

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної кваліфікаційної роботи
бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Фурзенко Олександр Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за
допомогою мікропроцесорного керування

за матеріалами:

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник д-р філософії з фізики, доц. Соломенко А.Г.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від

Завідувач кафедри _____
(підпис)

доцент, к.п.н.

(Наук. ступінь, вчене звання)

Є.О. Модло

(Ініціали, прізвище)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Фурзенко Олександра Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування
Керівник роботи Соломенко Анастасія Геннадіївна д-р філософії з фізики, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06» квітня 2026 р. № 239-ст

2. Строк подання здобувачем роботи до 01.06.2026 р.

3. Зміст кваліфікаційної роботи, об'єкт, предмет та мета дослідження:

Розділ 1. Аналітичний огляд сучасного стану геліоенергетики та систем просторової орієнтації фотоелектричних панелей.

Розділ 2. Проектування апаратно-технічного забезпечення мікропроцесорної системи автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером.

Розділ 3. Математичне моделювання, алгоритмізація та імітаційна керування трекером.

Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації автоматизованих геліоустановок СЕС.

Об'єкт дослідження: процес просторової орієнтації (за азимутальною та зенітною координатами) фотоелектричної панелі відносно видимого положення Сонця на небосхилі для максимізації кута падіння променів.

Предмет дослідження: програмно-апаратні засоби, алгоритми, та схеми мікропроцесорного автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером із контурами безаварійного метеорологічного захисту та обмеження ходу конструкції.

Мета кваліфікаційної роботи: підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності геліоенергетичних установок шляхом проектування, алгоритмізації та комп'ютерного імітаційного моделювання керування двоосьовим трекером на базі контролера Arduino Uno.

5.Перелік графічного матеріалу :

1.Функціональна схема автоматизації системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування

2.Принципова електрична схема лабораторного прототипу модуля керування сонячним трекером

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Соломенко А.Г.	10.04.2025	10.04.2025
Основна частина	Соломенко А.Г.	10.04.2025	10.04.2025

7.Дата видачі завдання 10.04.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів МДР	Строк виконання етапів роботи	Відмітка керівника про виконання етапів (дата, підпис)
1	Аналітична частина	20.04.2026	
2	Основна частина	20.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4	Виконання графічної частини	02.06.2026	
5	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6	Захист роботи в ЕК	19.06.2026	

6. Дата видачі завдання 06.04.2024

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Соломенко А.Г.

(прізвище та ініціали)

Студент

(підпис)

Фурзенко О.А

(прізвище та ініціали)

№ рядка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	При м.
1	A3	ВРБ.151.239-ст.07.Е1.1			Структурна схема	1		
2					технічних засобів			
3								
4	A3	ВРБ.151.239-ст.07.Е1.2			Схема електрична	1		
5					функціональна			
6								
7	A3	ВРБ.151.239-ст.07.Е1.3			Схема електрична	1		
8					принципова лабораторного			
9					прототипу модуля			
10					керування сонячним трекером			
11								
12	A3	ВРБ.151.239-ст.07.Е1.4			Блок-схема алгоритма	1		
13					роботи			
14								
15	A3	ВРБ.151.239-ст.07.ВР			Пояснювальна записка	77		
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
					ВРБ.151.239-ст.07.ВР Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування Відомість роботи			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розроб.		Фурзенко О.А..						
Пров.		Соломенко А.Г.			Літера Аркуш Аркушів	4 ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА зр. АВ-22		
Н.контр.		Соломенко А.Г.						
Затв.		Модло Є.О.						

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної бакалаврської роботи містить: 77 с., 12 рис., 6 табл., 35 джерел, 4 додатки.

Тема кваліфікаційної роботи — «Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування».

Об'єкт дослідження - процес просторової орієнтації фотоелектричної панелі відносно видимого положення сонця на небосхилі для максимізації кута падіння променів.

Предмет дослідження - програмно-апаратні засоби мікропроцесорного автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером із контурами безаварійного метеорологічного захисту та обмеження ходу конструкції.

Мета роботи - підвищення енергетичної ефективності геліоенергетичних установок шляхом проектування, математичного обґрунтування та комп'ютерного моделювання системи автоматичного керування двоосьовим трекером сонячних панелей на базі мікроконтролерної платформи.

Методи дослідження - теорія автоматичного керування (для побудови динамічних моделей та синтезу закону регулювання), методи лінеаризації та нелінійного релейного аналізу, математичне та імітаційне комп'ютерне моделювання в середовищі Tinkercad Circuits, інженерні методи розрахунку захисного заземлення за правилами ПУЕ.

Отримані результати :

У роботі виконано комплексне проектування дворівневої системи автоматичного керування положенням фотоелектричного модуля. Схемотехнічно реалізовано аналоговий вимірювальний міст на базі чотирьох фоторезисторів GL5528 та прецизійних дільників напруги, а також підключено рідкокристалічний дисплей LCD 1602 по енергоефективній двопровідній послідовній шині I2C через розширювач портів PCF8574, що оптимізувало використання ресурсів мікроконтролера Arduino Uno.

Синтезовано дискретний трипозиційний релейний закон керування з вікном толерантності ($DEAD_ZONE = 45$), що повністю ліквідувало коливання приводів від високочастотних завад датчиків. Розроблено та протестовано модульне

програмне забезпечення на мові C/C++, яке реалізує жорстку ієрархію безпеки: безумовне паркування панелі у горизонтальний стан при фіксації штормового вітру анемометром та миттєве блокування реверсу актуаторів механічними кінцевими вимикачами.

У середовищі Tinkercad Circuits проведено успішну верифікацію алгоритму, яка підтвердила його стійкість та безаварійність. Виконано розрахунок захисного заземлення щогли сонячної станції, опір якого склав 2,79 Ом, що повністю відповідає вимогам електробезпеки ПУЕ ($< 4,0$ Ом). Сформульовано вимоги з пожежної безпеки під час використання вуглекислотних вогнегасників та правила виконання робіт на висоті з приставних драбин.

Сфера застосування: Результати роботи можуть бути використані під час проектування та модернізації малих і середніх промислових або автономних сонячних електростанцій (СЕС), а розроблений комп'ютерний макет - як лабораторний стенд у навчальному процесі кафедри електричної інженерії та автоматизації.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ОПИС ПРОЦЕСУ ОРІЄНТАЦІЇ ТА РОЗРОБКА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ.....	13
1.1. Загальні відомості про фотоелектричні панелі та сонячну інсоляцію	13
1.2. Опис процесу орієнтації фотоелектричної панелі та відстеження положення сонця	17
1.3. Технологічні та конструктивні особливості системи автоматичного регулювання положення панелі	20
1.4. Порівняльний аналіз статичних, одноосьових та двоосьових систем орієнтації	24
1.5. Розробка та обґрунтування технічних вимог до проєктованої системи.....	27
2. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ, СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СИСТЕМИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	29
2.1. Розробка та обґрунтування функціональної схеми автоматизації.....	29
2.2. Вибір та інженерне обґрунтування технічних засобів автоматизації.....	32
2.2.1. Вибір вимірювальних перетворювачів: датчиків освітленості, положення, кінцевих вимикачів та анемометра.....	32
2.2.2. Вибір виконавчих механізмів та драйверів керування.....	36
2.2.3. Вибір мікропроцесорного контролера	39
2.2.4. Вибір елементів живлення, захисту та індикації	41
2.3. Розробка структурної схеми інформаційно-керуючої системи.....	45
2.4. Розробка принципової електричної схеми модуля керування та силової частини	48
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	51
3.1. Побудова математичної моделі об'єкта керування та виконавчого електроприводу.....	51
3.2. Розрахунок та синтез закону керування положенням виконавчого механізму	55
3.3. Розробка загального алгоритму функціонування системи	59
3.4. Опис програмної реалізації алгоритму для мікроконтролера	62
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.	67
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при обслуговуванні фотоелектричних установок.....	67
4.2. Технічні рішення щодо забезпечення електробезпеки та заземлення конструкції трекера	69
4.3. Розрахунок захисного заземлення або блискавкозахисту установки	71

4.4. Заходи щодо пожежної безпеки та безпечної експлуатації електроустановок	73
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
ДОДАТКИ.....	81
Додаток А Функціональна схема автоматизації	81
Додаток Б Принципова електрична схема	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Скорочення та терміни латиницею:

AC (від англ. *Alternating Current*) - змінний струм.

BESS (від англ. *Battery Energy Storage System*) - система накопичення енергії акумулятора.

DC (від англ. *Direct Current*) - постійний струм.

GWdc (від англ. *Gigawatt of Direct Current*) - гігават постійного струму.

HJT (від англ. *Heterojunction Technology*) - технологія гетеропереходу фотоелектричних елементів.

LCOE (від англ. *Levelized Cost of Electricity*) - приведена собівартість виробництва електроенергії.

LDR (від англ. *Light Dependent Resistor*) - фоторезистор (оптичний сенсор освітленості).

PV (від англ. *Photovoltaics*) - фотовольтаїка або фотоелектрика.

TOPCon (від англ. *Tunnel Oxide Passivated Contact*) - технологія тунельного оксидного пасивованого контакту сонячних елементів.

Скорочення та терміни кирилицею:

сонячні Альbedo - фізична величина, яка показує, яку частку сонячного світла відбиває поверхня або небесне тіло; вимірюється у відсотках (від 0 % до 100 %) або десяткових дробах (від 0 до 1).

Інсоляція - кількість сонячного випромінювання, що надходить на певну поверхню за певний проміжок часу.

САР - система автоматичного регулювання.

СЕС - сонячна електростанція (електростанції).

ВСТУП

У час глобальної енергетичної трансформації та нагальної необхідності зміцнення енергетичної безпеки України, сонячна фотоелектрична енергетика посідає ключове місце серед відновлюваних джерел енергії. Постійне зростання енергоспоживання на тлі вичерпності викопного палива, ударів по енергетичній інфраструктурі України та стрімкого зниження вартості напівпровідникових модулів робить сонячні електростанції (СЕС) найбільш динамічним сектором нової генерації. Особливої уваги ці процеси набувають в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення нашої держави, коли критично важливою є децентралізація енергосистеми та підвищення автономності промислових і побутових споживачів.

Проте ефективність класичних стаціонарних фотоелектричних установок залишається обмеженою через так звану «косинусну залежність» - падіння виробітку енергії при відхиленні кута падіння променів від нормалі до робочої поверхні панелі. Оскільки Сонце безперервно змінює своє положення протягом доби (азимутальний рух) та року (зенітний рух), фіксовані сонячні панелі втрачають до 40% потенційної генерації, що суттєво знижує економічну рентабельність СЕС та збільшує термін їхньої окупності.

Мета дослідження — підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності фотоелектричних установок шляхом проектування, математичного обґрунтування, алгоритмізації та комп'ютерного імітаційного моделювання завадостійкої мікропроцесорної системи автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером із інтегрованими контурами безпеки.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання дослідження:

1. Провести системний аналіз сучасного стану сонячної енергетики, класифікувати існуючі типи та архітектури побудови систем орієнтації геліопанелей.
2. Розробити апаратну структуру та повну принципову електричну схему модуля керування і силової частини трекера на базі мікроконтролера ATmega328P (ArduinoUno), диференціального оптичного вузла фоторезисторів та лінійних виконавчих актуаторів постійного струму напругою 12 В.

3. Сформувати математичну модель об'єкта керування і виконавчого електроприводу в операторній формі Лапласа; синтезувати нелінійний трипозиційний релейний закон керування з зоною нечутливості та математично обґрунтувати його часові й координатні параметри.
4. Розробити загальний алгоритм функціонування системи у вигляді кінцевого автомата з чіткою ієрархією пріоритетів безпеки, написати та протестувати модульне програмне забезпечення на мові C/C++.
5. Створити віртуальний інтерактивний макет системи та здійснити комп'ютерне імітаційне моделювання САК у середовищі Tinkercad Circuits для верифікації робочих та аварійних режимів стеження.
6. Виконати комплексну експертизу охорони праці на майданчику СЕС, здійснити повний інженерний розрахунок штучного захисного заземлення опорної щогли трекера відповідно до норм ПУЕ та ДСТУ, розробити заходи пожежної безпеки.

Об'єкт дослідження — процес просторової орієнтації (за азимутальною та зенітною координатами) рухомої рами фотоелектричної панелі відносно видимого положення сонячного диска на небосхилі для максимізації кута падіння променів.

Предмет дослідження - програмно-апаратні засоби, алгоритми, математичні моделі та схеми мікропроцесорного автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером, що містять інтегровані контури метеорологічного захисту та обмеження ходу металоконструкції.

Методи дослідження - для вирішення поставлених завдань у роботі використано: методи теорії автоматичного керування (для математичного опису динаміки ланок та синтезу релейного регулятора); методи нелінійного аналізу та лінеаризації (для обґрунтування зони толерантності датчиків); методи комп'ютерного та імітаційного моделювання електронних схем (у середовищі Tinkercad Circuits); інженерні методи розрахунку електромагнітних та провідних параметрів групових заземлювачів відповідно до вимог нормативно-правових актів з охорони праці.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні алгоритму активного оптичного стеження за сонячним диском шляхом впровадження

жорсткої ієрархії неблокуючих переривань для контурів безпеки (штормове паркування та контроль кінцевих вимикачів обмеження ходу актуаторів), що дозволило підвищити динамічну стійкість та живучість конструкції трекара в екстремальних кліматичних умовах.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ОПИС ПРОЦЕСУ ОРІЄНТАЦІЇ ТА РОЗРОБКА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ

1.1. Загальні відомості про фотоелектричні панелі та сонячну інсоляцію

Сучасна сонячна фотоелектрична станція (СЕС) є високотехнологічним промисловим об'єктом, призначеним для генерації електричної енергії шляхом безпосереднього перетворення сонячного електромагнітного випромінювання у постійний електричний струм (DC). В умовах глобального переходу до декарбонізованої економіки цей технологічний процес характеризується повною екологічною безпекою, відсутністю викидів парникових газів (зокрема CO₂), радіаційною безпекою та мінімальними операційними витратами.

Технологічний процес базується на явищі внутрішнього фотоелектричного ефекту, що протікає в напівпровідникових структурах під дією сонячної інсоляції. Фізична суть процесу полягає в наступному:

При попаданні квантів світла (тобто фотонів) на поверхню напівпровідника, їхня енергія поглинається електронами валентної зони.

Якщо енергія фотона перевищує ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу (E_g), електрон долає енергетичний бар'єр і переходить у зону провідності, утворюючи пару вільних носіїв заряду «електрон-дірка».

