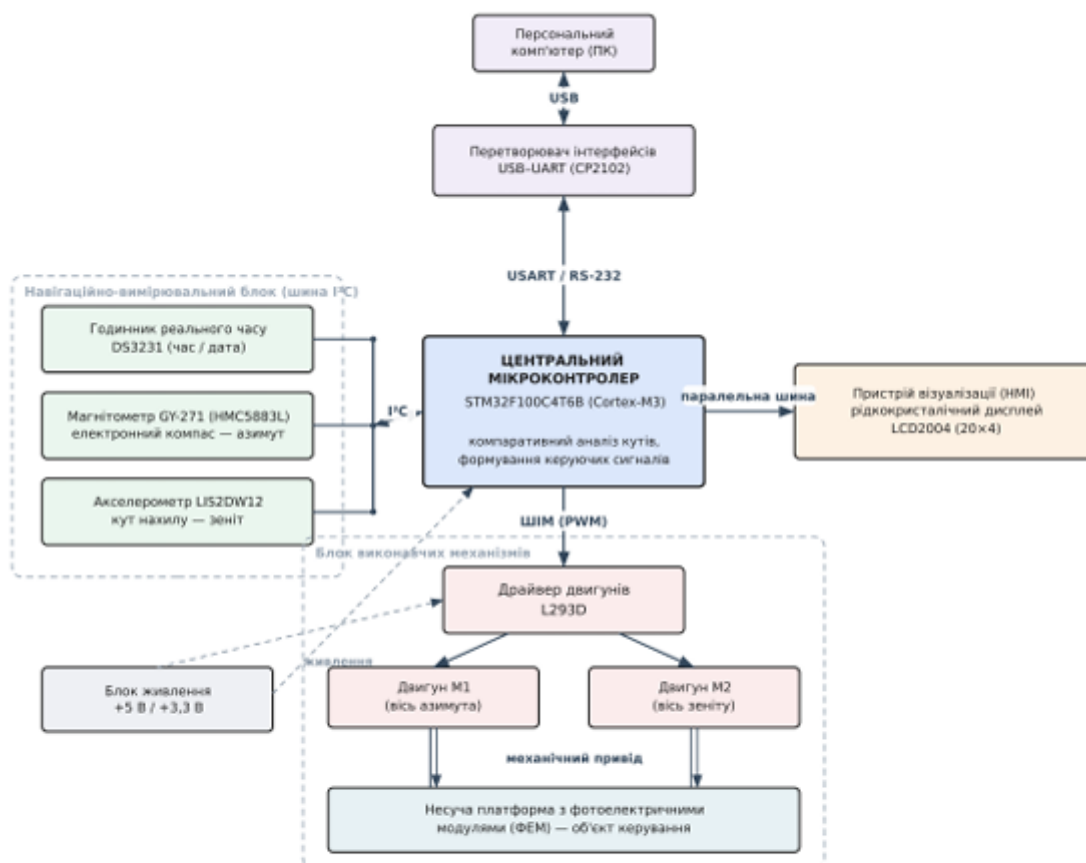


Рисунок 2.2 – Принципова структурна схема взаємодії функціональних блоків системи

2.3 Розробка функціональної архітектури та апаратно-програмних рішень системи

Оскільки розроблювана система автоматичного позиціонування вимагає безперервного циклічного моніторингу масиву датчиків, виконання складних математичних обчислень за відповідними тригонометричними формулами, динамічного відображення розрахованих параметрів на екрані в режимі реального часу, а також високоточного керування виконавчими сервомеханізмами, найбільш раціональним та технічно обґрунтованим рішенням є побудова апаратної частини на базі сучасного мікроконтролера. Для забезпечення глибокого розуміння архітектури та принципів взаємодії компонентів, апаратно-програмний комплекс

доцільно декомпонувати на три основні функціональні сегменти. Першим з них є навігаційно-вимірювальний блок, основним завданням якого є безпомилкове визначення фактичного просторового положення сонячного трекера. Другим, і найголовнішим, виступає центральний мікропроцесорний модуль, який бере на себе функції компаративного аналізу отриманих сенсорних даних із розрахунковими поточними координатами Сонця, генерування відповідних командних імпульсів для серводвигунів задля переорієнтації платформи, а також ретрансляції геометричних координат на пристрій візуалізації. Третім сегментом є підсистема людино-машинного інтерфейсу, що у даній конфігурації реалізована за допомогою символного або графічного рідкокристалічного (LCD) дисплея.

Блок просторової орієнтації формується на основі інтегрованого датчика кута нахилу (акселерометра) спільно з модулем прецизійного електронного компаса. Комплексної інформації від цих двох вимірювальних пристроїв цілком достатньо для отримання достовірних та точних вхідних даних, необхідних для коректного виконання алгоритмів переорієнтації трекера. У розробленій принциповій схемі роль первинних перетворювачів виконують кілька специфічних сенсорів, першим з яких є магнітометр — спеціалізований електронний прилад, функціонал якого полягає у високоточному вимірюванні локальних параметрів магнітного поля [21]. Як відомо з курсу фізики, магнітне поле Землі в будь-якій точці географічного простору характеризується вектором напруженості T . Просторовий напрямок цього вектора можна однозначно детермінувати через три ортогональні складові вздовж осей X , Y та Z у декартовій (прямокутній) системі координат (рис. 2.3). Окрім цього, магнітне поле описується горизонтальною складовою напруженості H , математичний аналіз якої дозволяє системі безпомилково обчислювати поточний азимутальний кут конструкції. Другим ключовим компонентом виступає акселерометр — інерційний прилад, спеціально налаштований на фіксацію різниці між істинним прискоренням рухомого об'єкта та прискоренням вільного падіння (гравітаційним прискоренням). Фактично, цей пристрій визначає інерційну масу, а отримані від нього сирі дані, проходячи через каскад математичних перетворень у мікроконтролері, конвертуються в точні значення зенітного кута нахилу панелей. Третім життєво необхідним елементом

вимірювальної підсистеми є апаратний модуль годинника реального часу (RTC). Його наявність зумовлена тим, що Сонце знаходиться у стані безперервного видимого руху, змінюючи своє просторове положення як впродовж світлового дня, так і залежно від пори року. Для забезпечення автономної роботи в незалежній пам'яті мікропроцесора формується та зберігається спеціальна довідкова таблиця, що містить еталонні масиви значень, які відображають сувору відповідність між ідеальними кутами орієнтації на світило та конкретними хронологічними показниками поточного часу.

Для забезпечення швидкісного та надійного обміну даними між вимірювальними сенсорами та центральним мікроконтролером обрано стандарт комунікації Inter-Integrated Circuit (I2C). Цей спеціалізований протокол розроблявся інженерами саме з метою організації ефективної та компактної взаємодії між різноманітними інтегральними мікросхемами в межах єдиного електронного блоку чи друкованої плати. Базовим концептом цього стандарту є використання двопровідної 8-бітної шини, що виконує роль універсального мосту для циркуляції інформаційних потоків між вузлами керуючої електроніки. Висока ефективність шини досягається завдяки імплементації розумної системи адресації, що відкриває широкі можливості для паралельного спілкування мікропроцесора з цілою низкою периферійних пристроїв, використовуючи при цьому одні й ті самі фізичні провідники. Механізм взаємодії полягає в тому, що корисні дані інкапсулюються в пакети разом із чітким ідентифікатором (адресою) цільового елемента. Найбільш типова та поширена топологія мережі I2C передбачає наявність одного ведучого пристрою (Master), роль якого традиційно бере на себе мікроконтролер, та групи ведених пристроїв (Slave), до яких можуть належати сенсори та символічний LCD-дисплей. Важливою архітектурною вимогою є те, що кожен підключений вузол повинен мати свою унікальну адресу, значення якої лежить у десятковому діапазоні від 7 до 127. Поява двох пристроїв з абсолютно ідентичними адресами в межах однієї схеми є неприпустимою і призведе до апаратного конфлікту на шині [22].

Серед беззаперечних технічних переваг протоколу I2C варто виокремити його здатність підтримувати широкий спектр швидкостей передачі даних, які,

залежно від апаратної версії компонентів, можуть становити 100 Кбіт/с, 400 Кбіт/с, 1 Мбіт/с або навіть сягати 3,4 Мбіт/с у високошвидкісному режимі. Окрім цього, стандарт використовує синхронну комунікацію, що ідеологічно споріднена з шиною SPI, однак, на відміну від неї, потребує наявності лише двох фізичних ліній: лінії послідовних даних SDA (Serial Data) та лінії тактування SCL (Serial Clock). Така оптимізація провідників дозволяє безперешкодно об'єднувати в одному ланцюзі значну кількість пристроїв, що робить систему легкою в масштабуванні, полегшує процеси діагностики виникаючих помилок та їх програмного виправлення, а також дозволяє керувати всією розгалуженою периферією ресурсами лише одного контролера. Крім того, топологія мережі допускає фізичне вилучення окремих пристроїв з апаратного комплексу без будь-якого негативного впливу на функціонування інших схем, підключених до шини. Незважаючи на вагомі переваги, стандарту I2C притаманні й певні технічні недоліки, які необхідно враховувати на етапі проектування. Зокрема, до них належить напівдуплексний режим організації зв'язку, що унеможливорює одночасну передачу та прийом інформації, вимога до дещо складнішої апаратної обв'язки на рівні внутрішньої схемотехніки чипів, а також об'єктивно менша гранична швидкість трансляції даних у порівнянні з повнодуплексним інтерфейсом SPI [23].