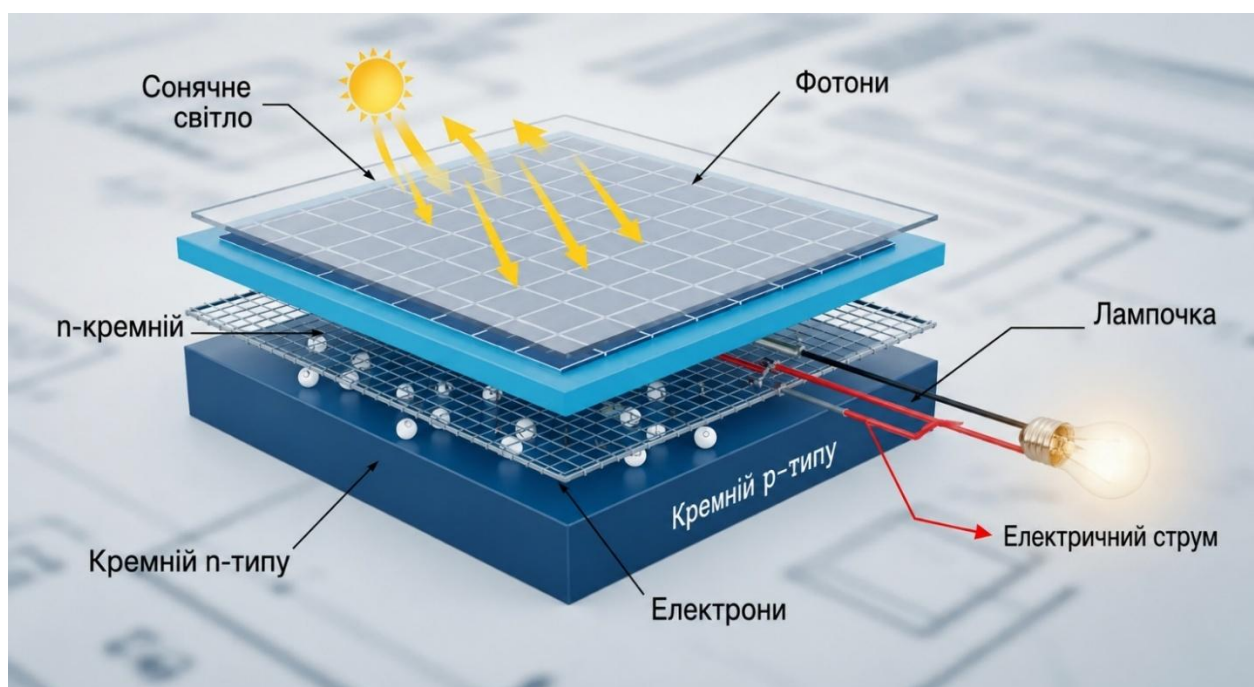
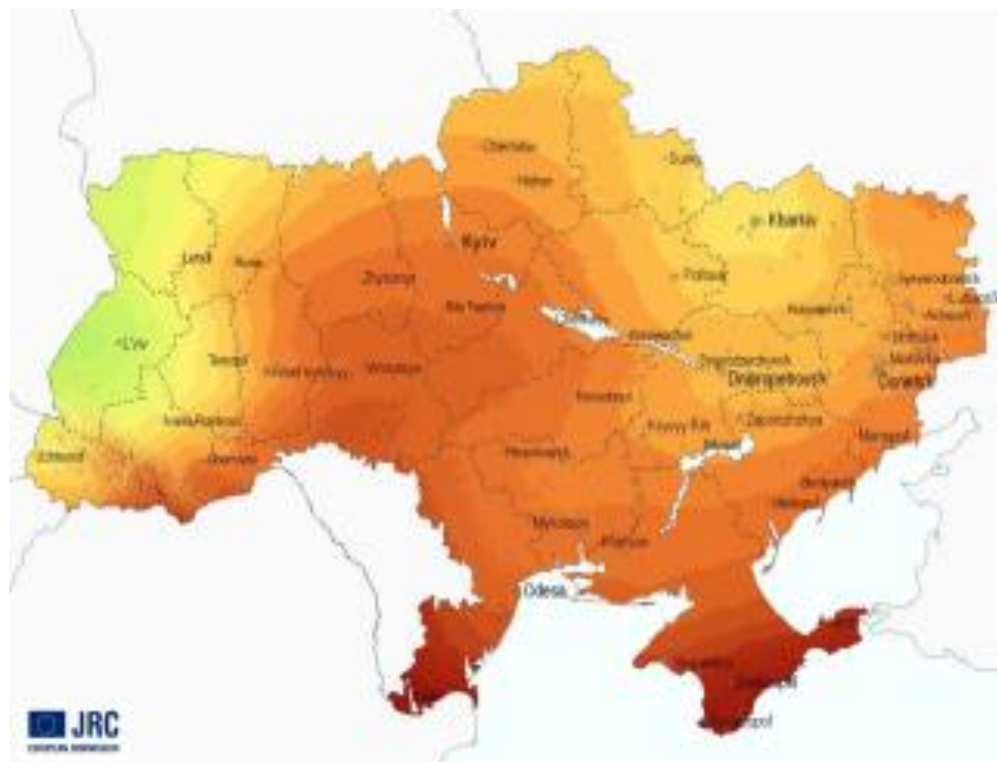


Рис.1.1 Процеси що відбувається всередині сонячного елемента.

Створений штучним шляхом р-п перехід розділяє отримані вільні носії заряду під дією свого внутрішнього електричного поля: електрони дрейфують до п-області, а дірки - до р-області.

Внаслідок просторового розділення на зовнішніх контактах елемента виникає різниця потенціалів, а при підключенні навантаження у ланцюзі починає протікати постійний струм.

Інсоляція - це кількість сонячного випромінювання, що надходить на певну поверхню за певний час. Вона вимірюється у Вт/м². Ефективність перетворення енергії безпосередньо залежить від інтенсивності цієї іррадіації та кута падіння променів на робочу площину фотоелектричної панелі.



<1150 1250 1250 1300 1350 1400 1450 1500 1550>



Рис.1.2 Карта річного розподілу сонячної інсоляції на території України, кВт/м.кв

З конструктивно-технологічної точки зору сучасне виробництво електроенергії на СЕС об'єднує кілька взаємопов'язаних рівнів обладнання та систем автоматизації:

Первинний рівень генерації (фотоелектричне поле): масив сонячних панелей на базі кремнію, змонтованих на опорних конструкціях.

Силовий перетворювальний рівень: інверторне обладнання, що трансформує постійний струм (DC) у змінний струм (AC) стандартної частоти 50 Гц та напруги 220/380 В.

Рівень захисту та комутації (AC/DC автоматика): захищає ланцюги від перевантажень, коротких замикань та температурного перегріву.

Рівень вимірювання та обліку: інтелектуальні двонаправлені лічильники для фіксації обсягів енергії.

Рівень диспетчеризації: SCADA-моніторинг для віддаленого контролю параметрів генерації в реальному часі.

Залежно від виробничого призначення, промислові СЕС функціонують у кількох базових режимах, які наочно порівняно у таблиці нижче.

Таблиця 1.1.

Базові режими роботи промислових СЕС

Режим роботи	Схемні особливості	Технологічне призначення
Off-grid (Автономний)	Комплектується акумуляторами (BESS) та контролерами заряду.	Застосовується для об'єктів, позбавлених доступу до централізованої мережі.
On-grid (Мережевий)	Спільна робота із зовнішньою енергосистемою без накопичувачів.	Надлишки відпускаються в мережу, а дефіцит потужності добирається з неї.
Для власного споживання	Автоматика динамічно обмежує генерацію інверторів.	Покриття до 95–100% денних технологічних потреб підприємства без перетоків у мережу..
Гібридний режим	Поєднує переваги мережевої роботи та накопичувачів.	Згладжування піків навантаження та резервне живлення критично важливих споживачів.

Сучасна фотоелектрична індустрія характеризується стрімким переходом від традиційних кремнієвих елементів Р-типу (структура PERC) до високоефективних технологій N-типу, які є значно стійкішими до деградації під

дією світла та мають вищий теоретичний ККД. До основних архітектур належать:

TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*): використовує надтонкий шар тунельного оксиду та легованого полікристалічного кремнію на тильній стороні, що різко зменшує рекомбінаційні втрати електронів.

HJT (*Heterojunction Technology*): гетероперехідна технологія, яка поєднує пластини монокристалічного кремнію з надтонкими шарами аморфного кремнію, забезпечуючи найкращий температурний коефіцієнт.

IBC (*Interdigitated Back Contact*): технологія із зворотним контактом, де всі металеві струмознімальні сітки перенесені на тильну сторону елемента, що повністю усуває затінення фронтальної поверхні.

Таблиця 1.2.

Порівняння основних промислових технологій кремнієвих модулів

Технологія	Типовий ККД (станом на 2025–2026 рр.)	Температурний коефіцієнт (P_{max})	Щорічна деградація
PERC	20–22%	від -0.35% до - 0.40%/°C	0.5–0.8%
TOPCon	22.5–24.5%	від -0.29% до - 0.32%/°C	0.4%
HJT	23–24.8%	від -0.24% до - 0.26%/°C	0.25%
IBC	24–25.2%	від -0.26% до - 0.29%/°C	0.25%

Важливим технологічним фактором є температурна залежність кремнієвих елементів. При нагріванні фотокомірки влітку (до +65°C) ширина забороненої зони кремнію звужується, що викликає падіння напруги розімкненого ланцюга приблизно на 2.2 мВ на кожен градус Цельсія. Як наслідок, загальна вихідна потужність сонячної панелі падає, а робота трекара дозволяє компенсувати ці втрати завдяки максимізації генерації у прохолодніші ранкові та вечірні години. Крім того, вранці та ввечері спектр сонячного світла збагачений червоними та інфрачервоними довжинами хвиль через ефект оптичної маси повітря, а новітні фотомодулі мають розширену спектральну чутливість для їх ефективного перетворення.

Двосторонні модулі та фактор оптичного забруднення

Сучасним стандартом промислових СЕС стає використання двосторонніх (*bifacial*) модулів, які здатні генерувати додаткову енергію за рахунок поглинання відбитого від землі світла. Цей додатковий приріст генерації (*Bifacial Gain*) безпосередньо залежить від коефіцієнта відбивної здатності навколишньої поверхні — альбедо.

Таблиця 1.3.

Вплив типу підстилаючої поверхні на двосторонню генерацію

Тип поверхні	Коефіцієнт альбедо (%)	Очікуваний приріст генерації
Свіжий сніг	80–90%	25–38%
Білий бетон	70–80%	20–30%
Світлий пісок	30–40%	15–22%
Зелена трава	15–25%	8–15%
Темний асфальт	5–10%	2–5%

Для отримання максимального ефекту такі панелі на трекерах піднімають на висоту 1.5–2 м над поверхнею.

Останнім критичним фактором є забруднення робочої поверхні пилом та пилком, що діє як локальне затінення комірок і може викликати небезпечний перегрів — виникнення «гарячих точок» через протікання зворотного струму. Для запобігання цим втратам у сучасних системах впроваджують інноваційні методи захисту:

Наноструктуровані гідрофобні та гідрофільні покриття скла для самоочищення під час дощу.

Електродинамічні екрани, які створюють змінне електростатичне поле для відштовхування пилу без використання води.

Автоматизовані безводні роботизовані системи очищення (наприклад, Airtouch AT 4.0), що регулярно очищують панелі вздовж рядів трекерів за допомогою м'яких щіток.

1.2. Опис процесу орієнтації фотоелектричної панелі та відстеження положення сонця

Технологічний процес відстеження траєкторії сонця базується на безперервному розрахунку або вимірюванні двох ключових кутових координат

у сферичній системі, які визначають просторове положення Сонця відносно точки спостереження на поверхні Землі:

Кут азимута (A або ψ): кут у горизонтальній площині між напрямком на базову точку (найчастіше на північ або південь) та проекцією сонячного вектора на горизонтальну поверхню. Протягом доби цей кут змінюється від східного значення на світанку до західного під час заходу сонця.

Кут зеніту (Θ) або кут висоти сонця (α): кут піднесення сонця над лінією істинного горизонту. Висота сонця є функцією не лише часу доби, а й географічної широти місцевості та порядкового номера дня в році (через коливання кута схилення землі δ).°

Процес динамічної орієнтації спрямований на те, щоб вектор нормалі n проведений до фронтальної площини фотоелектричного модуля, збігався з поточним сонячним вектором s . За такого стану кут відхилення (розузгодження) Θ наближається до нуля ($\Theta \rightarrow 0$), що максимізує поточне значення інсоляції.



Рис.1.3 Кут падіння випромінювання на сонячну панель.

Математичні методи обчислення координат (Хронометричний підхід)

За умов повної хмарності або туману оптичні датчики зворотного зв'язку втрачають працездатність. У таких випадках мікропроцесорна система керування переходить на математичний (хронометричний) метод відстеження. Він спирається на обчислення кутів за допомогою алгоритмів типу SPA (Solar Position Algorithm).

Основними математичними рівняннями для розрахунку є:

Схилення Сонця (δ): визначає кутовий нахил сонячних променів відносно екватора і змінюється в межах від -23.45° (зимове сонцестояння) до $+23.45^\circ$ (літнє сонцестояння):

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + n)\right)$$

де n — порядковий день року, починаючи з 1 січня.

Годинний кут (ω): відображає кутове зміщення сонця внаслідок добового обертання землі (кожна година часу дорівнює 15° кутового ходу):

$$\omega = 15 \cdot (T_{sol} - 12)$$

де T_{sol} - істинний сонячний час.

Знаючи широту місцевості (φ), схилення (δ) та годинний кут (ω), обчислювальне ядро мікроконтролера розраховує висоту Сонця (α) за формулою:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

Отримані значення кутів трансформуються в керуючі імпульси (через ШІМ-модуляцію або крокові послідовності), які передаються на силові драйвери двигунів для повороту механічної платформи трекара.

Режими функціонування та методи відстеження САР.

Залежно від структури інформаційних каналів, сучасні мікропроцесорні системи автоматичного керування (САК) сонячними трекарами реалізують три основні методи орієнтації:

Разомкнута САК (Хронометричний метод): Керування здійснюється виключно за жорсткою математичною програмою з використанням апаратного модуля реального часу точного часу (RTC) та заздалегідь закладених географічних координат (GPS). Система має абсолютну стійкість до зовнішніх завад (відблиски, спалахи, штучне світло), але не здатна адаптуватися до локальних змін освітленості за умов мінливої хмарності.

Замкнута САК (Оптичний метод зворотного зв'язку): Орієнтація виконується на основі аналізу сигналів від первинних вимірювальних перетворювачів — чотириквadrантних фотоматриць чи диференціальних фоторезисторів (LDR), розділених непрозорою перегородкою. При виникненні кутового відхилення одна з пар датчиків затіняється, виникає різниця напруг

(ΔU), яка обробляється аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) контролера як сигнал помилки розузгодження. Блок керування видає команду на приводи до моменту, поки $\Delta U \rightarrow 0$.

Гібридний метод керування: Поєднує обидва підходи. У сонячні дні система здійснює прецизійне наведення за оптичними датчиками. При тривалій хмарності мікроконтролер автоматично ігнорує покази фоторезисторів і здійснює переміщення за астрономічним календарем.