Для організації глобального інформаційного каналу та передачі накопичених даних на персональний комп'ютер інтегровано класичний телекомунікаційний інтерфейс RS-232. Застосування цього стандарту є цілком виправданим інженерним кроком, оскільки він відзначається надзвичайною простотою апаратної реалізації, забезпечує цілком достатню та високу швидкість обміну даними, демонструє конкурентоспроможну завадостійкість в умовах індустріальних перешкод та на апаратному рівні підтримується абсолютною більшістю сучасних мікроконтролерів. Архітектура стандарту RS-232-C концептуально призначена для безпосереднього з'єднання лише двох пристроїв за топологією «точка-точка». У такому ланцюзі лінія передачі інформації першого вузла фізично комутується з лінією прийому другого, і навпаки, що дозволяє організувати повноцінний дуплексний канал зв'язку для одночасної двосторонньої

комунікації. З метою оптимізації та керування потоками інформації між з'єднаними модулями найчастіше застосовують метод програмного підтвердження, який полягає у систематичному введенні спеціальних керуючих символів безпосередньо у потік переданих даних. Водночас, стандарт передбачає і можливість організації апаратного контролю потоку шляхом використання додаткових сигнальних ліній RS-232, які беруть на себе функції визначення поточного статусу приймача та управління процесом трансляції [24].

У більш широкому комп'ютерному контексті RS-232C розглядається як базовий послідовний інтерфейс, за допомогою якого електронно-обчислювальна машина здійснює взаємодію та обмін даними з підключеними модемами або іншою специфічною периферією. У структурі класичного персонального комп'ютера або плати керування ці завдання традиційно покладаються на спеціалізований чип універсального асинхронного приймача-передавача, відомий як UART. Оскільки цифрова інформація у внутрішніх ланцюгах комп'ютера чи мікроконтролера транспортується вздовж паралельних шин цілими групами бітів, а зовнішні послідовні пристрої здатні фізично опрацьовувати виключно по одному біту за такт, саме модуль UART бере на себе критично важливу місію динамічного перетворення паралельних масивів інформації у безперервний послідовний бітовий потік, а також виконує зворотну конвертацію під час прийому [25]. Згідно із затвердженими протоколами, дані у стандарті RS-232C передаються в послідовному коді строго побайтно. При цьому кожен інформаційний сегмент інкапсулюється у жорсткі рамки: йому передуює ініціюючий стартовий біт, а завершується пакет стоповим бітом або кількома такими бітами. Детальну структурну організацію та формат трансляції таких інформаційних пакетів наочно проілюстровано на рисунку 2.1 [24].

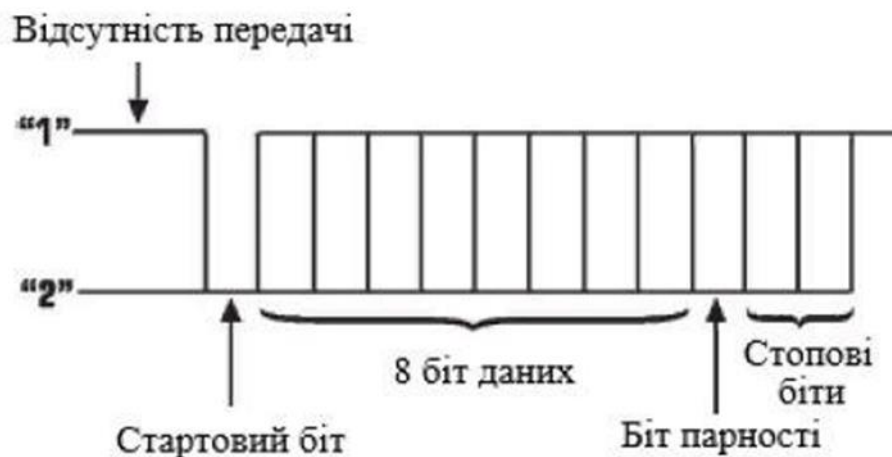


Рисунок 2.1 – Структурна організація та часові параметри кадру даних стандарту RS-232C

Безпосередньо інформаційне ядро пакета, яке може варіюватися і містити 5, 6, 7 або повні 8 біт власне корисних даних, в обов'язковому порядку супроводжується фронтальним стартовим бітом, одним або двома фінальними стоповими бітами, а також опціональним бітом парності для первинного контролю цілісності. Зафіксувавши зміну рівня, що відповідає стартовому імпульсу, приймальний пристрій розпочинає процес дискретизації лінії та вибирає біти даних через строго регламентовані інтервали часу. Для гарантування безпомилкової дешифрації потоку надзвичайно важливо, щоб тактові частоти генераторів передавача і приймача були максимально ідентичними; при цьому нормальна, допустима стандартами розбіжність не повинна перевищувати 10%. Швидкість трансляції для інтерфейсу RS-232C не є довільною, а вибирається з фіксованого стандартизованого ряду, що включає значення: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600 та 115200 біт/с [24]. До ключових переваг цього консервативного, але надійного інтерфейсу традиційно відносять його безпрецедентно високе розповсюдження в індустріальній техніці, виняткову простоту та економічну дешевизну з'єднувальної кабельної інфраструктури, а також повну і повсюдну доступність спеціалізованого програмного забезпечення для налагодження роботи. Разом з тим, інтерфейс має і об'єктивні недоліки, які полягають у тому, що він фізично здатний реалізовувати лише найпростішу топологічну архітектуру зв'язку типу «точка-точка», оперує відносно низькою за мірками сучасних широкосмугових технологій швидкістю (де де-факто

стандартом часто виступає 9600 біт/с), і гарантує стабільну роботу виключно на невеликих кабельних трасах. Для коректного сполучення та перетворення послідовних даних у паралельні та навпаки, всі мікропроцесорні пристрої, які проектуються для роботи з шиною RS-232, вимагають наявності апаратного модуля UART. Оскільки цей модуль зазвичай функціонує з низьковольтними сигналами TTL-рівнів, для електричного узгодження цих внутрішніх сигналів із біполярними рівнями напруги промислового інтерфейсу RS-232 і навпаки, до розробленої принципової схеми в обов'язковому порядку інтегруються додаткові мікросхеми драйверів — приймачів та передавачів лінійних сигналів.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було здійснено комплексне проектування апаратно-алгоритмічної архітектури автоматизованої системи позиціонування сонячних панелей. У ході дослідження розроблено алгоритм функціонування системи, який являє собою чітку логічну послідовність операцій. Цей алгоритм забезпечує безперервне циклічне опитування сенсорної мережі, математичне обчислення зенітного та азимутального кутів, а також компаративний аналіз фактичного просторового положення платформи з еталонними астрономічними координатами Сонця. Додатково в алгоритмі передбачено функції енергозбереження та автоматичного повернення трекера у вихідне (східне) положення після завершення світлового дня.

Важливим етапом роботи стало проектування структурної схеми керуючого пристрою. Архітектуру системи було оптимально декомпозовано на взаємопов'язані функціональні блоки: модуль збору телеметричних показань (масив датчиків), центральний обчислювальний пристрій інтелектуальної обробки даних на базі мікроконтролера, пристрій візуалізації у вигляді LCD-дисплея та систему узгодження з виконавчими механізмами, що включає драйвери та серводвигуни. Такий структурний підхід гарантує високу надійність, гнучкість та експлуатаційну модульність керуючого комплексу.

На основі сформованої структури було обґрунтовано вибір компонентної бази для функціональної схеми. Визначено, що для забезпечення прецизійної

просторової орієнтації трекара цілком достатньо синергетичної взаємодії акселерометра, який відповідає за обчислення зенітного кута, магнітометра (електронного компаса) для точного визначення азимута, а також апаратного годинника реального часу (RTC), що є критично необхідним для синхронізації системи з добовим і сезонним астрономічним рухом світила.

Для забезпечення надійного інформаційного обміну між усіма вузлами було визначено оптимальні комунікаційні інтерфейси. Організацію внутрішньосистемного зв'язку між сенсорами та центральним мікроконтролером реалізовано за допомогою синхронної двопровідної шини I2C. Це рішення дозволило суттєво мінімізувати кількість сигнальних провідників на друкованій платі та забезпечило можливість зручного масштабування сенсорної мережі. Водночас для зовнішньої комунікації та передачі телеметричної інформації на персональний комп'ютер обрано стандарт асинхронної передачі даних RS-232, який відзначається високою завадостійкістю та стабільною роботою в умовах індустріальних перешкод.