1.3. Технологічні та конструктивні особливості системи автоматичного регулювання положення панелі

Система автоматичного регулювання положення фотоелектричної панелі призначена для підтримання такого просторового положення модуля, за якого сонячне випромінювання потрапляє на його поверхню під найбільш сприятливим кутом. Основним завданням такої системи є зменшення втрат енергії, пов'язаних із відхиленням кута падіння сонячних променів від нормалі до поверхні панелі.

Об'єктом керування в даній системі є фотоелектрична панель, закріплена на рухомій опорно-поворотній конструкції. Керованою величиною є кутове положення панелі у просторі. Керуючий пристрій - мікропроцесорний контролер, отримує інформацію від датчиків, обробляє її відповідно до заданого алгоритму та формує сигнали для виконавчих механізмів. Виконавчі механізми перетворюють електричні керуючі сигнали на механічне переміщення панелі.

За конструктивною ознакою системи орієнтації фотоелектричних панелей поділяються на одноосьові та двоосьові. Одноосьова система забезпечує поворот панелі тільки навколо однієї осі. Найчастіше така вісь використовується для відстеження добового руху сонця зі сходу на захід. Двоосьова система має два незалежні канали керування: за азимутом і за кутом нахилу. Завдяки цьому панель може змінювати положення як у горизонтальній, так і у вертикальній площині.

У даному проєкті доцільно розглянуто двоосьову систему орієнтації, оскільки вона забезпечує повніше відстеження положення сонця протягом доби та року. Перша вісь відповідає за горизонтальний поворот панелі, тобто зміну

азимутального кута. Друга вісь відповідає за зміну кута нахилу панелі відносно горизонту. Така конструкція дозволяє враховувати не лише добовий рух Сонця, а і сезонну зміну його висоти над горизонтом.

Конструктивно двоосьова система орієнтації складається з нерухомої основи, поворотної платформи, вузла нахилу, рами для кріплення фотоелектричної панелі, виконавчих механізмів, датчиків та блока керування. Нерухома основа забезпечує стійкість усієї конструкції та передає навантаження на опорну поверхню або фундамент. Поворотна платформа реалізує рух за азимутом, а вузол нахилу забезпечує зміну кута встановлення панелі у вертикальній площині. Рама повинна забезпечувати надійне кріплення панелі та витримувати механічні навантаження, що виникають під час експлуатації.

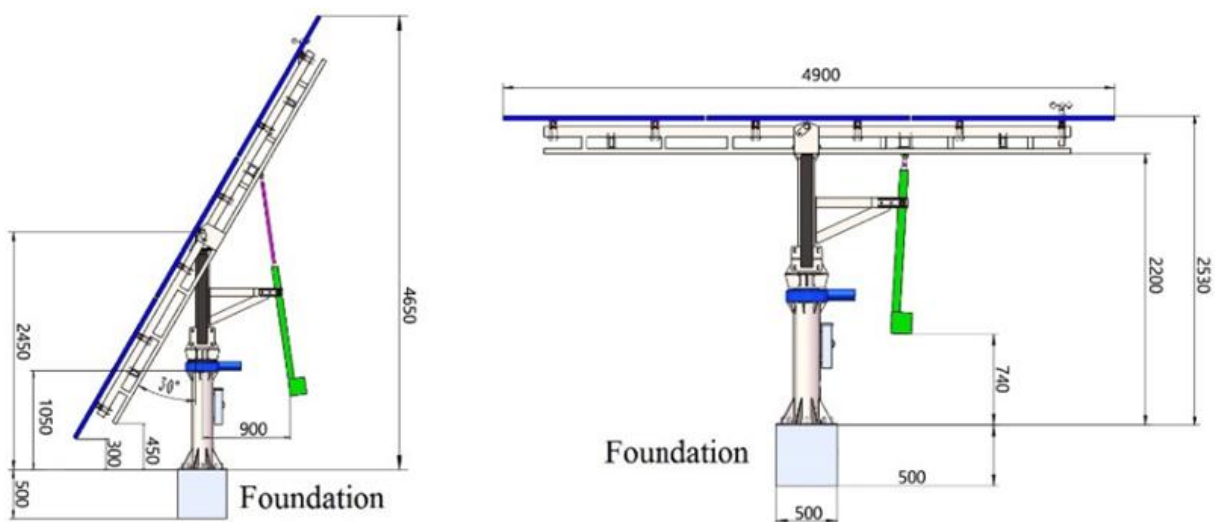


Рис.1.4. Конструктивна схема двоосьового сонячного трекера з опорно-поворотним механізмом

Важливою конструктивною вимогою до системи є забезпечення достатньої жорсткості та стійкості. Фотоелектрична панель має відносно велику площу, тому під дією вітру на неї виникає значне навантаження. Якщо конструкція має недостатню жорсткість, можуть виникати коливання, перекоси, люфти та помилки позиціонування. Це не лише знижує точність наведення панелі на сонце, а й може призвести до прискореного зносу механічних вузлів.

До складу системи автоматичного регулювання положення панелі входять вимірювальні перетворювачі. Для активного відстеження Сонця можуть використовуватися датчики освітленості, наприклад фоторезистори або

фотодіоди. Вони дають змогу визначити напрямок найбільшої інтенсивності світлового потоку. У двоосьовій системі зазвичай застосовують чотири датчики освітленості, розміщені навколо невеликої перегородки. Якщо панель спрямована точно на сонце, усі датчики освітлюються приблизно однаково. У разі відхилення панелі один або декілька датчиків потрапляють у тінь, і мікроконтролер визначає напрямок необхідної корекції.

Крім датчиків освітленості, у системі можуть використовуватися датчики положення. До них належать енкодери, потенціометри зворотного зв'язку, кінцеві вимикачі. Енкодери дають змогу визначати фактичний кут повороту механізму, що підвищує точність регулювання. Кінцеві вимикачі запобігають виходу механізму за допустимі межі. Це особливо важливо для двоосьової конструкції, де неконтрольований поворот може призвести до пошкодження кабелів, приводів або самої панелі.

Виконавчі механізми вони забезпечують фізичне переміщення панелі відповідно до команд мікроконтролера. У малопотужних навчальних і лабораторних макетах часто застосовують сервоприводи, оскільки вони прості в керуванні та мають вбудований зворотний зв'язок за положенням. Для більших конструкцій можуть використовуватися крокові двигуни з редукторами, мотор-редуктори або лінійні актуатори. Лінійні актуатори особливо зручні для зміни кута нахилу панелі, оскільки вони можуть утримувати навантаження у заданому положенні без постійного споживання енергії.

Вибір виконавчого механізму залежить від маси панелі, необхідного діапазону повороту, швидкості переміщення, точності позиціонування та умов експлуатації. Для сонячного трекера не потрібна висока швидкість руху, оскільки положення сонця змінюється повільно. Набагато важливішими є достатній крутний момент, надійність, мінімальний люфт, можливість утримання положення та стійкість до зовнішніх впливів. Також необхідно враховувати енергоспоживання приводів, оскільки частина виробленої фотоелектричною панеллю енергії може витрачатися на роботу самої системи орієнтації.

Мікропроцесорний контролер виконує функції центрального керуючого пристрою. Він зчитує сигнали з датчиків, перетворює аналогові сигнали у цифрову форму, порівнює рівні освітленості або положення, визначає помилку регулювання та формує керуючі сигнали для приводів. Для керування сервоприводами або драйверами двигунів можуть використовуватися широтно-імпульсні сигнали. У разі застосування датчиків освітленості контролер реалізує алгоритм порівняння сигналів від пар датчиків. Якщо різниця сигналів перевищує заданий поріг, контролер подає команду на поворот панелі у відповідному напрямку.

Однією з важливих технологічних особливостей системи є наявність зони нечутливості. Вона необхідна для того, щоб система не реагувала на дуже малі зміни освітленості, які можуть бути спричинені шумами датчиків, короткочасною хмарністю або електричними перешкодами. Якщо різниця сигналів між датчиками не перевищує встановлений допуск, виконавчі механізми не вмикаються. Це дозволяє зменшити кількість зайвих переміщень, знизити знос приводів і зменшити власне енергоспоживання системи.

Для підвищення надійності та безпеки роботи системи доцільно передбачити кілька режимів функціонування. Основним є автоматичний режим, у якому панель орієнтується за сигналами датчиків або за розрахованим положенням Сонця. Ручний режим може використовуватися під час налагодження, ремонту або технічного обслуговування. Нічний режим передбачає повернення панелі у початкове положення для підготовки до наступного світлового дня. Аварійний режим використовується при сильному вітрі, несправності датчиків або досягненні граничних положень механізму.

Окрему увагу слід приділяти захисту від вітрового навантаження. У разі сильного вітру фотоелектрична панель може створювати значний опір повітряному потоку. Тому система повинна мати можливість переведення панелі у безпечне положення. Для цього може використовуватися анемометр, який вимірює швидкість вітру. Якщо швидкість перевищує встановлене граничне значення, мікроконтролер припиняє звичайне відстеження Сонця і переводить

панель у положення паркування. Це зменшує механічне навантаження на раму, приводи та опору.

Ще однією особливістю є необхідність правильного прокладання електричних кабелів. Оскільки панель і частина конструкції рухаються, кабелі повинні мати достатній запас довжини та бути захищені від перекручування, натягу й механічного пошкодження. У системах із великим кутом повороту необхідно передбачати обмеження обертання або спеціальні кабельні канали. Порушення цього правила може призвести до обриву провідників, короткого замикання або нестабільної роботи датчиків і приводів.

Система автоматичного регулювання положення панелі повинна забезпечувати не лише точність, а й енергоефективність. Оскільки основною метою використання трека є збільшення виробітку електроенергії, власне споживання системи керування та приводів має бути мінімальним. Для цього застосовують переривчастий режим роботи приводів, зону нечутливості, вимкнення приводів після досягнення потрібного положення та перехід мікроконтролера в енергозберігаючий режим у нічний час.

Таким чином, технологічні та конструктивні особливості системи автоматичного регулювання положення фотоелектричної панелі визначаються необхідністю точного позиціонування, надійного утримання панелі, захисту від зовнішніх впливів і зменшення власного енергоспоживання. Основними елементами такої системи є опорно-поворотна конструкція, датчики освітленості та положення, мікропроцесорний контролер, виконавчі механізми, кінцеві вимикачі та засоби захисту. Правильне поєднання цих елементів дозволяє створити ефективну систему орієнтації, здатну підвищити продуктивність фотоелектричної установки та забезпечити її безпечну експлуатацію.

1.4. Порівняльний аналіз статичних, одноосьових та двоосьових систем орієнтації

Статичні системи є класичним базовим рішенням, у якому сонячні панелі жорстко закріплюються на металевих фермах під фіксованим зенітним кутом нахилу. Головною перевагою такої схеми є максимальна надійність, зумовлена повною відсутністю рухомих механічних елементів, електроприводів та

електронних блоків керування. Це зводить до мінімуму первинні капітальні вкладення та операційні витрати на обслуговування.

Проте фіксовані системи мають серйозне технологічне обмеження, відоме як «косинусна залежність». Оскільки кут падіння сонячних променів безперервно змінюється протягом доби та сезонів, ідеальний перпендикуляр досягається лише на короткий проміжок часу. Добовий графік генерації стаціонарної СЕС має вигляд гостроверхої параболи. У ранкові та вечірні години кутові втрати розузгодження призводять до недоотримання до 40–45% потенційної сонячної радіації, що суттєво погіршує приведену собівартість електроенергії (LCOE).

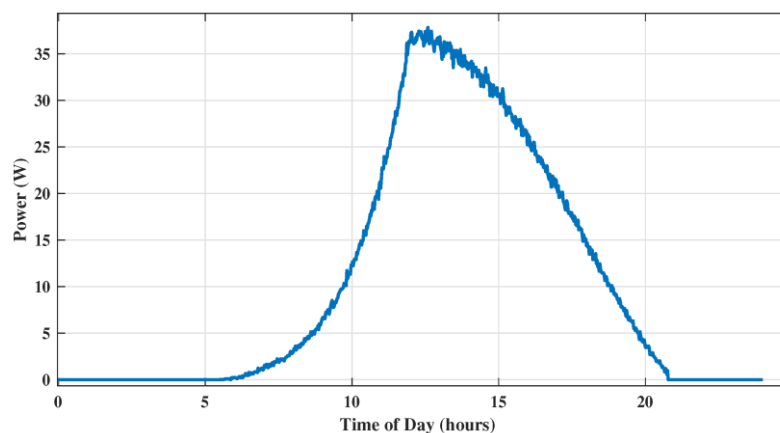


Рис.1.5 Потужність фотоелектричної панелі у фіксованому положенні.

Одновісні (одноосьові) системи сонячного трекінгу

Одновісні трекери мають один механічний ступінь вільності та здійснюють автоматичне відстеження сонячного диска вздовж однієї просторової осі — зазвичай горизонтальної або похилої, спрямованої з півночі на південь. Виконавчі механізми (електродвигуни та актуатори) повільно розвертають панелі за траєкторією схід — захід протягом світлового дня.

Впровадження одновісної автоматизації дозволяє суттєво змінити профіль добового виробітку енергії: гостра парабола трансформується у розширену трапецію з виположеним денним плато. Система починає активно генерувати промислову потужність уже в перші години після сходу Сонця і підтримує її до вечора, забезпечуючи середньорічний приріст генерації в межах +15% ... +25% порівняно з фіксованими столами. При цьому механічна та апаратна архітектура

залишається відносно доступною: один потужний центральний привід через систему тяг може керувати треком довжиною до 100 метрів.

Однак одновісні системи не здатні компенсувати зміну висоти сонця над горизонтом залежно від пори року, через що їхня ефективність помітно падає взимку та влітку у високих географічних широтах.

Двохосьові мікропроцесорні системи орієнтації

Двохосьова САР, має два незалежні канали керування та забезпечує повну просторову орієнтацію масиву фотомодулів. Завдяки комбінації азимутального обертання столу у горизонтальній площині та нахилу у вертикальній площині вектор нормалі до робочої поверхні панелей постійно збігається з поточним сонячним вектором. Помилка розузгодження мінімізується в реальному часі незалежно від часу доби та календарного сезону.

Добовий графік генерації двохосьового трекера наближається до максимального прямокутного плато.