Таким чином, розроблена структурно-функціональна база та обґрунтовані схемотехнічні рішення повністю задовольняють поставлені вимоги щодо створення прецизійної, автономної та надійної системи керування сонячним трекаром, здатної ефективно функціонувати в жорсткому режимі реального часу.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

3.1 Мікроконтролер

Сучасний етап розвитку електронної техніки характеризується безперервним та стрімким вдосконаленням технологічних процесів, що призводить до регулярної появи на ринку все більш складних та функціональних обчислювальних пристроїв. Провідні світові виробники напівпровідникової продукції активно підтримують цю тенденцію, систематично оновлюючи свої лінійки мікроконтролерів. При цьому спостерігається позитивна економічна динаміка: значне покращення технічних характеристик та зростання обчислювальних потужностей не супроводжується пропорційним збільшенням вартості кристалів. Останніми роками на світовому ринку вбудованих систем фіксується стійке зростання популярності архітектури ARM. Особливо відчутним цей перелом став із появою бюджетного сегмента мікроконтролерів, побудованих на базі високопродуктивного ядра Cortex-M. Цінова політика щодо цих рішень стала настільки демократичною, що вони успішно конкурують із класичними 8-ми та 16-бітними архітектурами, такими як AVR або PIC. Більше того, у багатьох практичних проектах 32-бітні ARM-контролери виявляються економічно вигіднішими за своїх менш продуктивних восьмибітних аналогів. Важливим фактором, що сприяє їх масовому впровадженню, є наявність широкого спектра доступних інструментів розробки, середовищ програмування та апаратних засобів налагодження, вартість яких є цілком прийнятною як для професійних інженерів, так і для радіоаматорів.

Для обґрунтування вибору оптимальної елементної бази доцільно провести зіставлення ключових параметрів різних мікропроцесорних платформ. Результати цього порівняння переконливо свідчать про те, що навіть базові (молодші) моделі мікроконтролерів сімейства STM32, які базуються на архітектурі ARM, пропонують розробнику значно ширший функціонал та вищі експлуатаційні показники за умови меншої ринкової вартості.

Зокрема, детальний розгляд характеристик мікроконтролера STM32F100C4T6B, зовнішній вигляд якого проілюстровано на рисунку 3.1,

підтверджує його беззаперечну перевагу над 8-бітними конкурентними рішеннями за всіма ключовими критеріями. Враховуючи його високу обчислювальну здатність у поєднанні з надзвичайно доступною ціною, використання саме цього чипу є найбільш раціональним вибором серед доступних на ринку пропозицій. Фундаментальною технологічною перевагою ARM-контролерів є їхня 32-розрядна архітектура. Це означає, що процесорне ядро здатне опрацьовувати повноцінні 32-бітні масиви інформації всього за один машинний такт. Для порівняння, класичним 8-бітним процесорам для виконання аналогічного обсягу математичних чи логічних обчислень потрібна значно більша кількість тактів, що суттєво знижує їхню загальну швидкодію.

Ще однією вагомою інженерною перевагою використання компонентів лінійки STM32 є їхня висока апаратна гнучкість, яка проявляється у суворій сумісності виводів (pin-to-pin) для мікросхем у межах однакового типу корпусу. На практиці це означає, що у разі виникнення необхідності розширення функціоналу пристрою або нестачі апаратних ресурсів (наприклад, флеш-пам'яті) закладеного в початкову схему мікроконтролера, розробник має можливість просто замінити його на більш потужну модель шляхом перепаявання, не змінюючи при цьому топологію друкованої плати. Більше того, процес програмної міграції між спорідненими кристалами вимагає мінімальних зусиль, оскільки зміни коду на рівні низькорівневих драйверів та налаштувань периферії будуть абсолютно незначними.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд та форм-фактор мікроконтролера STM32F100C4T6B

З метою мінімізації часу на макетування електричної схеми та спрощення етапів написання і тестування програмного коду, як базову апаратну платформу було обрано популярну налагоджувальну плату STM32VLDISCOVERY. Візуальне представлення цього інструментального модуля наведено на рисунку 3.2.

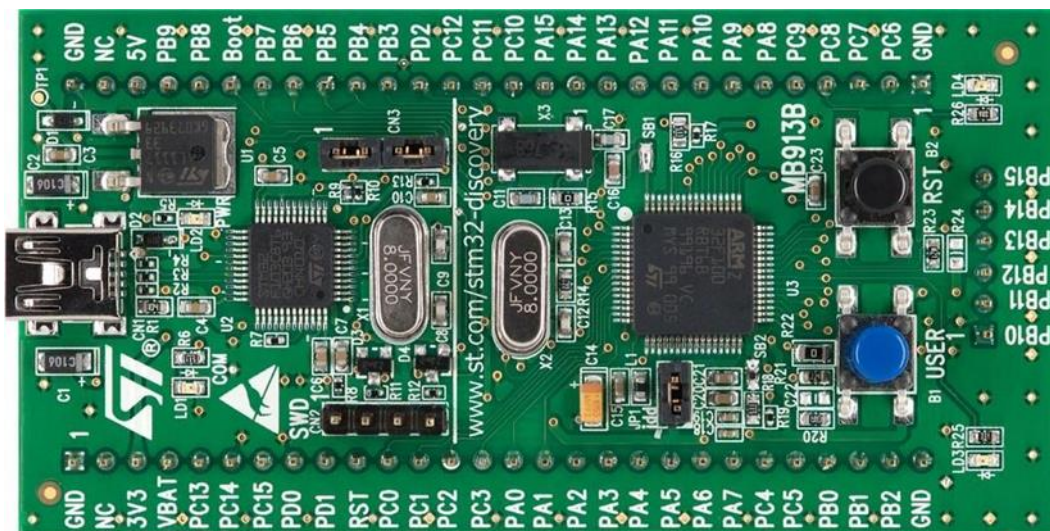


Рисунок 3.2 – Організація налагоджувального модуля STM32VLDISCOVERY

Обрана інструментальна плата STM32VLDISCOVERY має повну апаратну підтримку послідовної шини передачі даних I2C. Реалізація цього протоколу на фізичному рівні дозволяє ефективно використовувати стандартні порти вводу-виводу PB6 та PB7 для надійного підключення різноманітних зовнішніх периферійних пристроїв та сенсорів. Аналізуючи технічний потенціал плати STM32VLDISCOVERY, варто детальніше зупинитися на її багатому функціоналі. Насамперед, плата оснащена вбудованим програматором-відлагоджувачем ST-Link, який завдяки спеціальному апаратному перемикачу режимів можна використовувати як цілком автономний інструмент (з виведеним роз'ємом SWD) для програмування та налагодження зовнішніх цільових плат. Обчислювальним серцем модуля виступає інтегрований 32-розрядний мікроконтролер STM32F100C4T6B, побудований на енергоефективному ядрі Cortex-M3, що здатне функціонувати на тактовій частоті до 24 МГц. Кристал має на борту 8 кілобайт оперативної пам'яті (SRAM). Контролер забезпечує розробника надзвичайно широким набором цифрових комунікаційних інтерфейсів, серед яких апаратні шини I²C, інфрачервоний порт IrDA, локальна мережа LIN,

високошвидкісний SPI та універсальні асинхронні трансивери UART/USART. Для керування виконавчими механізмами доступний 51 вивід загального призначення. Потужна внутрішня периферія мікроконтролера включає контролер прямого доступу до пам'яті (DMA), багаторівневу систему моніторингу живлення (PDR, POR, PVD), генератори широтно-імпульсної модуляції (PWM), вбудований температурний сенсор (Temp Sensor) та апаратний сторожовий таймер (WDT) для захисту від програмних збоїв. Живлення плати може здійснюватися максимально зручним способом — безпосередньо від порту USB, або ж через підключення зовнішнього стабілізованого джерела з напругою 5 В чи 3,3 В. Якісна елементна база гарантує стабільну роботу пристрою в жорсткому індустріальному діапазоні температур від мінус 40 до плюс 85 °С. Для розв'язання задач генерації сигналів та відліку часових інтервалів передбачено один таймер із розширеним функціоналом та шість таймерів загального призначення. Окрім цього, обробка аналогових сигналів із датчиків реалізується за допомогою точного 16-канального 12-бітного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а зворотнє формування аналогових напруг забезпечує двоканальний 12-розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) [26].

3.2 Дисплей LCD

Для забезпечення зручного та інформативного людино-машинного інтерфейсу, а також оперативного виведення різноманітної текстової та цифрової інформації в розроблюваній системі, найбільш доцільним і технічно виправданим є використання класичних символьних рідкокристалічних індикаторів. Вибір на користь таких пристроїв безпосередньо обґрунтовується їхньою винятковою надійністю, глобальною поширеністю на ринку електронних компонентів та максимальною простотою програмно-апаратної інтеграції в мікропроцесорні системи. Абсолютна більшість сучасних символьних екранів цього класу будується на базі промислового стандарту — спеціалізованого контролера керування матрицею типу HD44780 (або його численних апаратних аналогів). Цей інтегральний чип бере на себе всі рутинні низькорівневі завдання з формування пікселів і дозволяє здійснювати швидкий обмін даними з головним

мікроконтролером за допомогою гнучкої паралельної шини. Апаратна конфігурація дозволяє налаштовувати шину як на повноцінний 8-бітний, так і на компактний 4-бітний режим передачі даних (що економить виводи мікропроцесора), робота яких супроводжується трьома додатковими сигнальними лініями для синхронізації та управління. Загальна логіка роботи контролера HD44780 зводиться до прийому стандартизованих команд та кодів із подальшим їх автоматичним перетворенням у відповідні візуальні літери чи цифри на рідкокристалічній площині.