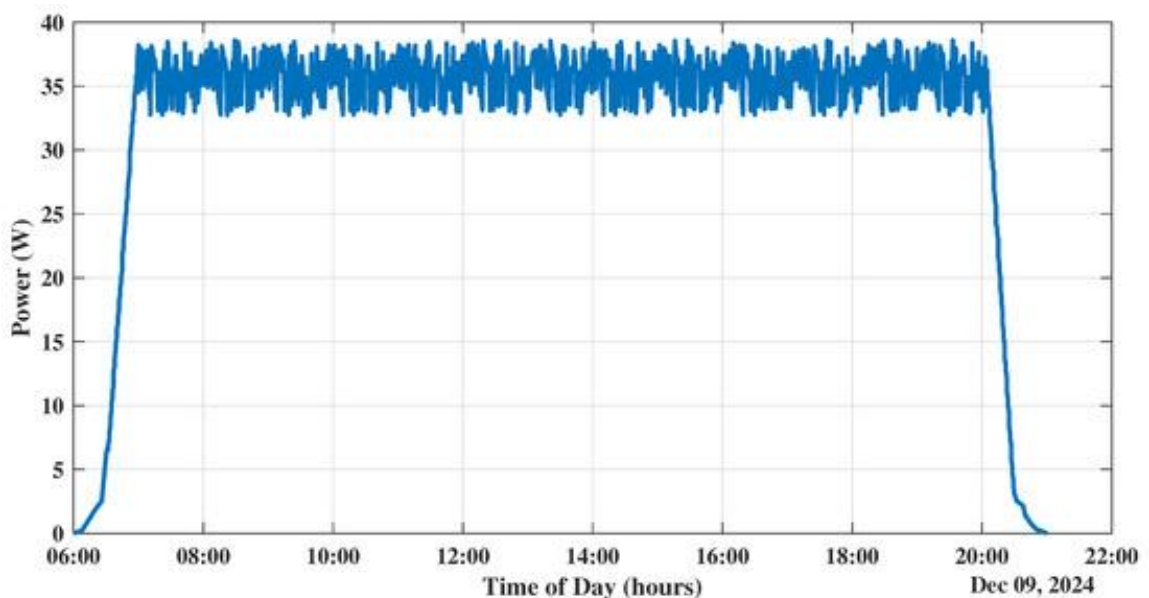


Рис.1.6 Потужність фотоелектричної панелі з використанням системи відстеження сонячної енергії.

Система демонструє найвищу енергетичну ефективність, забезпечуючи середньорічний приріст виробітку електроенергії на рівні +30%...+50% порівняно зі статичними аналогами. У поєднанні з новітніми двосторонніми модулями (Bifacial) цей показник може досягати рекордних 60–70% за рахунок ефективного уловлювання відбитого світла (альbedo) піднятим над землею рухомим столом.

Основним стримуючим фактором двохосьових систем є висока апаратна складність і вартість. Кожна щогла трекера вимагає індивідуального обчислювального мікроконтролера, чутливих оптичних сенсорів LDR, кінцевих вимикачів, поворотних кругів та лінійних актуаторів. Крім того, велика парусність рухомого масиву створює критичні аеродинамічні ризики, що вимагає обов'язкової інтеграції в САР високошвидкісного контуру аварійного паркування за сигналами анемометра при штормовому вітрі.

1.5. Розробка та обґрунтування технічних вимог до проєктованої системи

Згідно з чинним в Україні профільним стандартом ДСТУ EN 62817:2017, технічні вимоги до двохосьових сонячних трекерів поділяються на чотири взаємопов'язані категорії.

Вимоги до точності та динамічних характеристик позиціонування

Статична похибка наведення: Допустиме кутове розузгодження між вектором нормалі до фронтальної площини фотомодуля та вектором на центр сонячного диска має становити не більше $\pm 1.0^\circ \dots 1.5^\circ$. Такий допуск утримує втрати менше 0.4% і водночас запобігає виникненню ефекту «полювання» приводів (хаотичних реверсивних пусків двигунів через дрібні шуми сенсорів чи рух хмар).

Діапазони кутового переміщення просторових осей:

За азимутальною віссю (вісь X, хід Схід - Захід): від 0° до 180° (із конструктивним апаратним запасом до 200° для повноцінного уловлювання променів під час тривалих літніх днів).

За зенітною віссю (вісь Y, кут піднесення столу над горизонтом): від 0° (суворо горизонтальний стан столу) до 80° відносно лінії горизонту.

Швидкісні характеристики виконавчих механізмів: оскільки сонце змінює просторові координати вкрай повільно, швидкість приводів в автоматичному режимі стеження може бути мінімальною - в межах $0.1^\circ \dots 0.5^\circ/\text{сек}$. Проте для аварійного контуру захисту висувається жорстка вимога щодо швидкодії: час повного переведення столу трекера з будь-якого поточного кута в безпечне

горизонтальне положення при штормовому попередженні повинен становити не більше 60 секунд.

Вимоги до технологічних режимів та алгоритмічного забезпечення.

Програмне забезпечення центрального мікропроцесорного контролера повинно апаратно та алгоритмічно підтримувати такі режими функціонування фотоелектричної установки:

Гібридний режим стеження (Основний робочий режим): Автоматичний перехід САР з активного контуру (орієнтація за диференціальним сигналом чотириквadrантного оптичного датчика LDR при прямій інсоляції) на пасивний хронометричний канал (розрахунок сонячних координат за астрономічним алгоритмом SPA з використанням модуля точного часу RTC та GPS-даних) у моменти щільної хмарності або затінення.

Режим зворотного відстеження (Backtracking): Розрахунок та оптимізація кутів нахилу в ранкові та вечірні години для повного виключення взаємного геометричного затінення сусідніх столів сонячної станції, розташованих в одному ряду фотоелектричного поля.

Аварійний режим вітрового та снігового захисту: Пріоритетне апаратне переривання основного алгоритму. При отриманні сигналів від анеометра про швидкість повітряного потоку понад 15м/с, САР зобов'язана примусово зафіксувати стіл у горизонтальному положенні, кут нахилу 0°. При виявленні критичного затінення взимку— переведення у максимальний кут 80° для самоскидання снігу.

Нічне паркування: Автоматичне повернення конструкції у вихідне східне положення після заходу сонця для очікування нового світлового дня та переведення обчислювального ядра контролера в режим глибокого сну з метою енергозбереження.

Кліматичні вимоги та конструктивне виконання САР

Клас захисту оболонки (International Protection): Оскільки елементи системи працюють у відкритих польових умовах, корпус центральної шафи керування, блоки датчиків освітленості та комутаційні вузли повинні мати клас захисту не нижче IP65 (повна герметичність від пилу та захист від водяних струменів). Для

виконавчих лінійних актуаторів та редукторів приводів обов'язковим є клас захисту не нижче IP66.

Температурний діапазон: Усі вибрані технічні засоби автоматизації (ТЗА) повинні стабільно функціонувати в межах різко континентальних температурних коливань України: від -30° до $+65^{\circ}$

Вимога самоблокування: механічні передачі приводів осей обов'язково повинні володіти ефектом самогальмування, щоб надійно утримувати масив сонячних панелей під дією зовнішніх вітрових навантажень без постійної подачі напруги на обмотки електродвигунів.

Електричні вимоги та критерії енергоефективності

Власне енергоспоживання системи: сумарні витрати електричної енергії на постійне живлення мікроконтролера, логічної частини датчиків та короткочасну періодичну роботу виконавчих двигунів орієнтації не повинні перевищувати 2%-3% від генерації

2. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ, СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ СИСТЕМИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Розробка та обґрунтування функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації призначена для відображення складу автоматизованої системи, взаємозв'язків між її основними елементами та напрямків передавання інформаційних і керуючих сигналів.

Основним об'єктом керування є фотоелектрична панель, встановлена на двоосьовому опорно-поворотному механізмі. Система забезпечує зміну положення панелі за двома координатами: за кутом нахилу та за азимутальним поворотом. Завдяки цьому панель може змінювати своє положення відповідно до напрямку сонячного випромінювання, що дозволяє підвищити ефективність фотоелектричного перетворення.

На функціональній схемі автоматизації показано основні елементи системи: датчики освітленості QE1-1...QE1-4, анемометр SE2-1, кінцеві вимикачі SQ1–SQ4, мікропроцесорний контролер, привід кута нахилу M1 та привід азимутального повороту M2. Взаємодія цих елементів забезпечує автоматичне

визначення напрямку найбільшої освітленості, формування керуючих сигналів і переміщення панелі у потрібне положення.

Датчики освітленості QE1-1...QE1-4 використовуються для визначення напрямку сонячного випромінювання. Вони розміщуються таким чином, щоб можна було порівнювати рівень освітленості у різних зонах сенсорного вузла. При правильній орієнтації панелі сигнали від датчиків мають приблизно однакові значення. Якщо панель відхиляється від напрямку на сонце, частина датчиків освітлюється сильніше, а інша частина — слабше. За цією різницею мікропроцесорний контролер визначає необхідний напрямок повороту.

Сигнали від датчиків освітленості надходять на аналогові входи мікропроцесорного контролера. Оскільки фоторезистор змінює свій електричний опір залежно від рівня освітленості, для отримання вимірювального сигналу використовується схема дільника напруги. На виході такого дільника формується аналогова напруга, яка подається на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Після перетворення в цифрову форму значення освітленості використовуються в алгоритмі керування.

Для визначення необхідного переміщення панелі мікропроцесорний контролер порівнює середні значення сигналів від відповідних груп датчиків. Для керування кутом нахилу порівнюються сигнали від верхньої та нижньої груп датчиків. Для керування азимутальним поворотом порівнюються сигнали від лівої та правої груп датчиків. Якщо різниця сигналів перевищує встановлений поріг, контролер формує команду на переміщення панелі у відповідному напрямку.

У системі передбачається використання зони нечутливості. Це необхідно для того, щоб виконавчі механізми не вмикалися при незначних змінах освітленості, які можуть бути спричинені шумами датчиків, короткочасною хмарністю або випадковими перешкодами. Якщо різниця між сигналами датчиків не перевищує заданого значення, система не виконує переміщення. Такий підхід дозволяє зменшити кількість зайвих спрацьовувань приводів, знизити енергоспоживання та зменшити механічний ізнос елементів системи.

Для переміщення фотоелектричної панелі у схемі передбачено два виконавчі механізми. Привід M1 забезпечує зміну кута нахилу панелі, тобто її переміщення у вертикальній площині. Привід M2 забезпечує азимутальний поворот панелі, тобто її переміщення у горизонтальній площині. Завдяки використанню двох незалежних приводів система може реалізувати двоосьове орієнтування панелі відносно сонця.

Керуючі сигнали від мікропроцесорного контролера надходять на виконавчі механізми через відповідні вихідні канали.

Для захисту механічної частини системи на функціональній схемі передбачено кінцеві вимикачі SQ1-SQ4. Кінцеві вимикачі SQ1 і SQ2 обмежують переміщення панелі за віссю кута нахилу, а SQ3 і SQ4 - за віссю азимутального повороту. Їх сигнали надходять на дискретні входи мікропроцесорного контролера. У разі досягнення граничного положення відповідний кінцевий вимикач спрацьовує, після чого контролер блокує подальший рух у цьому напрямку.

Важливим елементом системи є анемометр SE2-1, який використовується для контролю швидкості вітру. Фотоелектрична панель має значну площу, тому під дією сильного вітру на неї можуть виникати значні механічні навантаження. Якщо швидкість вітру перевищує допустиме значення, сигнал від анемометра надходить до мікропроцесорного контролера, після чого система переходить в аварійний режим. У цьому режимі звичайне стеження за сонцем припиняється, а панель переводиться у безпечне положення паркування.

Мікропроцесорний контролер є центральним елементом функціональної схеми. Він виконує зчитування аналогових і дискретних сигналів, обробку інформації, реалізацію алгоритму орієнтації, контроль граничних положень і формування керуючих впливів для приводів. До аналогових входів контролера підключаються датчики освітленості, до дискретних входів — кінцеві вимикачі та сигнал аварійного захисту, а вихідні канали використовуються для керування приводами M1 і M2.

Функціонування системи відбувається циклічно. Після ввімкнення живлення мікропроцесорний контролер виконує початкову ініціалізацію,

перевіряє стан датчиків і переходить у режим автоматичного стеження. Далі контролер зчитує сигнали з датчиків освітленості, порівнює їх між собою, визначає напрямок відхилення панелі та формує керуючі сигнали для відповідного приводу. Після переміщення панелі цикл вимірювання і регулювання повторюється.

У нічний час або при недостатньому рівні освітленості активне стеження може бути припинено, а панель переведена у початкове положення для очікування сходу сонця. Повна функціональна схема на аркуші формату А3 та наведена у Додатку Б

2.2. Вибір та інженерне обґрунтування технічних засобів автоматизації

2.2.1. Вибір вимірювальних перетворювачів: датчиків освітленості, положення, кінцевих вимикачів та анемометра

Вимірювальні перетворювачі є важливою частиною автоматизованої системи орієнтації фотоелектричної панелі, оскільки саме вони забезпечують отримання інформації про зовнішні умови та стан механічної частини системи. У проєктованій системі вимірювальні перетворювачі використовуються для визначення напрямку найбільшої освітленості, контролю граничних положень механізму та реалізації аварійного захисту при сильному вітрі.

Відповідно до функціональної схеми автоматизації до складу вимірювальної частини системи входять датчики освітленості QE1-1...QE1-4, кінцеві вимикачі SQ1-SQ4 та анемометр SE2-1. Сигнали від цих елементів надходять до мікропроцесорного контролера, де обробляються відповідно до алгоритму керування.

Вибір датчиків освітленості

Для визначення напрямку сонячного випромінювання у системі обрано фоторезистори типу GL5528. Фоторезистор є напівпровідниковим елементом, електричний опір якого змінюється залежно від рівня освітленості. При збільшенні інтенсивності світлового потоку опір фоторезистора зменшується, а при зменшенні освітленості-збільшується. Така властивість дозволяє використовувати фоторезистори як прості та доступні датчики освітленості.



Рис.2.1 Фоторезистор GL5528

У системі передбачено використання чотирьох датчиків освітленості, які позначаються як QE1-1, QE1-2, QE1-3 та QE1-4. Вони розміщуються на сенсорному вузлі таким чином, щоб можна було порівнювати освітленість у верхній, нижній, лівій та правій частинах відносно нормалі до поверхні панелі. Між датчиками доцільно встановити невелику непрозору перегородку. Якщо панель спрямована точно на Сонце, усі датчики отримують приблизно однакову кількість світла. Якщо панель відхиляється від оптимального положення, частина датчиків потрапляє в тінь, а інша освітлюється сильніше. За цією різницею мікроконтролер визначає напрямок корекції положення панелі.

Фоторезистор безпосередньо змінює опір, а мікроконтролер вимірює напругу. Тому для підключення кожного датчика освітленості використовується схема дільника напруги.

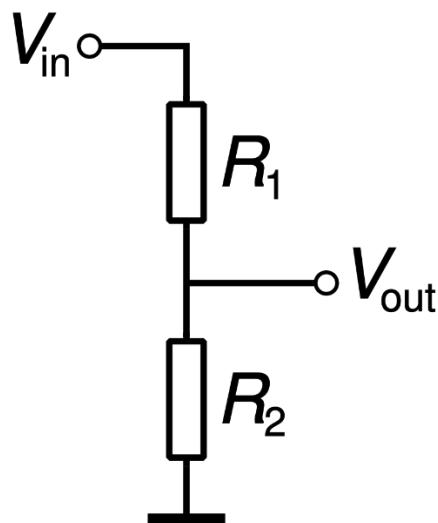


Рис.2.2 Дільник напруги на резисторах

Зміна опору фоторезистора призводить до зміни вихідної напруги дільника, яка подається на аналоговий вхід мікроконтролера.