Після проведення детального аналізу доступних на сучасному ринку компонентів, для реалізації інформаційної панелі трекера було обрано перевірений часом модуль LCD2004, виготовлений компанією Winstar. Цей символьний дисплей відрізняється підвищеною інформативністю, оскільки здатен одночасно відображати 80 символів стандарту ASCII, які структурно розбиті на чотири робочі рядки по двадцять знакомісць у кожному. Зовнішній вигляд обраного модуля візуалізовано на відповідному рисунку нижче.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд символьного рідкокристалічного індикатора формату 20x4

Розглянутий модуль характеризується збалансованими масо-габаритними та експлуатаційними показниками. Згідно з технічною документацією, фізичні розміри друкованої плати екрана становлять 98 міліметрів у довжину, 60 міліметрів у ширину та 13 міліметрів у товщину, при цьому корисна (видима) область монітора займає 84 на 31 міліметр. Пристрій гарантує стабільну роботу в досить широкому температурному діапазоні від мінус 10 до плюс 50 градусів за Цельсієм, що цілком задовольняє вимоги експлуатації керуючої електроніки. Візуалізація даних відбувається за допомогою чітких жовтих символів на

зеленому тлі, що забезпечується яскравим світлодіодним підсвічуванням матриці. Розмір однієї елементарної точки (пікселя), з яких формується символ, становить 0,54 на 0,54 міліметра. Інформаційний обмін повністю сумісний із протоколом HD44780, а для повноцінного функціонування логіки та підсвічування пристрою необхідна стабілізована напруга живлення номіналом 5 вольт.

Для електричної інтеграції дисплея в загальну схему використовується стандартизована контактна гребінка [27]. Якщо розташувати модуль фронтальною частиною до спостерігача, контактні площинки будуть розміщені зліва направо у порядку зростання їхніх номерів. Графічна ілюстрація послідовності розташування всіх необхідних виводів та їх коротке маркування наведено на рисунку 3.4.

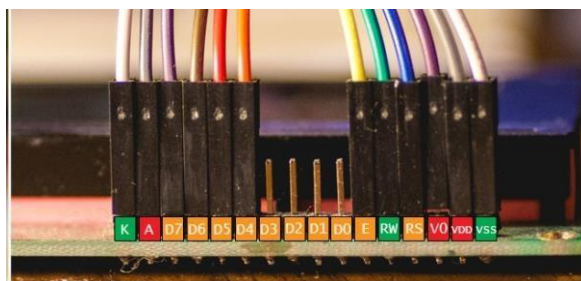


Рисунок 3.3 – Топологія розташування виводів підключення на друкованій платі дисплея

Детальна специфікація кожного контакту, його офіційне позначення згідно з технічним паспортом (у дужках) та розгорнутий опис функціонального призначення в системі систематизовані та наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Специфікація та функціональне призначення контактних виводів інтерфейсу екрану

№	Контакти	Опис використання	Замітки
1	VSS (VSS)	GND. Земля. Живлення мікроконтролером дисплею	0V
2	VDD (VCC)	Напруга живлення дисплею для мікроконтролера	+5V
3	V0 (VEE)	Контраст символів на дисплеї. Підключати краще через потенціометр	від 0v до +5V
4	RS (RS)	Вибір регістру.	

5	RW (R/W)	Перемикання читання/запису режимів	0-читання +5V-запис
6	E	Тактування	
7	D0 (DB0)	Передача даних	Дані
8	D1 (DB1)	Передача даних	Дані
9	D2 (DB2)	Передача даних	Дані
10	D3 (DB3)	Передача даних	Дані
11	D4 (DB4)	Передача даних	Дані
12	D5 (DB5)	Передача даних	Дані
13	D6 (DB6)	Передача даних	Дані
14	D7 (DB7)	Передача даних	Дані
15	A (LED+)	Напруга +5V, підсвітка через потенціометр можна регулювати яскравість дисплею.	+5V
16	K (LED-)	Земля, підсвітка дисплею GND	0V

3.3 Схема перетворювача інтерфейсу

Для забезпечення можливості оперативного керування системою, а також для завантаження початкових конфігураційних параметрів безпосередньо в енергонезалежну пам'ять мікроконтролера, у проекті передбачено використання спеціалізованого апаратного перетворювача інтерфейсів USB to UART. В якості базового компонента для цього модуля було обрано популярну та надійну інтегральну мікросхему CP2102 (зовнішній вигляд пристрою наведено на рисунку 3.4). Актуальність застосування такого адаптера зумовлена тим фактом, що абсолютна більшість сучасних персональних комп'ютерів та ноутбуків технологічно позбавлена класичних апаратних послідовних портів стандарту RS-232 (COM-портів). Відповідно, даний модуль виконує функцію інтелектуального комунікаційного моста, який дозволяє легко та швидко підключати мікропроцесорні плати та інші периферійні пристрої до стандартної універсальної послідовної шини USB.

Принцип роботи цього конвертера базується на високоточній програмно-апаратній емуляції. Після фізичного підключення до персонального комп'ютера та ініціалізації відповідних драйверів, операційна система розпізнає пристрій і створює так званий віртуальний COM-порт. З точки зору прикладного

програмного забезпечення та користувача, робота з цим віртуальним інтерфейсом абсолютно нічим не відрізняється від взаємодії з реальним фізичним портом материнської плати, що забезпечує стовідсоткову сумісність із існуючими термінальними програмами. Крім того, вибір саме мікросхеми CP2102 обґрунтований її високою стабільністю роботи, мінімальною кількістю необхідних зовнішніх електронних компонентів для схемотехнічної обв'язки, надзвичайно низькою ринковою вартістю та глобальним розповсюдженням серед розробників вбудованих систем.



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд модуля апаратного конвертера USB-UART на базі мікросхеми CP2102

Аналізуючи технічні та експлуатаційні характеристики обраного перетворювача, варто відзначити його високу продуктивність при мініатюрних габаритах. Модуль розрахований на номінальну робочу напругу в діапазоні від 4 В до 5,25 В, отримуючи стабільне живлення безпосередньо від USB-шини комп'ютера без потреби у зовнішніх джерелах. Апаратна частина, побудована навколо чипа CP2102, гарантує повну кросплатформену сумісність із більшістю сучасних операційних систем. Згідно з документацією, забезпечується безперебійна підтримка сімейств Windows (від застарілих XP та Vista до сучасних Windows 7 і новіших версій), Mac OS, а також різноманітних дистрибутивів на базі ядра Linux. Швидкісний потенціал вбудованого трансивера дозволяє здійснювати асинхронну передачу даних у дуже широкому діапазоні швидкостей (Baud rate): від мінімальних 300 біт/с до високошвидкісного режиму 1 Мбіт/с, що

з надлишком покриває потреби завантаження прошивки та моніторингу телеметрії сонячного трекера.

Для зручності візуального контролю за процесом обміну інформацією розробники передбачили на друкованій платі модуля три світлодіодні індикатори стану. Вони дозволяють оператору в режимі реального часу відстежувати наявність живлення та активність транзакцій на лініях прийому (RX) і передачі (TX). Важливою інженерною перевагою даного перетворювача є наявність на його вивідній колодці двох рівнів вихідної напруги — 3,3 В та 5 В. Це дозволяє використовувати модуль як джерело живлення для зовнішньої слабкострумової логіки без необхідності інтеграції додаткових стабілізаторів напруги в цільову схему. При всьому цьому багатстві функцій, пристрій відрізняється надзвичайною компактністю: його геометричні розміри становлять лише 20x3x15 міліметрів, а загальна маса не перевищує 2 грамів. Такі масо-габаритні показники роблять його ідеальним інструментом як для стаціонарного використання на етапі розробки, так і для інтеграції в портативні сервісні діагностичні комплекси.

3.4 Датчик прискорення і нахилу

Для забезпечення прецизійного просторового орієнтування несучої конструкції сонячного трекера відносно горизонтальної площини виникає критична необхідність у постійному та точному визначенні поточних кутів його нахилу. Найбільш ефективним інструментом для вирішення цього інженерного завдання є акселерометр — спеціалізований інерційний датчик, здатний з високою достовірністю фіксувати просторове положення об'єкта. З фізичної точки зору, базовий принцип роботи акселерометра зводиться до безперервного вимірювання проекцій вектора повного прискорення тіла, що рухається або перебуває у стані спокою. Для формування повної картини просторової орієнтації сучасні вимірювальні модулі використовують три ортогональні чутливі осі: X, Y та Z [30].

На етапі проектування апаратної частини та вибору конкретної моделі датчика прискорення і нахилу ключовим критерієм виступала необхідна смуга пропускання, що відповідає динаміці майбутньої системи позиціонування. Хоча

класичні аналогові перетворювачі традиційно відрізняються дещо вищою чутливістю, їх інтеграція вимагає наявності прецизійного зовнішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та написання складніших алгоритмів для подальшої математичної обробки сирих даних. Натомість сучасні цифрові мікроелектромеханічні системи (MEMS) демонструють цілком достатній для цілей сонячного трекінгу рівень чутливості, виділяються демократичною вартістю та максимально спрощують процес апаратного підключення до мікроконтролера. Беручи до уваги ці фактори, для розроблюваної системи було обрано інноваційний цифровий акселерометр LIS2DW12 виробництва провідної компанії STMicroelectronics, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд мікроелектромеханічного модуля лінійного акселерометра LIS2DW12

Цей чип є яскравим представником нового покоління мініатюрних та надзвичайно енергоефективних мікросхем. Модель LIS2DW12 — це високотехнологічний трьохосьовий лінійний акселерометр, що забезпечує високу роздільну здатність вимірювань на рівні 14 біт. Пристрій підтримує гнучке програмне налаштування робочих діапазонів шкали прискорення, дозволяючи розробнику обирати між граничними значеннями $\pm 2\text{ g}$, $\pm 4\text{ g}$, $\pm 8\text{ g}$ та $\pm 16\text{ g}$ залежно від специфіки завдання. Для комунікації з головним керуючим процесором передбачена підтримка популярних цифрових інтерфейсів SPI та I2C, через які виміряні дані передаються у зручному 16-бітному форматі.

В основі функціонування даного акселерометра лежить принцип вимірювання статичного прискорення вільного падіння (гравітаційної постійної g). Шляхом постійного математичного аналізу значень гравітаційних проекцій,

що фіксуються по трьох просторових осях, обчислювальне ядро системи здатне абсолютно точно вирахувати поточний кут відхилення (орієнтацію) чипа, а отже, і всієї конструкції трекера у тривимірному просторі. Технологічно мікросхема LIS2DW12 належить до класу ємнісних акселерометрів і характеризується специфічною наднизькою смугою пропускання, що лежить у межах від 0,016 до 1,6 кГц. Такі параметри роблять цей датчик ідеальним та безальтернативним рішенням для точного вимірювання повільних кутових відхилень нахилу платформи та ефективної фільтрації низькочастотних вібраційних завад від роботи механічних приводів чи поривів вітру [28].

Аналізуючи технічну специфікацію модуля LIS2DW12, варто виокремити низку його видатних експлуатаційних особливостей. Пристрій адаптований для роботи з низьковольтною логікою, маючи широкий діапазон напруги живлення від 1,62 до 3,6 В. Чип демонструє безпрецедентно низькі показники енергоспоживання: всього 0,05 мкА у глибокому режимі очікування, близько 0,38 мкА в економічному режимі зниженого споживання та не більше 120 мкА при пікових навантаженнях у режимі максимальної продуктивності. Комунікаційний вузол стабільно підтримує роботу з послідовними шинами SPI та I2C. Крім базових вимірювань, акселерометр оснащений вбудованим апаратним алгоритмом детекції вільного падіння. Розробнику надається можливість динамічного вибору не лише вимірювального діапазону та смуги пропускання, але й роздільної здатності шляхом відправки відповідних керуючих команд по цифровій шині. Серед вагомих метрологічних переваг слід відзначити рекордно низький рівень власних шумів, що становить 90 мкг/Гц, а також мінімальну залежність зміщення нуля від температурних коливань, яка тримається на рівні 0,2 mg/°C.

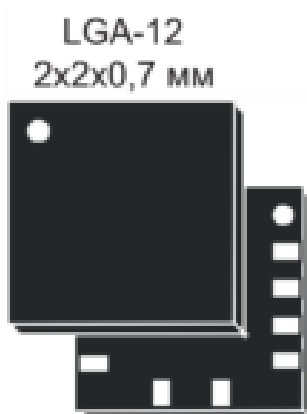


Рисунок 3.6 – Геометричні розміри та просторове компонування мініатюрного корпусу LGA-12

Датчик розрахований на стабільну та довговічну роботу в суворих кліматичних та індустріальних умовах, підтримуючи надзвичайно широкий робочий температурний діапазон від мінус 40 °С до плюс 80 °С. Окрім цього, мікросхема володіє колосальною механічною надійністю та ударостійкістю, витримуючи пікові кінетичні перевантаження до 10000 g. Усі ці потужні характеристики інженерам компанії-виробника вдалося інтегрувати у надзвичайно компактному та зручному для автоматизованого поверхневого монтажу (SMD) корпусі типу LGA-12. Детальне креслення цього корпусу з вказівкою його фізичних габаритів та розмірів контактних майданчиків детально представлено на рисунку 3.6.

3.5 Модуль годинника реального часу

Оскільки розроблена система автоматичного позиціонування (сонячний трекер) призначена для експлуатації у відкритому середовищі зі значними добовими та сезонними коливаннями температур, до апаратного забезпечення висуваються жорсткі вимоги щодо термостабільності. З метою точного відліку часу, який є критично важливим параметром для математичного розрахунку астрономічної траєкторії Сонця, було обрано інтегральний модуль DS3231. Головною технічною перевагою цієї мікросхеми є наявність вбудованого термокомпенсованого кварцового резонатора (ТСХО). Завдяки цій технології пристрій автоматично коригує власну частоту залежно від температури навколишнього середовища, що гарантує високу стабільність ходу годинника навіть за умов екстремальної спеки чи сильних морозів.

Модуль DS3231 являє собою високопрецизійний годинник реального часу (RTC), який здійснює комунікацію з центральним мікроконтролером через апаратну цифрову шину I2C. Важливою архітектурною особливістю плати є наявність незалежного входу для підключення резервного джерела живлення (мініатюрної дискової батареї). Ця функція дозволяє мікросхемі безперервно

підтримувати точний хронометраж та здійснювати моніторинг температури навіть у моменти повного знеструмлення основної керуючої електроніки станції. Зовнішнє виконання та компонування цього електронного вузла наочно продемонстровано на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Апаратний модуль прецизійного годинника реального часу на базі інтегральної мікросхеми DS3231

Глибока інтеграція кварцового кристала безпосередньо в корпус мікросхеми не лише суттєво підвищує довгострокову точність відліку, але й мінімізує кількість необхідних зовнішніх радіодеталей, що позитивно впливає на загальну надійність системи. Апаратна логіка DS3231 забезпечує повноцінне ведення календаря: пристрій самостійно оперує даними про поточні секунди, хвилини, години, дні тижня, дати, місяці та роки. Внутрішній алгоритм автоматично коригує дати для місяців, що мають менше ніж 31 день, а також безпомилково враховує настання високосних років. Передача адресних команд та масивів даних здійснюється у послідовному форматі по двонаправленій шині I2C, яка підтримує швидкісний режим передачі до 400 кГц. Вбудований прецизійний компаратор напруги безперервно відстежує рівень основного живлення (VCC); у разі фіксації критичного падіння напруги, система автоматично генерує сигнал скидання та миттєво перемикається на споживання енергії від резервної батареї.

Аналізуючи експлуатаційні характеристики модуля DS3231, варто виокремити його безпрецедентну точність ходу, яка становить ± 2 ppm у

широкому індустріальному діапазоні температур від мінус 40 °C до плюс 85 °C (також існує комерційна версія для діапазону від 0 °C до +70 °C). Вбудований цифровий датчик температури, необхідний для роботи термокомпенсатора, забезпечує точність вимірювань у межах ± 3 °C і може бути програмно опитаний мікроконтролером. Модуль живиться від джерела постійного струму в діапазоні від 2,3 В до 5,5 В. Пристрій має вбудовану пам'ять для налаштування двох незалежних будильників та підтримує функцію примусової програмної корекції точності ходу. Фізичні габарити друкованої плати модуля є надзвичайно компактними і становлять 38x22x14 міліметрів при загальній масі пристрою лише 8 грамів.

3.6 Магнітний компас

Для коректного просторового орієнтування рухомої платформи трекера відносно вертикальної осі (визначення азимутального кута) у системі задіяно модуль високочутливого трьохосьового магнітометра GY-271. Електронним серцем цього сенсора є спеціалізована інтегральна мікросхема HMC5883L. Цей датчик набув широкого поширення в інженерній практиці завдяки оптимальному співвідношенню високої точності вимірювань, доступності та простоті інтеграції через стандартний цифровий інтерфейс I2C. Для забезпечення стабільної роботи чутливого елемента незалежно від коливань вхідної напруги, на платі модуля розпаяно параметричний стабілізатор, який формує ідеальну робочу напругу номіналом 3,3 В. Зовнішній вигляд сенсорної плати наведено на рисунку 3.8.