Вихідна напруга діляника може бути визначена за формулою:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{фр}} + R_{\text{ст}}}$$

де:

$R_1=R_{\text{фр}}$ — фоторезистор;

$R_2=R_{\text{ст}}$ — сталий резистор 10 кОм;

$V_{\text{in}}=U_{\text{ж}}$;

$V_{\text{out}}=U_{\text{вих}}$

Розрахунок значень для різних умов освітленості

Підставимо наші значення для трьох основних станів:

Яскраве пряме сонце ($R_{\text{фр}}$ 1 кОм):

$$U_{\text{вих}} = 5\text{В} \cdot \frac{10 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм}} = 4,55 \text{ В}$$

Хмарна погода / Розсіяне світло ($R_{\text{фр}}$ 10 кОм)

$$U_{\text{вих}} = 5\text{В} \cdot \frac{10 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм}} = 2,5 \text{ В}$$

Сутінки / Тінь ($R_{\text{фр}}$ 100 кОм)

$$U_{\text{вих}} = 5\text{В} \cdot \frac{10 \text{ кОм}}{100 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм}} = 0,45$$

Аналіз точності та роздільної здатності

Крок квантування напруги для Arduino UNO становить:

$$U = \frac{5}{1024} = 4,88 \text{ мВ}$$

Вибір датчиків граничного положення

Для захисту механічної частини системи від виходу за допустимі межі переміщення використовуються кінцеві вимикачі SQ1–SQ4. Вони призначені для контролю крайніх положень рухомих частин трека та формування дискретного сигналу при досягненні заданої межі.

Кінцеві вимикачі SQ1 і SQ2 використовуються для контролю осі кута нахилу панелі. Вони обмежують мінімальне та максимальне положення панелі у вертикальній площині. Кінцеві вимикачі SQ3 і SQ4 використовуються для контролю азимутальної осі повороту та обмежують поворот панелі вліво і вправо. У разі спрацювання будь-якого з кінцевих вимикачів відповідний сигнал

надходить на дискретний вхід мікропроцесорного контролера, після чого подальший рух у цьому напрямку блокується.

Кінцеві вимикачі належать до дискретних датчиків, оскільки мають два стани: замкнений або розімкнений контакт. На функціональній схемі їх сигнали відносяться до групи DI. Для використання потрібно обрати механічні кінцеві вимикачі з роликовим важелем.

Використання кінцевих вимикачів є обов'язковим для системи орієнтації, оскільки воно підвищує безпеку роботи механізму, захищає кабелі від перекручування, запобігає перевантаженню приводів і зменшує ризик механічного пошкодження конструкції.

Вибір датчика швидкості вітру

Оскільки фотоелектрична панель має значну площу, під дією сильного вітру на неї можуть виникати суттєві механічні навантаження. Для контролю вітрових умов у системі передбачено використання анемометра SE2-1. Анемометр призначений для вимірювання швидкості повітряного потоку та формування сигналу, який використовується мікроконтролером для аварійного режиму захисту.

При нормальних погодних умовах система працює в режимі автоматичного стеження за сонцем. Якщо швидкість вітру перевищує допустиме значення, мікропроцесорний контролер повинен припинити звичайний алгоритм орієнтації та перевести панель у безпечне положення паркування. Таке положення вибирається так, щоб зменшити вітрове навантаження на поверхню панелі, раму, опору та виконавчі механізми.

Анемометри можуть мати різні типи вихідного сигналу. У простих системах можуть використовуватися анемометри з імпульсним виходом, частота імпульсів якого пропорційна швидкості вітру. У такому випадку сигнал підключається до дискретного або імпульсного входу мікроконтролера. Також можуть використовуватися анемометри з аналоговим виходом, напруга якого змінюється залежно від швидкості вітру. У цьому випадку сигнал подається на аналоговий вхід.

Для даної системи доцільно використовувати анемометр із простим вихідним сигналом, який може бути оброблений мікроконтролером без складних додаткових перетворювачів. У функціональній схемі анемометр SE2-1 використовується як елемент аварійного захисту. Його сигнал може бути віднесений до групи DI, якщо використовується пороговий або імпульсний вихід, або до групи AI, якщо використовується аналоговий вихід.



Рис.2.3 Датчик швидкості вітру-анемометр.

Вибір датчика положення

Для підвищення точності роботи системи можуть використовуватися датчики положення, які забезпечують зворотний зв'язок за фактичним кутом повороту механізму. До таких датчиків належать енкодери, потенціометричні датчики положення або інклінометри.

Для більш потужної системи з мотор-редукторами або лінійними актуаторами застосування датчика положення є доцільним. Він дозволяє контролеру порівнювати задане і фактичне положення панелі та точніше виконувати позиціонування.

Для контролю кута нахилу панелі може використовуватися інклінометр, який вимірює нахил конструкції відносно горизонту. Для контролю азимутального повороту може застосовуватися енкодер, встановлений на валу або поворотному механізмі. У спрощеній версії системи контроль положення забезпечується програмними обмеженнями кутів і кінцевими вимикачами.

2.2.2. Вибір виконавчих механізмів та драйверів керування

Виконавчі механізми (актуатори) є силовими ланками системи автоматичного регулювання положення фотоелектричної панелі. Вони

призначені для безпосереднього перетворення електричної енергії керуючих сигналів у механічне просторове переміщення опорно-поворотної конструкції трекера за двома незалежними кутовими координатами: азимутом (вісь X) та зенітом (вісь Y).

Особливістю функціонування приводної частини двоосьового сонячного трекера є необхідність подолання значних статичних та динамічних навантажень. Оскільки масив фотоелектричних модулів має значну площу, під дією вітру виникає критичний перекидаючий момент (ефект парусності). Відповідно, до виконавчих механізмів висуваються жорсткі інженерні вимоги: високий крутний момент, мінімальний люфт механічних передач для запобігання похибок позиціонування, стійкість до різких температурних коливань та наявність функції самоблокування столу у статичному стані.

Враховуючи комбінований характер випускної роботи (теоретичне проектування промислової СЕС та практична реалізація лабораторного макета), технічні засоби приводного рівня обрано для двох відповідних масштабів:

Промисловий рівень реалізації системи:

Привід азимутального повороту (горизонтальна вісь): Для плавного обертання важкої щогли з масивом панелей навколо вертикальної осі обрано інтегрований опорно-поворотний пристрій (Slewing Drive) на базі безщіткового електродвигуна постійного струму (BLDC) з черв'ячним редуктором. Черв'ячна передача забезпечує колосальне збільшення крутного моменту та має природну властивість самогальмування, що виключає самовільний поворот трекера під дією шквального вітру.

Привід зенітного нахилу (вертикальна вісь кута піднесення): Для зміни кута нахилу відносно лінії горизонту обрано промисловий електричний лінійний актуатор (наприклад, серії AK-SY-A04B-F3-12V). Він перетворює обертальний рух двигуна у лінійне висування штока за допомогою гвинтової передачі Асте. Головна перевага лінійного актуатора — здатність надійно утримувати заданий кут нахилу під тиском вітру та снігу без постійного споживання електричної енергії котушками двигуна у стані спокою, що суттєво підвищує загальний ККД установки.



Рис.2.4 Електричний лінійний актуатор серії AK-SY-A04B-F3-12V.

Лабораторно-експериментальний рівень (діючий прототип): Для реалізації діючого фізичного макета трекара, що моделює логіку керування в середовищі Tinkercad та на базі контролера Arduino Uno, використання важких промислових приводів є недоцільним. Тому для відтворення двох ступенів свободи макета обрано позиційні мікросервоприводи типу SG90.

Серводвигуни працюють за принципом замкнутого контуру, оскільки мають вбудований потенціометр зворотного зв'язку та внутрішню плату керування (міні-драйвер). Це дозволяє мікроконтролеру Arduino UNO за допомогою стандартних ШІМ-сигналів (із тривалістю імпульсу від 1 до 2 мс) задавати точний кут повороту вихідного вала в діапазоні від 0° до 180° з прецизійною точністю.

Обґрунтування вибору драйверів керування:

Оскільки мікроконтролер є слабострумним пристроєм (максимальний струм з одного цифрового виходу Arduino Uno обмежений величиною 40 мА), безпосереднє живлення силових обмоток двигунів від логічних пінів є неможливим через ризик теплового руйнування кристала мікросхеми.

Для узгодження інформаційних сигналів обчислювального ядра з силовими виконавчими механізмами використовуються спеціалізовані драйвери (комутатори сильних струмів):

У лабораторному макеті плата сервоприводу SG90 вже інтегрована в корпус самого двигуна. Вона отримує високоомний керуючий ШІМ-сигнал з пінів Arduino (D2 - для горизонтального, D13 - для вертикального сервоприводу) , а

силове живлення (+5V та GND) подається від зовнішнього стабілізованого джерела постійного струму.

У промисловому варіанті системи керування використовуються силові Н-мости (транзисторні реверсивні драйвери) або блоки силових реле, які керуються логічними рівнями МК через оптопарі гальванічної розв'язки, забезпечуючи повний захист низьковольтної автоматики від імпульсних перенапруг та струмів самоіндукції електродвигунів.

Таблицю 2.1

**Технічні параметри обраних для лабораторного прототипу
виконавчих механізмів.**

Параметр виконавчого механізму	Технічне значення для сервоприводу SG90
Номінальна робоча напруга живлення	4,8 — 6,0 В постійного струму (DC)
Крутний момент на валу (при 4,8 В)	1,8 кг·см
Швидкість повороту вала (без навантаження)	0,12 сек / 60°
Матеріал редуктора (шестерень)	Зносостійкий нейлон / пластик
Тип сигналу керування положенням	Широтно-імпульсна модуляція (ШИМ / PWM)
Максимальний кут повороту осі	180° (фізичне обмеження ходу)
Робочий діапазон температур модуля	від 0°C до +55°C

2.2.3. Вибір мікропроцесорного контролера

Мікропроцесорний контролер є центральним обчислювальним, керуючим та координаційним ядром інформаційно-керуючої системи сонячного трекера. На цей пристрій покладаються завдання циклічного збору та первинної обробки інформації з первинних вимірювальних перетворювачів, математичного розрахунку похибки розузгодження осей, апаратної реалізації законів автоматичного регулювання, формування сигналів керування силовими

драйверами виконавчих механізмів, а також обробки сигналів аварійного захисту та обмеження ходу.

Для обґрунтування вибору оптимальної обчислювальної платформи було проведено детальний порівняльний аналіз трьох найбільш поширених у сучасній практиці проектування САК мікроконтролерів: Arduino Uno (на базі мікросхеми ATmega328P), ESP32 та STM32 (на базі архітектури ARM Cortex-M).

Таблиці 2.2.

Порівняльні техніко-економічні характеристики зазначених платформ.

Технічна характеристика	Платформа Arduino Uno	Платформа ESP32	Платформа STM32
Архітектура обчислювального ядра	8-біт RISC (AVR)	32-біт Dual-Core (Xtensa)	32-біт ARM Cortex
Номінальна тактова частота	16 МГц	240 МГц	72 МГц
Об'єм інтегрованої Flash-пам'яті	32 КБ	4 МБ	64 – 128 КБ
Роздільна здатність модуля АЦП	10-біт (1024 рівні)	12-біт (4096 рівнів)	12-біт (4096 рівнів)
Робоча напруга логічних рівнів	5,0 В	3,3 В	3,3 В (5V tolerant)
Вбудовані бездротові інтерфейси	Відсутні	Wi-Fi + Bluetooth	Відсутні
Апаратні ШІМ-канали (PWM)	6 каналів	16 каналів	До 14 каналів
Складність програмної реалізації	Дуже низька	Середня	Висока

Детальний аналіз наведених варіантів дозволяє зробити такі висновки щодо їх застосування у межах проекту:

Arduino Uno (ATmega328P). Головною перевагою даної платформи є використання 5-вольтової логіки, що забезпечує пряме апаратне узгодження з більшістю стандартних напівпровідникових фоторезисторів GL5528 та силовими входами керування сервоприводів без застосування додаткових двоспрямованих перетворювачів логічних рівнів. Вбудований 10-бітний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) забезпечує дискретизацію вхідної аналогової напруги на 1024 рівні, що при опорній напрузі 5 В гарантує крок квантування на рівні $U = 4,88$ мВ. Дана роздільна здатність є цілком достатньою

для високоточного визначення різниці освітленості за наявності зони толерантності (нечутливості) алгоритму. Крім того, наявність розвиненого програмного інструментарію та стандартної бібліотеки Servo.h суттєво спрощує оптимізацію коду керування двома просторовими осями трекера.

ESP32. Завдяки високій тактовій частоті (240 МГц) та архітектурі Dual-Core, дана платформа дозволяє ефективно розділяти обчислювальні потоки (наприклад, паралельно виконувати ресурсомісткі тригонометричні розрахунки астрономічних координат Сонця SPA та опитувати високошвидкісні датчики захисту). Вбудований модуль Wi-Fi уможливлює точну синхронізацію часу за протоколом NTP (Network Time Protocol) для реалізації пасивних алгоритмів орієнтації. Однак робоча напруга логіки 3,3 В накладає додаткові конструктивні обмеження при підключенні 5-вольтових виконавчих механізмів та оптичних кіл.

STM32. Платформа промислового класу, яка характеризується високою надійністю, розвиненою системою апаратних таймерів та великою кількістю каналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що критично для прецизійного керування кроковими двигунами або мотор-редукторами великої потужності в індустріальних системах орієнтації. Проте розробка та відлагодження програмного забезпечення для даної архітектури потребує значних часових та кваліфікаційних ресурсів.

Обґрунтування інженерного вибору. Враховуючи двокомпонентну специфіку даної кваліфікаційної роботи, яка поєднує теоретичне проектування повномасштабного промислового трекера з лінійними актуаторами, кінцевими вимикачами та анемометром, та практичне створення діючого експериментального лабораторного макета для верифікації керуючої логіки, було прийнято комбіноване рішення.

2.2.4. Вибір елементів живлення, захисту та індикації

Для забезпечення надійної, безперебійної та завадостійкої роботи системи автоматичного керування (САК) сонячного трекера критично важливим є правильний вибір засобів електроживлення, елементів апаратного захисту, а також засобів візуалізації поточного стану системи. Особливістю проектування

даного вузла є жорстке просторове та схемотехнічне розділення силових ланцюгів приводу та низьковольтних кіл живлення мікропроцесорної логіки з метою мінімізації впливу комутаційних та імпульсних завад.