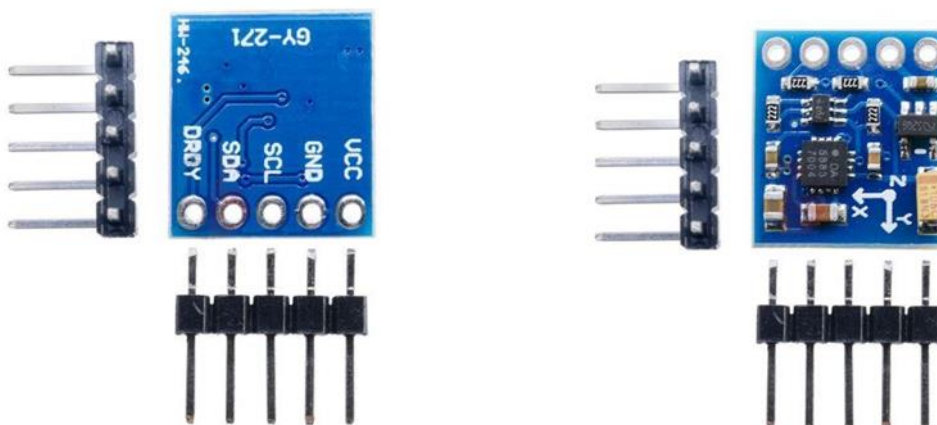


Рисунок 3.8 – Конструктивне виконання модуля цифрового трьохосьового магнітометра GY-271

Принцип роботи цього навігаційного пристрою полягає у фіксації параметрів локального магнітного поля Землі. Під час фізичного повороту модуля у просторі, аналогові значення напруженості магнітного поля, що впливають на три ортогональні осі чутливого елемента, пропорційно змінюються. Отримавши ці сирі дані, обчислювальне ядро мікроконтролера за допомогою тригонометричних функцій (зокрема, використовуючи вектори X та Y) вираховує точний кут відхилення платформи від напрямку на географічну північ. Завдяки цьому алгоритму модуль GY-271 виконує роль повноцінного електронного компаса. Варто зазначити, що для подібних завдань іноді розглядають використання гіроскопічних датчиків, проте гіроскопам притаманний так званий «дрейф нуля» — поступове накопичення кутової похибки з плином часу. Магнітометр позбавлений цього недоліку, оскільки він завжди орієнтується на абсолютну константу — магнітні полюси планети.

Технічні параметри модуля GY-271 повністю задовольняють вимоги проектованої системи. Сенсор підтримує роботу з широким діапазоном входних напруг від 3,3 В до 5 В. Внутрішній аналого-цифровий перетворювач має 12-бітну розрядність, що забезпечує високу дискретність вимірювань магнітного поля в діапазоні до ± 8 Гаусс із феноменальною точністю до ± 2 мГаусс. Важливою програмною опцією є наявність алгоритмів автоматичного внутрішнього калібрування чипа. Пристрій відзначається високою енергоефективністю: у режимі активного сканування магнітного поля струм споживання не перевищує 2,5 мА, а при переході у режим сну цей показник падає до 0,1 мА. Геометричні розміри друкованої плати є мініатюрними і становлять лише 14x13 міліметрів.

3.7 Виконавчий механізм повороту панелей

Для фізичної реалізації розрахованих мікроконтролером просторових координат необхідно застосувати електромеханічні пристрої, здатні конвертувати слабкоструміві електричні імпульси у потужний лінійний або обертальний механічний рух. Найбільш адаптованими для завдань сонячного трекінгу є лінійні

актуатори, побудовані на базі класичних двигунів постійного струму, поєднаних із понижуючими редукторами. В інженерній практиці виконавчі механізми класифікуються за типом енергоносія на гідравлічні, пневматичні та електричні [30]. Враховуючи специфіку автономної роботи фотоелектричної станції, саме електричні приводи є безальтернативним варіантом.

Головною перевагою лінійних актуаторів гвинтового типу є їхня колосальна тягова здатність та ефект самогальмування (самоблокування) штока. Остання властивість є критично важливою: при відключенні живлення двигуна гвинтова передача механічно блокується, що надійно фіксує багатотонну площину сонячних панелей та не дозволяє їй самовільно складатися під впливом сильних вітрових чи снігових навантажень. Сучасні моделі таких приводів оснащуються модернізованими редукторами зі збільшеною площею контакту зубчастих коліс, що радикально підвищує їхню експлуатаційну міцність, гарантує ювелірну точність просторового позиціонування та абсолютну плавність ходу без ривків. Оскільки проектувана система має двоосьову кінематичну архітектуру, для забезпечення її повноцінної роботи необхідно інтегрувати два ідентичних лінійних приводи. Оптимальним вибором для даного проекту є використання промислової моделі актуатора LAC1500, загальний вигляд якого представлено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Електромеханічний лінійний актуатор серії LAC1500 для систем позиціонування

Вибраний актуатор LAC1500 характеризується видатними тягово-

динамічними властивостями. В основі його конструкції лежить самоблокувальна гвинтова передача (привід Acme), хід якої може гнучко регулюватися за допомогою вбудованих кінцевих вимикачів. Корпус пристрою має високий ступінь захисту від проникнення атмосферної вологи та абразивного пилю, а його елементи покриті спеціальними антикорозійними складами, що гарантує тривалу роботу просто неба при температурах від мінус 15 °С до плюс 40 °С. Електричні параметри двигуна є досить ощадливими: струм холостого ходу (без навантаження) не перевищує 1 А, а під номінальним навантаженням зростає максимум до 2 А. При цьому механізм здатен генерувати тягове зусилля (вантажопідйомність) до 2500 Н, витримувати динамічні удари силою 3500 Н та статичні навантаження до 5500 Н. Швидкість

висунення штока під робочим навантаженням становить стабільні 5 мм/с.

Після механічної інсталяції актуаторів постає завдання їх електричної інтеграції з керуючою електронікою. Проблема полягає в тому, що слабкоструміві цифрові виходи мікроконтролера фізично не здатні комутувати струми силою у кілька ампер, необхідні для роботи двигунів. Для узгодження цих ланцюгів інженери розглядають кілька схемотехнічних рішень. Перший варіант передбачає використання потужних польових або біполярних транзисторів, однак такий підхід дозволяє лише вмикати двигун або керувати його швидкістю за допомогою ШІМ, унеможливаючи реверсування (зміну напрямку руху). Другий метод базується на використанні електромеханічних реле, що вирішує проблему реверсу, але унеможливорює плавне регулювання швидкості штока і має низький ресурс через механічний знос контактів.

Третім, найбільш технологічно досконалим рішенням, є застосування спеціалізованих напівпровідникових драйверів (Motor Shield), побудованих за топологією Н-моста. Саме цей варіант було інтегровано в проект. Як силовий вузол було обрано поширений та надійний модуль RKP-01A, базовим елементом якого є мікросхема драйвера L298N (рис. 3.10). Завдяки наявності двох незалежних мостових каскадів, ця плата здатна одночасно керувати зміною напрямку та швидкістю обертання одразу двох двигунів постійного струму [31]. Наявність масивного алюмінієвого радіатора охолодження дозволяє мікросхемі

стабільно витримувати тривалі струмові навантаження до 2 А на кожен канал без ризику теплового пробою.



Рисунок 3.10 – Силовий модуль драйвера електродвигунів RKP-01A на базі чипа L298N

Схемотехнічні характеристики драйвера RKP-01A роблять його ідеальним комутатором між низьковольтною логікою та силовими колами. Модуль працює з логічними сигналами амплітудою від 2,3 В до напруги живлення логіки (V_{ss}), що повністю сумісно з виходами мікроконтролера. Пристрій передбачає роздільне живлення: напруга для функціонування внутрішньої логіки (V_{ss}) може становити від +5 В до +7 В (струм споживання 0...36 мА), тоді як силове живлення для двигунів (V_d) подається в діапазоні від 6 В до 12 В (допускається і вище, до 35 В, залежно від модифікації). Кожен керований канал здатен комутувати номінальний струм 2 А, при цьому витримуючи короткочасні пускові піки до 3 А. Максимальна сумарна потужність розсіювання модуля обмежена 20 Вт. Фізичні розміри плати разом із радіатором становлять 53x47x27 міліметрів, маса — 35 грамів, а допустимий діапазон робочих температур кристала коливається від мінус 25 °С до плюс 130 °С.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було здійснено комплексне проектування та розробку програмного забезпечення для мікроконтролера STM32, який виступає основним обчислювальним ядром автоматизованої системи позиціонування сонячних панелей. У ході роботи було створено гнучку та модульну архітектуру

програмного коду, що дозволяє системі функціонувати в жорсткому режимі реального часу, забезпечуючи безперервний моніторинг та коригування просторового положення фотоелектричних модулів.

Важливим етапом стала програмна реалізація протоколів інформаційного обміну з периферійними пристроями. Було написано та оптимізовано драйвери для взаємодії з сенсорною мережею по цифровій шині I2C. Зокрема, реалізовано алгоритми безпомилкового зчитування хронологічних даних із годинника реального часу DS3231, а також отримання телеметричних показників із цифрового магнітометра GY-271 та акселерометра LIS2DW12. Програмна фільтрація сирих даних із цих сенсорів дозволила досягти високої точності у визначенні фактичного азимута та зенітного кута нахилу несучої конструкції трека.

Ключовим здобутком програмної частини стала імплементація математичного модуля для безперервного розрахунку еталонних астрономічних координат Сонця на основі поточного часу та географічних координат локації. На базі розробленого алгоритму мікроконтролер циклічно виконує компаративний аналіз між розрахунковим (ідеальним) та фактичним положенням панелей. На основі виявленої кутової неузгодженості програма динамічно генерує керуючі сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Сформовані ШІМ-сигнали передаються на драйвер L298N, який безпосередньо керує виконавчими лінійними актуаторами. Програмно реалізовано плавний пуск та гальмування двигунів, що запобігає механічним перевантаженням конструкції. Крім того, для забезпечення ефективної людино-машинної взаємодії написано підпрограму виведення ключових телеметричних параметрів, системного часу та статусів на символний рідкокристалічний дисплей LCD2004.

Таким чином, розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення повністю відповідає поставленим технічним вимогам. Воно гарантує автономну, стабільну та високоточну роботу сонячного трека, нівелюючи вплив погодних умов і забезпечуючи максимальну енергетичну ефективність фотоелектричної станції протягом усього року.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці - система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Науково-технічний прогрес вніс серйозні зміни в умовах виробничої діяльності працівників розумової праці. Їх праця стала більш інтенсивним, напруженим, які вимагають значних витрат розумової, емоційної і фізичної енергії. Це зажадало комплексного рішення проблем ергономіки, гігієни і організації праці, регламентації режимів праці і відпочинку.

Охорона здоров'я трудящих, забезпечення безпеки умов праці, ліквідація професійних захворювань і виробничого травматизму складає одну з головних турбот людського суспільства. Звертається увага на необхідність широкого застосування прогресивних форм наукової організації праці, зведення до мінімуму ручної, малокваліфікованої праці, створення обстановки, що виключає професійні захворювання і виробничий травматизм.

Даний розділ бакалаврської роботи присвячений розгляду наступних питань:

- організація робочого місця програміста;
- визначення оптимальних умов праці програміста.

4.1 Опис робочого місця програміста

Робоче місце - це частина простору, в якому інженер здійснює трудову діяльність, і проводить велику частину робочого часу. Робоче місце, добре пристосоване до трудової діяльності інженера, правильно і доцільно організоване, у відношенні простору, форми, розміру забезпечує йому зручне положення при роботі і високу продуктивність праці при найменшому фізичному і психічному напруженні.

При правильній організації робочого місця продуктивність праці інженера зростає з 8 до 20 відсотків.

Згідно ГОСТ 12.2.032-78 конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця програміста повинні бути дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Головними елементами робочого місця програміста є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи.

Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення програміста. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Моторне поле - простір робочого місця, в якому можуть здійснюватися рухові дії людини.

Максимальна зона досяжності рук - це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх в плечовому суглобі.

Оптимальна зона - частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччями при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При проектуванні письмового столу варто враховувати наступне:

- висота столу повинна бути вибрана з урахуванням можливості сидіти вільно, в зручній позі, при необхідності спираючись на підлокітники;
- нижня частина столу повинна бути сконструйована так, щоб програміст міг

зручно сидіти, ні змушений підбирати ноги;

- поверхня стола повинна мати властивості, що виключають появу відблисків в полі зору програміста;
- конструкція столу повинна передбачати наявність висувних ящиків (не менше 3 для зберігання документації, лістингів, канцелярських приналежностей, особистих речей).

Важливим елементом робочого місця програміста є крісло. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні програміста його поза повинна бути фізіологічно правильно обгрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що впливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидячи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- Допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечувати вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного
- Допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (у межах від 400 до 550 мм)
- Мати злегка увігнуту поверхню
- Мати невеликий нахил назад

Створення сприятливих умов праці і правильне естетичне оформлення робочих місць на виробництві має велике значення як для полегшення праці, так і для підвищення його привабливості, позитивно впливає на продуктивність праці. Забарвлення приміщень і меблів повинна сприяти створенню сприятливих умов для зорового сприйняття, гарного настрою. У службових приміщеннях, в яких виконується одноманітна розумова робота, що потребує значної нервової напруги і великого зосередження, фарбування повинна бути спокійних тонів - малонасичені відтінки холодного зеленого або блакитного кольорів.

При розробці оптимальних умов праці програміста необхідно враховувати освітленість, шум і мікроклімат.

4.2 Освітленість робочого столу

Раціональне освітлення робочого місця є одним з найважливіших факторів, що впливають на ефективність трудової діяльності людини, що попереджають травматизм і професійні захворювання. Правильно організоване освітлення створює сприятливі умови праці, підвищує працездатність і продуктивність праці. Освітлення на робочому місці програміста повинно бути таким, щоб працівник міг без напруги зору виконувати свою роботу. Стомлюваність органів зору залежить від ряду причин:

- недостатність освітленості;
- надмірна освітленість;
- неправильний напрямок світла.

Недостатність освітлення призводить до напруги зору, послаблює увагу, приводить до настання передчасної стомленості. Надмірно яскраве освітлення викликає осліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрямок світла на робочому місці може створювати різкі тіні, відблиски, дезорієнтувати працюючого. Всі ці причини можуть призвести до нещасного випадку або профзахворювань, тому настільки важливий правильний розрахунок освітленості.

Штучне освітлення виконується за допомогою електричних джерел світла двох видів: ламп розжарювання і люмінесцентних ламп. Будемо використовувати люмінесцентні лампи, які в порівнянні з лампами розжарювання мають суттєві переваги:

- по спектральному складу світла вони близькі до денного, природного освітлення;
- володіють більш високим ККД (у 1.5-2 рази вище, ніж ККД ламп розжарювання);
- мають підвищену світловіддачу (в 3-4 рази вище, ніж у ламп розжарювання);
- більш тривалий термін служби.

Розрахунок освітлення проводиться для кімнати площею 15 м², ширина якої 3.5 м, висота - 4 м. Скористаємося методом світлового потоку.

Для визначення кількості світильників визначимо світловий потік, падаючий на поверхню за формулою:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{n}, \text{ де}$$

F - розраховується світловий потік, Лм;

E - нормована мінімальна освітленість, Лк (визначається за таблицею).

Роботу програміста, відповідно до цієї таблиці, можна віднести до розряду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде $E = 300$ Лк при газорозрядних лампах; S - площа освітлюваного приміщення (у нашому випадку $S = 15$ м²); Z - відношення середньої освітленості до мінімальної (зазвичай приймається рівним 1.1-1.2); K - коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників у процесі експлуатації (його значення визначається за таблицею коефіцієнтів запасу для різних приміщень і в нашому випадку $K = 1.5$); n - коефіцієнт використання світлового потоку ($\eta = 1,1 \dots 1.2$).

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Небезпека – це явища, процеси, об’єкти, інформація і самі люди, які можуть викликати небажані наслідки і призводити до погіршення стану здоров’я чи смерті людини, завдавати шкоди навколишньому середовищу й об’єктам господарської діяльності. Життєвий досвід людини показує, що шкоду людині може нанести будь-яка діяльність: робота на виробництві (трудова діяльність), різні види відпочинку, розваги та навіть діяльність, пов’язана з навчанням.

Джерелами небезпек є природні процеси і явища, техногенне середовище і людські дії.

Небезпека об’єктивно існує в просторі і часі та реалізується у вигляді потоків енергії, речовини, інформації.

Здебільшого небезпека має прихований характер і може перетворюватися в реальну небезпеку за наявності таких умов:

- небезпека реально існує;
- людина перебуває в зоні дії небезпеки;
- людина не має ефективних засобів захисту, не використовує їх або ці засоби

неефективні.

Усяка діяльність людини є потенційно небезпечною. Потенційна небезпека – це така небезпека, яка має прихований характер і може перетворитися в реальну небезпеку за наявності трьох умов, зазначених вище. Потенційна небезпека може реалізуватися у формі хвороб або травм. Але наявність потенційної небезпеки не завжди супроводжується її негативним впливом на людину. Для реалізації негативного впливу небезпеки необхідне виконання всіх трьох умов.

Умови, за якими небезпека може реалізуватися в подію, називаються небезпечною ситуацією.

Основними критеріями переходу небезпеки в надзвичайну ситуацію є:

- наявність або загроза загибелі людей чи значне погіршення умов їх життя.
- заподіяння економічних збитків.
- істотне погіршення стану довкілля.

Під час експлуатації ЕОМ, можуть мати місце наступні надзвичайні ситуації: пожежі, аварії теплопроводу, водопроводу, ураження електричним струмом.

Сам ЕОМ може стати причиною таких надзвичайних ситуацій як пожежа та ураження електричним струмом.

При виникненні надзвичайної ситуації користувачу необхідно негайно припинити роботу, вимкнути ЕОМ, інше електрообладнання і доповісти керівнику, якщо:

- помічено механічні пошкодження та інші дефекти електрообладнання і електропроводки;
- помітно підвищений рівень шумів при роботі на обладнанні;
- помітно підвищене тепловиділення від обладнання;
- постійно блимає екран монітора;
- стрибає текст на екрані монітора;
- відчувається запах горілого та диму;
- припинилася подача електроенергії.

Не приступати до роботи до повного усунення несправностей.

У випадку загорання або пожежі співробітники повинні негайно припинити

роботу, відімкнути електроприлади, викликати пожежну команду, повідомити керівника робіт і приступити до ліквідації місця загорання, наявними засобами пожежогасіння.

При аварії водопроводу або тепломережі необхідно негайно визвати слюсаря-сантехніка, прибрати речовини та реактиви, які бурхливо реагують із водою, щоб на них не попала вода. Берегти від псування водою обладнання та прилади. Якщо усунути аварію неможливо, визвати міську аварійну службу.

При травмі у першу чергу звільнити постраждалого від травмую чого фактора, повідомити керівника робіт, викликати медичну допомогу, надати першу долікарняну допомогу постраждалому і, по можливості, зберегти незмінною ситуацію до початку розслідування причин нещасного випадку.