Обґрунтування та вибір елементів живлення електроживлення елементів системи організовано за дворівневою структурою (для експериментального лабораторного прототипу та повномасштабного промислового зразка трекера):

- **Лабораторно-експериментальний рівень:** Мікроконтролер Arduino Uno R3 має вбудований лінійний стабілізатор напруги, що дозволяє живити його через роз'єм DC напругою 7–12 В або безпосередньо через інтерфейс USB (5 В). Проте підключення виконавчих мікросервоприводів SG90 безпосередньо до 5-вольтового виходу плати Arduino є грубою помилкою. У моменти пуску, реверсу або механічного блокування вала струм споживання одного сервоприводу може короткочасно досягати 500–800 мА. Це призводить до критичного просідання напруги живлення обчислювального ядра мікросхеми і, як наслідок, до хаотичного перезавантаження мікроконтролера за сигналом вбудованого таймера скидання. Для усунення цього явища в лабораторному макеті передбачено виділене зовнішнє стабілізоване джерело живлення постійного струму з вихідною напругою 5 В та номінальним струмом не менше 2 А. Від нього паралельно живляться силові лінії серводвигунів, тоді як шина заземлення (GND) цього джерела обов'язково об'єднується із землею Arduino для вирівнювання потенціалів.

- **Промисловий рівень реалізації:** Враховуючи вибір лінійного актуатора вертикальної осі моделі AK-SY-A04B-F3-12V, базова робоча напруга силової частини шафи автоматизації становить 12 В постійного струму (DC). Для побудови системи електроживлення промислового трекера обрано імпульсний блок живлення промислового класу (серії Mean Well) з вихідними параметрами 12 В та потужністю 100 Вт, що забезпечує надійний струмовий запас при максимальному зусиллі висування штока актуатора (до 3–4 А під піковим навантаженням).



Рис.2.4 блок живлення MW-LRS-100

Для живлення низьковольтної мікропроцесорної частини застосовано високоефективний понижуючий DC-DC перетворювач на базі інтегральної мікросхеми LM2596S (імпульсний крок-даун стабілізатор). Його ККД досягає 92%, що повністю виключає надмірне тепловиділення всередині герметичного корпусу шафи керування і забезпечує стабільні 5 В для МК.

Вибір елементів апаратного захисту та фільтрації завад для захисту напівпровідникових структур мікроконтролера та чутливих аналогових датчиків від руйнівних чинників відкритого фотоелектричного поля та комутаційних сплесків впроваджено такі технічні рішення:

- Гальванічна розв'язка силових кіл: керування актуатором АК-SY-A04B-F3-12V здійснюється через силове реле або транзисторний Н-міст(це електронна схема, яка дозволяє керувати напрямком обертання (реверсом) двигунів постійного струму та змінювати полярність живлення навантаження.). Інформаційні цифрові канали МК з'єднані з силовими ключами виключно через оптичні транзисторні пари (оптопари класу PC817). Це повністю виключає прямий електричний зв'язок між обчислювальною шиною та силовими лініями, захищаючи МК від наведень та пробойів.

- Захист від струмів самоіндукції: Оскільки двигун актуатора є потужним індуктивним навантаженням, у момент розмикання керуючих контактів виникає високовольтний зворотний сплеск ЕРС самоіндукції, який здатний пропалити

вихідні транзистори драйвера. Для шунтування цих сплесків паралельно обмоткам двигунів встановлюються швидкісні захисні діоди серії 1N4007 (або ультрашвидкі UF4007) у зворотному включенні.

- Плавкі запобіжники: Для захисту від коротких замикань (КЗ) та струмів перевантаження у силових лініях актуатора встановлено швидкісний плавкий запобіжник номіналом 5 А. Ланцюг живлення мікроконтролера захищено індивідуальним самовідновлюваним запобіжником на 500 мА.

- Фільтрація високочастотних завад: Безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера та вимірювальних дільників фоторезисторів GL5528 встановлюються керамічні блокуючі конденсатори ємністю 0.1 мкФ (для згладжування ВЧ-завад) та електролітичні конденсатори великої ємності (470–1000 мкФ) для компенсації низькочастотних коливань напруги при пуску приводів.

Вибір елементів індикації поточного стану для локального моніторингу роботи сонячного трекера, відображення вимірювальних параметрів під час пусконаладжувальних робіт та візуального контролю режимів безпеки обрано рідкокристалічний алфавітно-цифровий дисплей типу LCD 1602 (2 рядки по 16 символів) з інтегрованим дочірнім модулем перетворювача інтерфейсів на базі мікросхеми PCF8574.

Використання модуля PCF8574 дозволяє підключити дисплей до мікроконтролера за послідовною двопровідною шиною інтерфейсу I2C (використовуються лише два логічні піни Arduino Uno R3: A4/SDA та A5/SCL). Це є важливою перевагою, оскільки стандартне паралельне 4-бітне підключення LCD-дисплея потребує мінімум 6 цифрових виводів мікроконтролера. Вивільнення цих пінів дозволяє зберегти апаратні ресурси плати Arduino для підключення кінцевих вимикачів SQ1–SQ4 та анемометра.

Згідно з розробленою структурою інтерфейсу користувача, на екран LCD 1602 циклічно виводяться такі технологічні параметри:

1. Поточний режим роботи системи.
2. Фактичні кути просторової орієнтації рухомого столу трекера.

3. Диференціальний сигнал (U) між парами фоторезисторів для візуальної оцінки точності наведення на сонце.

Таблицю 2.3.

Технічні характеристики засобів індикації, захисту та живлення

Найменування компонента САК	Конкретна марка / Модель	Ключові технічні параметри
Понижуючий DC-DC перетворювач	Модуль на базі LM2596S DC-DC	Вхідна напруга: 4.5–40 В; Вихідна напруга: 1.23–37 В (налагоджувана); Макс. струм: 3 А; Частота перемикання: 150 кГц.
Оптичний ізолятор (оптопара)	PC817 (Sharp)	Напруга ізоляції: 5000 В (RMS); Макс. струм колектора: 50 мА; Тип корпусу: DIP-4.
Захисний діод котушок приводу	1N4007	Макс. зворотна напруга: 1000 В; Номінальний прямий струм: 1.0 А; Тип монтажу: DO-41.
Рідкокристалічний дисплей	LCD 1602 + PCF8574 I2C	Символьна матриця: 16×2; Напруга живлення: 5.0 В; Інтерфейс: I2C (базова адреса 0x27 або 0x3F); Підсвітка: LED.

2.3. Розробка структурної схеми інформаційно-керуючої системи

Структурна схема автоматизованої системи керування просторовим позиціонуванням сонячної фотоелектричної панелі відображає архітектуру побудови системи, її компонентний склад, ієрархічні рівні обробки інформації, а також характер і напрямки технологічних зв'язків та інформаційних потоків між окремими функціональними блоками. Розробка структурної схеми є етапом, який дозволяє інтегрувати раніше обрані технічні засоби вимірювального, обчислювального та приводного рівнів у єдиний замкнутий завадостійкий контур автоматичного регулювання.

Інформаційно-керуюча система двоосьового сонячного трекера спроектована за чотирирівневою ієрархічною структурою, яка забезпечує надійне розділення слабострумних інформаційних шин від силових кіл електроживлення. Детальний опис функціонування рівнів розробленої структурної схеми наведено нижче:

1. Сенсорний рівень (Блок збору інформації та первинних перетворювачів)
Цей рівень відповідає за безперервне отримання фізичних параметрів

навколишнього середовища й поточного стану металоконструкції трекера з їх наступним перетворенням в електричні сигнали:

- Блок диференціальних фотоприймачів (QE1-1...QE1-4): складається з чотирьох напівпровідникових фоторезисторів серії GL5528, підключених за схемою резистивних дільників напруги. Вони формують чотири аналогові сигнали напруги ($U_{V1} \dots U_{V4}$), величини яких пропорційні локальній освітленості відповідних квадрантів сенсорного вузла.

- Метеорологічний контур безпеки (анемометр SE2-1): здійснює безперервний моніторинг швидкості вітрового потоку у зоні експлуатації СЕС. Перетворювач формує частотно-імпульсний або аналоговий сигнал, що передає поточне значення швидкості вітру на контролер для захисту від ефекту парусності.

- Контур апаратного обмеження ходу (кінцеві вимикачі SQ1–SQ4): сухі контакти вимикачів інтегруються безпосередньо у крайніх геометричних точках осей зеніту та азимуту. Вони генерують дискретні логічні сигнали (0 або 1) при фізичному досягненні рамою граничних кутів повороту, для запобігання пошкодженню лінійного актуатора та обриву кабельних ліній.

- Блок хронометричної синхронізації: включає апаратний модуль годинника реального часу RTC (на базі мікросхеми DS3231), який передає дані про поточний час і календарну дату для функціонування розімкнутого (пасивного) контуру стеження за астрономічним алгоритмом SPA.

2. Обчислювальний рівень (Мікропроцесорний пристрій обробки даних)
Центральним ядром обчислювального рівня структурної схеми є мікроконтролерна платформа Arduino Uno R3 (на базі 8-бітного RISC-процесора ATmega328P). На цьому рівні здійснюються такі послідовні операції:

- Аналогово-цифрове перетворення (АЦП): вхідні аналогові сигнали від дільників фоторезисторів та анемометра зчитуються через порти A0–A3 і квантуються з точністю 10 біт (крок квантування 4,88 мВ), трансформуючись у цифрові коди.

- Реалізація логіко-алгоритмічної структури: мікроконтролер виконує математичне порівняння зчитаних значень від лівої/правої та верхньої/нижньої

груп датчиків. За умови, що похибка розузгодження (U) перевищує встановлену програмну зону толерантності (нечутливості), обчислювальне ядро розраховує тривалість та напрямок керуючого впливу.

- Обробка пріоритетів безпеки: у разі надходження сигналу КЗ від кінцевих вимикачів або перевищення порогу швидкості вітру від анемометра (понад 15 м/с), контролер примусово перериває виконання основного циклу орієнтації та переходить до алгоритму аварійного паркування.

3. Привідний рівень (Узгоджувальні драйвери та виконавчі механізми) Цей рівень призначений для масштабування низьковольтних логічних сигналів мікроконтролера у потужні електричні струми, необхідні для подолання статичних та динамічних моментів опору опорно-поворотної щогли:

- Модулі гальванічної розв'язки та комутації (драйвери): сигнальні лінії цифрових портів МК (піни D2 та D13) з'єднуються з силовими ключами виключно через опtotранзисторні пари PC817. Силові Н-мости (або релейні блоки) здійснюють комутацію струму живлення приводів.

- Канал регулювання зеніту (вертикальна вісь нахилу): виконавча команда подається на електродвигун постійного струму лінійного актуатора моделі АК-SY-A04B-F3-12V. Висування або втягування штока актуатора змінює кут піднесення сонячної панелі від 0° до 80° відносно лінії горизонту.

- Канал регулювання азимуту (горизонтальна вісь повороту): у лабораторному макеті рух моделюється позиційним мікросервоприводом SG90 (під керуванням ШІМ-сигналів), а в промисловому варіанті — потужним мотор-редуктором черв'ячного типу з високим моментом самоблокування.

4. Рівень людино-машинного інтерфейсу (НМІ) та візуалізації Рівень призначений для оперативного візуального контролю технологічних параметрів трека обслуговуючим персоналом СЕС безпосередньо біля шафи автоматизації. До його складу входить буквено-цифровий рідкокристалічний дисплей типу LCD 1602. Схемотехнічна інтеграція дисплея в структурну схему виконана через 8-бітний розширювач портів PCF8574. Це дозволяє організувати обмін даними за послідовним двопровідним інтерфейсом шини I2C, суттєво

заощаджуючи цифрові виводи мікроконтролера Arduino для вимірювальних завдань контуру безпеки.



Рис.2.5 Структурна схема.

2.4. Розробка принципової електричної схеми модуля керування та силової частини

Принципова електрична схема є основним конструкторським документом інформаційно-керуючої системи автоматизації, який визначає повний компонентний склад електричних елементів, їхні номінальні параметри, типи корпусів, а також усі фізичні, силові та інформаційні зв'язки між ними. Повна принципова електрична схема модуля керування та силової частини двоосьового сонячного трекера розроблена відповідно до вимог стандартів Єдиної системи конструкторської документації (ЕСКД) на аркуші формату А3 та наведена у **Додатку Б** цієї кваліфікаційної роботи.

У даному підрозділі наведено детальний схемотехнічний опис функціональних контурів та міжмодульних з'єднань, що формують замкнуту систему автоматичного регулювання положення фотоелектричної панелі.

1. Аналоговий вимірювальний контур фотоприймачів

Для реєстрації просторового відхилення трека від оптичної осі сонячного диска на рухомій платформі встановлено чотири первинні фотоелектричні сенсори — напівпровідникові фоторезистори серії GL5528 (QE1.1...QE1.4). Оскільки вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера ATmega328P платформи Arduino Uno R3 здатний зчитувати лише параметри напруги, кожен фоторезистор інтегровано у верхнє плече індивідуального резистивного дільника.

Нижні плечі дільників утворені прецизійними сталими резисторами R_1 , R_2 , R_3 , R_4 з однаковим номіналом 10 кОм і допуском відхилення не більше $\pm 1\%$. Це забезпечує повну електричну симетрію вимірювальних каналів і виключає статичну похибку наведення. Електричне з'єднання виконано за такою топологією:

- Один вивід кожного фоторезистора підключено до живлення +5 В плати Arduino;
- Другий вивід фоторезистора з'єднується у спільний вузол (середню точку зняття сигналу) зі сталим резистором 10 кОм;
- Протилежний вивід сталого резистора зведено на загальну шину заземлення (GND).

Інформаційні аналогові сигнали напруги знімаються з середніх точок дільників і подаються безпосередньо на вхідні канали АЦП мікроконтролера:

- Канал A0 — верхній лівий сенсор (QE1.1, сигнал LDR_TL);
- Канал A1 — верхній правий сенсор (QE1.2, сигнал LDR_TR);
- Канал A2 — нижній лівий сенсор (QE1.3, сигнал LDR_BL);
- Канал A3 — нижній правий сенсор (QE1.4, сигнал LDR_BR).

2. Дискретні контури захисту, безпеки та обмеження ходу

Для реалізації алгоритмів безаварійного функціонування та пріоритетного захисту металоконструкції від пошкоджень до цифрових портів введення мікроконтролера підключено дві групи датчиків:

- Контур обмеження кутів ходу: чотири механічні кінцеві вимикачі роликового типу SQ1–SQ4 з нормально-розімкненими контактами підключені

відповідно до дискретних пінів D4, D5, D6, D7 Arduino. Схемотехнічно реалізовано схему з прямим заземленням одного контакту та програмною активацією внутрішніх підтягуючих резисторів портів до шини +5В. При фізичному замиканні важільного контакту на відповідному піні МК формується рівень логічного нуля (0 В), що є сигналом для негайного блокування руху приводу в даному напрямку.

- Контур метеорологічного захисту: Імітація промислового анемометра SE2.1 виконана на базі трьохконтактного повзункового перемикача. Його середня сигнальна ніжка підключена до цифрового порту D8, одна з крайніх ніжок зведена на шину GND, а третя залишена вільною. Переведення перемикача в стан логічного нуля (0 В) імітує фіксацію шквального вітру понад 15 м/с, що запускає безумовний режим штормового паркування.

3. Інтерфейс індикації та послідовного зв'язку I2C

Локальний моніторинг технологічних параметрів САК здійснюється алфавітно-цифровим рідкокристалічним дисплеєм типу LCD 1602. Для економії обмеженого ресурсу цифрових портів Arduino Uno, дисплей інтегровано через дочірню плату розширювача портів на базі мікросхеми PCF8574, яка перетворює паралельний інтерфейс у послідовну двопровідну шину I2C. Підключення виконано за такою схемою:

- Лінія даних SDA (Serial Data) підключена до апаратного порту A4 Arduino;
- Лінія тактування SCL (Serial Clock) підключена до апаратного порту A5 Arduino;
- Шини живлення модуля (VCC та GND) з'єднані із загальними лініями +5 В та заземленням макета.

4. Кола керування силовими виконавчими механізмами

Вихідний приводний рівень принципової електричної схеми має дворівневу побудову:

- Схема лабораторного прототипу: для відпрацювання алгоритму в симуляційному середовищі Tinkercad та на фізичному стенді керуючі ШІМ-сигнальні лінії підключені до цифрових виводів мікроконтролера: пін D13 призначений для сервоприводу азимутального повороту (Серво 1), а пін D2 —

для сервоприводу зенітного нахилу (Серво 2). Використання зазначених пінів повністю узгоджено з логікою програмного забезпечення.

- Схема промислової силової частини: Для керування реальним об'єктом — лінійним актуатором вертикального нахилу моделі АК-SY-A04B-F3-12V із номінальною напругою 12 В — схема розширена реверсивним двоканальним релейним модулем (H-мостом). Логічні виходи Arduino з'єднані з силовими ключами виключно через транзисторні оптопари класу PC817 для гальванічної розв'язки. Для захисту транзисторів від руйнівних зворотних сплесків ЕРС самоіндукції, паралельно обмоткам двигуна актуатора у зворотному включенні встановлено високошвидкісні захисні діоди серії 1N4007.

5. Топологія електроживлення та заземлення

Електроживлення схеми базується на принципі жорсткого просторового та електричного розділення шин для підвищення завадостійкості. Логічна частина (мікроконтролер, дільники, дисплей) отримує стабілізовані +5В від імпульсного перетворювача LM2596S. Силова частина живиться від окремого джерела постійного струму напругою 12 В.

Всі заземлюючі провідники (GND) інформаційних дільників, мікроконтролера, модуля індикації та негативного полюса джерел живлення зведені в одну загальну фізичну точку за схемою «зірка». Це дозволяє повністю нівелювати виникнення паразитних струмових петель та забезпечує високу стійкість САК до електромагнітних наведень у польових умовах СЕС.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Побудова математичної моделі об'єкта керування та виконавчого електроприводу

Для дослідження динамічних властивостей системи автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером, аналізу її стійкості та якості регулювання необхідно розробити математичну модель об'єкта керування. У даній системі об'єктом керування є просторова конструкція рухомої рами з фотоелектричною панеллю, а виконавчим органом — редукторний електропривід (на базі двигунів постійного струму незалежного збудження або

крокових/серводвигунів), який забезпечує точне позиціонування панелі за двома взаємно перпендикулярними осями (азимутальною та зенітною).

З огляду на те, що канали керування азимутом і зенітом є ортогональними та мають незначний взаємний кінематичний вплив, загальну математичну модель системи можна представити у вигляді двох незалежних лінеаризованих динамічних контурів.

Математична модель виконавчого електроприводу

Основним силовим елементом, що забезпечує переміщення панелі, є двигун постійного струму (ДПС) з постійними магнітами, який входить до складу лінійного актуатора або позиційного сервоприводу. Перехідні процеси в електричній та механічній частинах ДПС описуються класичною системою диференціальних рівнянь, складених за законами Кірхгофа та Ньютона:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$
$$J \frac{dw(t)}{dt} = M_m(t) - M_c(t) - b \cdot w(t)$$

де:

$u(t)$ - керуюча напруга, що подається на якір двигуна з виходу силового драйвера, В;

$i(t)$ - струм в колі якоря двигуна, А;

R, L - активний опір (Ω) та індуктивність (Гн) обмотки якоря;

$e(t)$ - проти-ЕРС (електрорушійна сила) якоря двигуна, В;

J - сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$w(t)$ - кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

$M_m(t)$ - електромагнітний момент, що розвивається двигуном, Н·м;

$M_c(t)$ - момент статичного опору (навантаження від ваги рами та вітрового тиску), Н·м;

b - коефіцієнт в'язкого тертя в підшипниках та редукторі, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$.

Електромагнітний момент двигуна та внутрішня проти-ЕРС пов'язані з механічними параметрами через конструктивні коефіцієнти пропорційності k_m та k_e :

$$M_m(t) = k_m \cdot i(t)$$

$$e(t) = k_e \cdot w(t)$$

Застосувавши пряме перетворення Лапласа за нульових початкових умов, перейдемо від диференціальних рівнянь у часовій області до операторної форми у комплексній змінній s . Отримаємо операторну систему рівнянь електричного приводу:

$$\begin{aligned} U(s) &= (R + sL) \cdot I(s) + k_e \cdot \Omega(s) \\ sJ \cdot \Omega(s) &= k_m \cdot I(s) - M_c(s) - b \cdot \Omega(s) \end{aligned}$$

Оскільки для малопотужних виконавчих двигунів постійного струму електромагнітна постійна часу обмотки якоря є на порядки меншою за механічну постійну $T_e = \frac{L}{R} \approx 0$ індуктивністю L у динамічних розрахунках можна знехтувати. Тоді, виразивши струм $I(s)$ з першого рівняння і підставивши його в друге, отримаємо передавальну функцію двигуна за швидкістю щодо керуючої напруги:

$$W_{dw}^w(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_{dv}}{T_m s + 1}$$

де:

$\Omega(s)$ - зображення кутової швидкості двигуна в операторній формі, рад/с;

$U(s)$ - зображення керуючої напруги, В;

K_{dv} - коефіцієнт передачі двигуна;

де параметри двигуна визначаються через його фізичні характеристики:

$$K_{dv} = \frac{k_m}{R \cdot b + k_m \cdot k_e} \text{ — статический коефіцієнт передачі двигуна за швидкістю}$$

$$T_m = \frac{J \cdot R}{R \cdot b + k_m \cdot k_e} \text{ — електромеханічна постійна часу двигуна, с.}$$

Враховуючи, що вихідною координатою контуру є не кутова швидкість, а кут повороту валу двигуна $\theta_{mot}(t)$, який пов'язаний зі швидкістю інтегруючим співвідношенням $\theta_{mot}(t) = \int w(t) dt$ передавальна функція ДПС за кутовим положенням набуває вигляду:

$$W_{dv}^\theta(s) = \frac{\theta_{mot}(s)}{U(s)} = \frac{K_{dv}}{s(T_m s + 1)}$$

Математична модель механічної передачі та об'єкта керування.

Для зниження швидкості обертання та пропорційного збільшення крутного моменту вал двигуна з'єднаний з рамою сонячної панелі через черв'ячний редуктор або гвинтову передачу актуатора. Механічна передача описується статичним безінерційним ланкою з коефіцієнтом передачі, що дорівнює зворотному значенню передавального числа редуктора i_{rd} :

$$\theta_{pan}(t) = \frac{\theta_{mot}(t)}{i_{rd}} \Rightarrow W_{red}(s) = \frac{\theta_{mot}(s)}{\theta_{pan}(s)} = \frac{1}{i_{rd}}$$

Сумарний момент інерції J , що входить до рівняння руху приводу, складається з власного моменту інерції ротора двигуна J_{mot} та моменту інерції конструкції сонячної панелі J_{pan} , приведеного до валу двигуна через передавальне число i_{rd} та ККД редуктора η :

$$J = J_{mot} \frac{J_{pan}}{i_{rd}^2 \cdot \eta}$$

Таким чином, повна передавальна функція виконавчого електроприводу разом із механічною передачею (від напруги драйвера до кута нахилу панелі) є інтегруючою динамічною ланкою першого порядку:

$$W_{pr}(t) = W_{dv}^\theta(s) \cdot W_{red}(s) = \frac{K_{dv}}{s(T_m s + 1)}$$

де $K_{dr} = \frac{K_{dv}}{i_{rd}}$ — загальний коефіцієнт передачі приводу за кутом.

Момент статичного навантаження $M_c(s)$, що діє на панель, розглядається як зовнішнє збурення. Основним компонентом M_c у польових умовах є моменти від вітрового навантаження M_{wind} , які мають випадковий стохастичний характер і моделюються у вигляді адитивної перешкоди.

Математична модель вимірювальних елементів (фоторезисторів)

Вимірювальний пристрій системи орієнтації складається з чотирьох фоторезисторів GL5528, увімкнених за схемою резистивних дільників напруги. При відхиленні панелі від оптимального кута на кут розузгодження $\Delta\theta$, напівпровідникові сенсори освітлюються нерівномірно, що призводить до диференціальної зміни їхнього внутрішнього опору.

Для малих кутів розузгодження (у межах $\pm 15^\circ$) характеристику пари фоторезисторів можна лінеаризувати. Вихідна напруга дільника напруги, що надходить на АЦП мікроконтролера, прямо пропорційна куту похибки сонця:

$$\Delta U_{LDR}(t) = K_{ldr} \cdot \Delta \theta(t)$$

де K_{ldr} - чутливість оптичного датчика розузгодження, В/град.

З урахуванням фізичної інерційності напівпровідникових процесів у фоторезисторі (час релаксації фотопровідності) та наявності вхідного RC-фільтра на аналоговому вході мікроконтролера, динаміка вимірювального контуру описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{ldr}(s) = \frac{\Delta U_{LDR}(s)}{\Delta \theta(s)} = \frac{K_{ldr}}{T_{ldr}s + 1}$$

де T_{ldr} - постійна часу фоторезистора (для сенсорів серії GL5528 становить близько 20 ... 30мс).

Структурна схема динамічної моделі сонячного трекера

На основі отриманих передавальних функцій окремих технологічних ланок побудовано узагальнену структурно-динамічну схему одного каналу автоматичного керування сонячним трекером.

Система працює за принципом відхилення:

1. Задавальним впливом є оптичний кут положення сонця $\theta_{sun}(s)$.
2. Оптичний датчик (LDR) порівнює його з поточним кутом нахилу панелі $\theta_{pan}(s)$, формуючи сигнал похибки розузгодження $\Delta \theta(s)$.
3. Мікроконтролер Arduino реалізує релейний або пропорційний алгоритм керування і через драйвер формує напругу $U(s)$ для приводу.

Виконавчий привід $W_{pr}(s)$ долає момент зовнішніх вітрових завад $M_c(s)$ і повертає конструкцію до мінімізації похибки.

3.2. Розрахунок та синтез закону керування положенням виконавчого механізму

Синтез закону керування є центральною задачею проєктування системи автоматичного регулювання (САР) сонячного трекера. Задачею регулятора є зведення до нуля похибок розузгодження по азимутальній та зенітній осях ($\Delta H \rightarrow 0$, $\Delta V \rightarrow 0$), що обчислюються на основі сигналів диференціальних фоторезистивних пар.

Для керування просторовим положенням фотоелектричних панелей у світовій практиці автоматизації застосовують два основні підходи:

1. Безперервне керування на базі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів.

2. Дискретне (релейне) керування з зоною нечутливості.

З огляду на специфіку об'єкта керування, а саме надзвичайно низьку кутову швидкість видимого руху сонця по небосхилу (яка становить $\omega_{\text{sun}} \approx 15^\circ / \text{год} = 0,00417^\circ/\text{с}$), застосування безперервного ПІД-регулятора є технічно недоцільним.

Тому для реалізації в мікропроцесорному модулі керування сонячного трекера було синтезовано дискретний трипозиційний релейний закон керування з зоною нечутливості. Цей закон забезпечує квазістаціонарне (переривчасте) позиціонування панелей, за якого двигуни вмикаються лише тоді, коли сонце зміщується на фіксований кут, а решту часу привід перебуває у знеструмленому стані, зафіксований черв'ячною передачею редуктора.

Математичний опис трьохпозиційного релейного регулятора

Математична модель синтезованого релейного регулятора для кожного з двох каналів орієнтації (азимуту та зеніту) описується нелінійною функцією типу «трипозиційне реле з зоною нечутливості та симетричними виходами». В операторній формі закон формування вихідного керуючого сигналу напруги $U(s)$ має вигляд:

$$U(s) = \begin{cases} +U_{\max}, & \text{якщо } \epsilon(s) > \epsilon_{dz} \\ 0, & \text{якщо } |\epsilon(s)| \leq \epsilon_{dz} \\ -U_{\min}, & \text{якщо } \epsilon(s) < -\epsilon_{dz} \end{cases}$$

де:

- ϵ_{dz} — поточна динамічна помилка розузгодження системи (ΔH або ΔV), виражена в одиницях зняття сигналу з АЦП мікроконтролера;

- ϵ_{dz} — поріг зони нечутливості регулятора (параметр DEAD_ZONE в програмному коді);

- $\pm U_{\max}$ — максимальна керуюча напруга, що подається на виконавчий привід через силові ключі драйвера/реле (для лабораторного макета відповідає дискретному ШІМ-насиченню сервоприводу, для промислового — повній напрузі 12 В постійного струму).

Графічно цей закон керування представляється статичною характеристикою нелінійної ланки з симетричним вікном блокування утримання осі.

Розрахунок та інженерне обґрунтування параметрів алгоритму

Для забезпечення високої точності наведення сонячної панелі та одночасного виконання умов стійкості САР (відсутності автоколивань) у програмному забезпеченні було розраховано та закладено три взаємопов'язані системні параметри: DEAD_ZONE, STEP_ANGLE та LOOP_DELAY.

1. Розрахунок зони нечутливості (DEAD_ZONE)

Вбудований АЦП мікроконтролера ATmega328P є 10-розрядним і перетворює вхідну напругу дільника 0 ... 5 В у цифровий діапазон 0...1023 одиниць. Ціна однієї молодшої одиниці розряду (LSB) становить:

$$\Delta U_{LDR} = \frac{5 \text{ В}}{1023} \approx 4,88 \text{ мВ}$$

Експериментально встановлено, що сумарний рівень високочастотних електричних шумів у вимірювальних лініях фоторезисторів та дрейф параметрів завад у сонячний день становить до 20...35 мВ. Для запобігання хибним спрацюванням приводу від випадкових шумів, величина порогу нечутливості вибрана як DEAD_ZONE = 45 часток АЦП. Переведемо це значення у фізичну напругу:

$$U_{dz} = 45 \times 4,88 \text{ мВ} \approx 220 \text{ мВ}$$

Враховуючи конструктивну чутливість вимірювальної головки трекера $K_{ldr} \approx 110 \text{ мВ/}^\circ$, програмна зона нечутливості у кутових одиницях становить:

$$\Theta_{dz} = \frac{U_{dz}}{K_{ldr}} = \frac{220}{110} \approx 2^\circ$$

Кутова точність у 2° є повністю оптимальною для фотоелектричних кремнієвих панелей, оскільки при таких відхиленнях косинусна похибка сприйняття сонячної радіації $\cos(2^\circ) = 0,9994$ не викликає відчутних втрат генерації потужності (втрати становлять менше 0,06%).