Висновки до розділу

У даному розділі бакалаврської роботи були викладені вимоги до робочого місця програміста. Створені умови повинні забезпечувати комфортну роботу. Дотримання умов, що визначають оптимальну організацію робочого місця програміста, дозволить зберегти гарну працездатність протягом усього робочого дня, підвищить, як у кількісному, так і в якісному відношеннях продуктивність праці програміста.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних станцій. Це реалізовано шляхом проектування та розробки інтелектуальної автоматизованої двоосьової системи позиціонування сонячних панелей (сонячного трекера). За результатами проведених досліджень було доведено економічну та технологічну доцільність автоматизації систем генерації. На основі аналізу кінематики руху Сонця встановлено, що статично закріплені модулі втрачають значну частину потенційної енергії через постійну зміну кута падіння променів. Проведені розрахунки для кліматичних умов міста Києва підтвердили, що впровадження двоосьового трекера збільшує річний виробіток електроенергії станцією номінальною потужністю 10 кВт з 9029 кВт·год до 12290 кВт·год. Отже, система стеження забезпечує приріст генерації на 36,1 % порівняно з жорстко зафіксованою установкою.

Для досягнення таких показників було розроблено оптимальний алгоритм керування просторовим положенням. Обрано метод програмного керування з відкритим контуром, який є найбільш стійким до складних погодних умов, таких як хмарність чи забруднення датчиків. Система циклічно зчитує точний час та просторові координати, що дозволяє обчислювальному ядру безперервно розраховувати ідеальні зенітний та азимутальний кути й синхронізувати з ними фактичне положення платформи. Основою спроектованої структурно-функціональної архітектури став 32-розрядний мікроконтролер архітектури ARM Cortex-M3 (STM32F100C4T6B), що відзначається високою продуктивністю. Для створення високоточної сенсорної мережі використано модулі, які працюють по цифровій шині I2C: годинник реального часу DS3231 з термокомпенсацією, трьохосьовий магнітометр GY-271 у ролі електронного компаса та енергоефективний цифровий акселерометр LIS2DW12 для контролю кута нахилу.

Для виконання механічної роботи з переміщення масиву панелей обґрунтовано використання промислових лінійних актуаторів LAC1500, які мають функцію механічного самоблокування та здатні витримувати значні вітрові

навантаження. Узгодження слабкострумової логіки контролера з потужними двигунами успішно реалізовано за допомогою драйвера Н-моста RKP-01A на базі мікросхеми L298N. Візуалізація телеметричних даних та комунікація з оператором забезпечується за допомогою символьного дисплея LCD2004 і перетворювача інтерфейсів USB-UART на чипі CP2102. Окрім апаратно-програмної частини, у роботі розроблено заходи з охорони праці, де проаналізовано умови роботи інженера-програміста. Зокрема, встановлено антропометричні вимоги до робочого місця та розраховано необхідний рівень штучного освітлення із застосуванням люмінесцентних ламп (не менше 300 Лк), що мінімізує стомлюваність та зберігає здоров'я розробника.

У підсумку, спроектована кіберфізична система автоматичного позиціонування повністю відповідає сучасним інженерним стандартам. Вона є надійною, економічно обґрунтованою та повністю готовою до практичного впровадження у складі реальних фотоелектричних електростанцій для максимізації їхньої прибутковості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Українська сонячна енергетика: як не повторити долю Ікара
[Електронний ресурс] – Доступ:
<https://www.epravda.com.ua/publications/2019/02/15/645301/>
- 2) В. Коваль. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / Р. Івасечко, К. Козак // Енергосбереження. – 2015. – випуск 134.
- 3) H.Mousazadeh. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – pp.1800– 1806.
- 4) S. Mansour. Optimum Design Of On Grid Pv System Using Tracking System / D.W.R.Anis, D.I.M. Hafez // Sci. Technol. Res. – 2015. – №05. – pp. 50–57.
- 5) T. Twisha. Introducing Dual Axis Solar Tracker with Reflector to Increase Optimal Electricity Generation in Bangladesh // Dev. Renew. Energy Technol. – 2014. – № 3. – pp.1–6.
- 6) Cooke D. Single vs. Dual Axis Solar Tracking // Altern. Energy e Magazine – 2011.
- 7) Одноосні трекери [Електронний ресурс]. Доступ:
<http://ussolar.com.ua/ua/news/6-odnoosnye-trekery-povyshayut-effektivnostsolnechnoy-stantsii-na-15-17>
- 8) I.Kamrul. Performance Comparison Between Fixed Panel, Singleaxis and Dual-axis Sun Tracking Solar Panel System / P. Shams // Department of Electrical and Electronic Engineering. BRAC University. – 2017 – pp. 6–10.
Tip-tilt dual axis tracker. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://chinagreenpowertech.company.weiku.com/item/Tip-tiltdual-axis-tracker-TTDATE-2-axis-Solar-tracking-system-17945436.html>
- 9) G.Ananth. Design of Azimuth Altitude Dual Axis Tracker / Dr. M.Gopi Chand Naik // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2016 – №8 – pp. 311-316.
- 10) Photovoltaic Geographical Information System. Interactive Maps.

[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

11) Сонячні трекери. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032/>

12) J. Shi. Forecasting Power Output of Photovoltaic Systems Based on Weather Classification and Support Vector Machines / W.J. Lee, Y. Liu, Y.

Yang, W. Peng // IEEE Transactions on Industry Applications – 2012 – vol. 48 – pp. 1064–1069.

13) C. Sungur. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey // Renewable Energy – 2009 – vol. 34 – pp. 1119- 1125.

14) Солнечные трекеры. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://ust.su/solar/media/section-inner79/3032/>

15) J. Shi. Forecasting Power Output of Photovoltaic Systems Based on Weather Classification and Support Vector Machines / W.J. Lee, Y. Liu, Y. Yang, W. Peng // IEEE Transactions on Industry Applications – 2012 – vol. 48 – pp. 1064–1069.

16) C. Sungur. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey // Renewable Energy – 2009 – vol. 34 – pp. 1119- 1125.

17) A. Al-Mohamad. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system // Applied Energy – 2004 – vol. 79 – pp. 345-354.

18) Inter-Integrated Circuit. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://electrosome.com/i2c/#Disadvantages>

19) Advantages and disadvantages of I2C. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-I2C.html>

20) RS-232C. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://searchnetworking.techtarget.com/definition/RS-232C>

21) STM32VLDISCOVERY user manual. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://prochip.com.ua/image/data/Products/Semiconductors/IC/microcontrollers/evaluation-boards/data/stm32f100-user-manual.pdf>

22) Системи відновлюваної енергетики / [Мхітарян Н. М., Кудря С. О., Резцов В.

Ф.]: Підручник. — Київ: 2015. — 312 с.

- 23) Автоматизовані системи керування технологічними процесами / [Попович М. Г., Ковальчук О. В., Ткачук В. В.]: Підручник. — Київ: 2018. — 405 с.
- 24) Електромеханічні системи стеження за Сонцем / [Шинкаренко В. Ф., Гаврилюк В. І., Савченко В. В.]: Монографія. — Дніпро: 2019. — 198 с.
- 25) Мікропроцесорні системи та мікроконтролери / [Батура В. І., Романкевич В. О., Лисенко О. М.]: Навчальний посібник. — Харків: 2020. — 275 с.
- 26) Фотоелектричні системи та їх застосування / [Резцов В. Ф., Суржик Т. В., Бойко А. В.]: Навчально-методичний посібник. — Київ: 2017. — 210 с.
- 27) Проектування систем на базі мікроконтролерів STM32 / [Зайцев В. М., Коваль Т. І., Григор'єв О. С.]: Практикум. — Львів: 2021. — 320 с.
- 28) Сенсорні мережі та інтерфейси передачі даних / [Мельник А. О., Голембо В. А., Денисенко В. І.]: Навчальний посібник. — Львів: 2019. — 240 с.
- 29) Мехатронні системи та виконавчі механізми / [Бойко А. В., Петренко О. М., Сидоренко В. В.]: Підручник. — Вінниця: 2018. — 285 с.
- 30) Силова електроніка та керування електродвигунами / [Юрченко М. М., Сидоренко В. В., Марченко О. М.]: Навчальний посібник. — Київ: 2020. — 315 с.
- 31) Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / [Півняк Г. Г., Волков О. В., Кузнєцов Ю. М.]: Підручник. — Дніпро: 2016. — 420 с.
- 32) Алгоритмізація та моделювання систем автоматики / [Коваленко І. І., Савченко В. В., Борисенко А. А.]: Навчальний посібник. — Харків: 2019. — 250 с.
- 33) Вбудовані системи керування: апаратна та програмна реалізація / [Денисенко В. І., Марченко О. М., Юрченко М. М.]: Навчально-практичний посібник. — Одеса: 2022. — 290 с.
- 34) Сучасні методи вимірювання та первинні перетворювачі / [Григор'єв О. С., Лисенко О. М., Ткаченко В. М.]: Монографія. — Київ: 2018. — 195 с.
- 35) Геліоенергетика: розрахунок параметрів інсоляції та проектування СЕС / [Ткаченко В. М., Борисенко А. А., Кудря С. О.]: Навчальний посібник. — Запоріжжя: 2017. — 175 с.
- 36) Охорона праці та безпека життєдіяльності в інженерній галузі / [Шевченко О. В., Кравченко М. М., Попович М. Г.]: Підручник. — Київ: 2021. — 260 с.