2. Розрахунок динаміки кроку та дискретизації часу

Динаміка відпрацювання кута регулятором визначається двома константами:

- Крок інтегрування кута за одну ітерацію: STEP_ANGLE = 1 градус.

- Період дискретизації циклу програми: $\text{LOOP_DELAY} = 120 \text{ мс} (0,12 \text{ с})$.

Ці параметри задають максимальну кутову швидкість стеження САК при виході з зони нечутливості:

$$\omega_{\max} = \frac{\text{STEP_ANGLE}}{\text{LOOP_DELAY}} = \frac{1}{0.12} \approx 8.33^\circ/\text{с}$$

Оскільки максимальна швидкість трекера ($\omega_{\max} = 8,33^\circ/\text{с}$) значно перевищує швидкість руху сонця ($\omega_{\text{sun}} = 0,00417^\circ/\text{с}$), система має колосальний динамічний запас для миттєвого наздоганяння світила після виходу з-за хмар або при первинному ранковому увімкненні.

Аналіз стійкості САК до виникнення автоколивань

Головною небезпекою релейних систем автоматичного керування є схильність до виникнення стійких автоколивань — так званого ефекту «мисливства», коли привід безперервно рухається вперед-назад навколо заданої точки, перевантажуючи силову частину.

У розробленій САК стійкість та згасання перехідного процесу гарантується суворим дотриманням схемотехнічної нерівності, що пов'язує зону нечутливості з кроком відпрацювання та часом гальмування приводу. Для повного виключення перерегулювання (коли за один крок система пролітає зону нечутливості наскрізь) необхідно виконувати умову:

$$\text{STEP_ANGLE} < 2 \times \Theta_{dz}$$

Підставимо розраховані нами значення:

$$1^\circ < 2^\circ \times 2^\circ \rightarrow 1^\circ < 4^\circ$$

Умова виконується з чотирикратним запасом. Це означає, що коли кут розузгодження перевищить поріг 2° , регулятор увімкне двигун, привід за один цикл змістить раму на $\text{STEP_ANGLE} = 1^\circ$. Похибка зменшиться до 1° , що автоматично заведе систему всередину вікна нечутності ($1^\circ \leq 2^\circ$), і алгоритм негайно знеструмить виконавчі механізми. Перехідний процес завершиться за одну ітерацію, без перерегулювання та коливань.

Додатковим фактором стійкості є те, що період опитування $\text{LOOP_DELAY} = 120 \text{ мс}$ вибрано більшим за сумарний час електромеханічного вибігу і гальмування актуатора ($T_g \approx 40 \dots 60 \text{ мс}$). Двигун встигає повністю зупинитися до

моменту, коли мікроконтролер почне наступний цикл вимірювання АЦП, що повністю ліквідує вплив сил інерції на точність позиціонування.

3.3. Розробка загального алгоритму функціонування системи

Алгоритм функціонування мікропроцесорної системи керування двоосьовим сонячним трекером базується на принципі циклічного опитування інформаційних каналів, обробки сигналів у реальному часі та пріоритетного виконання контурів безпеки. Програмна логіка розроблена як кінцевий автомат, що перемикається між чотирма основними макрорежимами роботи: «Старт системи», «Аварійний метеозахист», «Автоматичне стеження» та «Нічне очікування».

Загальна логічна структура алгоритму та послідовність виконання операцій мікроконтролером ATmega328P розподілена на два базові програмні блоки: ініціалізацію (setup) та безкінечний робочий цикл (loop).

1. Етап ініціалізації та первинного тестування системи

При забезпеченні апаратного пуску або скиданні (Reset) мікроконтролера виконується блок одноразових налаштувань:

Запуск послідовного порту Serial на швидкості 9600 бод що в умовах використання архітектури мікроконтролера ATmega328P еквівалентно швидкості передачі даних 9600 біт/с для передачі налагоджувальних даних на ЕОМ.

Програмне підключення (прив'язка) об'єктів сервоприводів servoAzimuth та servoZenith до апаратних ШІМ-виводів МК (піни D13 та D2 відповідно).

Конфігурація дискретних входів для підключення кінцевих вимикачів обмеження ходу (SQ1_PIN...SQ4_PIN) та датчика штормового захисту (WIND_SWITCH_PIN) у режим порту INPUT_PULLUP із активацією внутрішніх підтягуючих резисторів до шини +5 В.

Ініціалізація інтерфейсу зв'язку I2C та рідкокристалічного дисплея LCD 1602 за базовою адресою 0x20, активація LED-підсвічування матриці.

Встановлення початкових кутових координат трекера у просторовий центр (90° за азимутом та зенітом) для запобігання пусковим ударами механіки.

Виведення на екран стартового повідомлення «Solar Tracker System Start», витримка системної паузи в 1500 мс та очищення відеобуфера LCD.

2. Головний робочий цикл та ієрархія пріоритетів безпеки

Після завершення блоку setup система переходить до безкінечного виконання циклу loop, робота якого підпорядкована строгому закону пріоритетності контурів:

Пріоритет №1 (Метеозахист): На початку кожного циклу процесор виконує пряме зчитування стану цифрового входу WIND_SWITCH_PIN. Якщо зафіксовано рівень логічного нуля (LOW), що свідчить про замикання контактів анеометра через перевищення критичної швидкості вітру (>15 м/с), прапор аварії windAlarm набуває значення true. Алгоритм миттєво перериває виконання будь-яких інших обчислень та безумовно викликає функцію windProtectionMode(). При цьому кути приводів примусово встановлюються в координати безпечного паркування (PARK_AZIMUTH = 90°, PARK_ZENITH = 20°), а на дисплей виводиться статус «WIND PROTECT». Опитування фотодатчиків у цей момент повністю заблоковане.

Пріоритет №2 (Аналіз рівня інтегральної освітленості): Якщо штормовий захист не активний (windAlarm == false), алгоритм переходить до виконання функції trackingMode(), де першочергово зчитуються 10-бітні значення напруги з чотирьох каналів АЦП фоторезисторів (tl, tr, bl, br). Процесор розраховує середнє арифметичне значення поточної інсоляції:

$$Avg_{light} = \frac{tl + tr + bl + br}{4}$$

Отримане значення порівнюється з константою LIGHT_MIN = 120. Якщо рівень світла нижчий за поріг (настання сутінків або щільна хмарність), алгоритм викликає підпрограму nightMode(). Панель розгортається у вихідну точку очікування ранкового сходу Сонця (NIGHT_AZIMUTH = 90°, NIGHT_ZENITH = 45°), на LCD виводиться напис «NIGHT MODE», а подальший аналіз похибок блокується для економії енергії.

3. Алгоритм відпрацювання кутів та перевірки кінцевих вимикачів

За умови штатної денної роботи ($Avg_{Light} \geq LIGHT_MIN$) алгоритм переходить до виконання математичного розрахунку просторових помилок

розузгодження осей. Обчислюються диференціальні різниці між середніми значеннями освітленості квадрантів:

Помилка зенітної осі (вертикальна):

$$\text{verticalError} = \frac{tl + tr}{2} - \frac{bl + br}{2}$$

Помилка азимутальної осі (горизонтальна):

$$\text{horizontalError} = \frac{tl + bl}{2} - \frac{tr + br}{2}$$

Процес ітераційного регулювання положення виконується за таким розгалуженим алгоритмом:

Регулювання зеніту: Якщо модуль $|\text{verticalError}| > \text{DEAD_ZONE}$, перевіряється знак помилки. При $\text{verticalError} > 0$ (необхідно підняти панель) рух дозволяється лише у випадку, якщо верхній кінцевик обмеження ходу не натиснутий ($!\text{isPressed}(\text{SQ2_PIN})$), тоді кутова координата інкрементується на величину STEP_ANGLE . При $\text{verticalError} < 0$ (необхідно опустити панель) перевіряється нижній кінцевик ($!\text{isPressed}(\text{SQ1_PIN})$), і кут декрементується.

Регулювання азимуту: Якщо модуль $|\text{horizontalError}| > \text{DEAD_ZONE}$, аналогічно аналізується знак похибки. Рух ліворуч або праворуч дозволяється тільки за умови відсутності блокуючих сигналів від відповідних бічних кінцевих вимикачів SQ3_PIN або SQ4_PIN . Кут азимуту змінюється на крок STEP_ANGLE .

Програмне насичення: Отримані розрахункові кути azimuthAngle та zenithAngle проходять фінальну фільтрацію через функцію обмеження діапазону $\text{limitAngle}()$, яка жорстко утримує координати всередині конструктивних меж (AZIMUTH_MIN/MAX , ZENITH_MIN/MAX).

Видача команд: Сформовані та перевірені кути записуються в об'єкти приводів через методи $\text{.write}()$, змушуючи вали фізично повернути металоконструкцію трекера. На LCD виводиться режим «AUTO TRACKING».

Неблокуючий таймінг та інтерфейс виведення даних

Для оптимізації швидкодії мікроконтролера та запобігання мерехтінню символів на рідкокристалічному екрані, загальний алгоритм використовує асинхронне виведення даних за допомогою функції $\text{millis}()$. Замість

використання блокуючих затримок delay(), підпрограма showLCD() кожні 500 мс порівнює поточний час із міткою lastLcdUpdate.

При досягненні інтервалу буфер екрана очищується шляхом заповнення пробілами, у першому рядку друкується поточний текстовий режим («WIND PROTECT», «NIGHT MODE» або «AUTO TRACKING»), а у другому рядку відображаються точні поточні кути позиціонування виконавчих механізмів трекера у градусах (параметри Az: та Ze:).

Наприкінці кожного повного проходу головного циклу програма виконує технологічну паузу delay(LOOP_DELAY) тривалістю 120 мс для завершення перехідних процесів у приводах, після чого весь алгоритм циклічно повторюється, починаючи з кроку перевірки вітрового навантаження.

3.4. Опис програмної реалізації алгоритму для мікроконтролера

Програмне забезпечення системи автоматичного керування (САК) двоосьовим сонячним трекером розроблене у середовищі *Arduino IDE* на мові високого рівня C/C++ (стандарт для вбудованих систем). Програма оптимізована для виконання на мікроконтролері ATmega328P, має чітку модульну структуру, низькі вимоги до оперативної пам'яті:

```
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// -----
// LCD I2C
// Для дисплея PCF8574-based Address 32 = 0x20
// -----
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20, 16, 2);

// -----
// Датчики освітленості LDR
// -----
const int LDR_TL = A0; // QE1-1 — верхній лівий датчик
const int LDR_TR = A1; // QE1-2 — верхній правий датчик
const int LDR_BL = A2; // QE1-3 — нижній лівий датчик
const int LDR_BR = A3; // QE1-4 — нижній правий датчик

// -----
// Сервоприводи
// -----
const int SERVO_AZIMUTH_PIN = 13; // M1 — привід азимутального повороту
const int SERVO_ZENITH_PIN = 2; // M2 — привід зеніту / кута нахилу

Servo servoAzimuth;
Servo servoZenith;

// -----
// Кінцеві вимикачі
// Підключення: пін Arduino + GND
```

```

// Використовується INPUT_PULLUP
// LOW — кінцевий вимикач спрацював
// -----
const int SQ1_PIN = 4; // SQ1 — мінімальний кут нахилу
const int SQ2_PIN = 5; // SQ2 — максимальний кут нахилу
const int SQ3_PIN = 6; // SQ3 — мінімальний азимут
const int SQ4_PIN = 7; // SQ4 — максимальний азимут

// -----
// Імітація анеометра
// Slide Switch:
// середня ніжка -> D8
// термінал 1 -> GND
// LOW — аварійний режим, сильний вітер
// HIGH — нормальний режим
// -----
const int WIND_SWITCH_PIN = 8;

// -----
// Поточні кути сервоприводів
// -----
int azimuthAngle = 90;
int zenithAngle = 90;

// -----
// Обмеження кутів
// -----
const int AZIMUTH_MIN = 10;
const int AZIMUTH_MAX = 170;

const int ZENITH_MIN = 20;
const int ZENITH_MAX = 160;

// -----
// Положення паркування при сильному вітрі
// -----
const int PARK_AZIMUTH = 90;
const int PARK_ZENITH = 20;

// -----
// Нічне / початкове положення
// -----
const int NIGHT_AZIMUTH = 90;
const int NIGHT_ZENITH = 45;

// -----
// Налаштування алгоритму
// -----
const int DEAD_ZONE = 45; // зона нечутливості
const int LIGHT_MIN = 120; // поріг нічного режиму
const int STEP_ANGLE = 1; // крок повороту сервопривода
const int LOOP_DELAY = 120; // затримка циклу, мс

// -----
// Оновлення LCD не кожен цикл, щоб дисплей не миготів
// -----
unsigned long lastLcdUpdate = 0;
const unsigned long LCD_UPDATE_INTERVAL = 500;

// -----
// Обмеження кута
// -----
int limitAngle(int value, int minValue, int maxValue) {
    if (value < minValue) return minValue;
    if (value > maxValue) return maxValue;
    return value;
}

```

```

}

// -----
// Перевірка кінцевого вимикача
// INPUT_PULLUP: LOW означає спрацювання
// -----
bool isPressed(int pin) {
    return digitalRead(pin) == LOW;
}

// -----
// Вивід інформації на LCD
// -----
void showLCD(const char* mode) {
    unsigned long currentMillis = millis();

    if (currentMillis - lastLcdUpdate >= LCD_UPDATE_INTERVAL) {
        lastLcdUpdate = currentMillis;

        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("    ");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(mode);

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("    ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Az:");
        lcd.print(azimuthAngle);
        lcd.print(" Ze:");
        lcd.print(zenithAngle);
    }
}

// -----
// Аварійний режим при сильному вітрі
// -----
void windProtectionMode() {
    azimuthAngle = PARK_AZIMUTH;
    zenithAngle = PARK_ZENITH;

    servoAzimuth.write(azimuthAngle);
    servoZenith.write(zenithAngle);

    showLCD("WIND PROTECT");

    Serial.println("Аварійний режим: імітація сильного вітру. Панель переведена у положення паркування.");
}

// -----
// Нічний режим
// -----
void nightMode() {
    azimuthAngle = NIGHT_AZIMUTH;
    zenithAngle = NIGHT_ZENITH;

    servoAzimuth.write(azimuthAngle);
    servoZenith.write(zenithAngle);

    showLCD("NIGHT MODE");

    Serial.println("Нічний режим: недостатній рівень освітленості.");
}

// -----
// Автоматичний режим стеження за Сонцем

```

```

// -----
void trackingMode() {
    int tl = analogRead(LDR_TL);
    int tr = analogRead(LDR_TR);
    int bl = analogRead(LDR_BL);
    int br = analogRead(LDR_BR);

    int topAvg = (tl + tr) / 2;
    int bottomAvg = (bl + br) / 2;

    int leftAvg = (tl + bl) / 2;
    int rightAvg = (tr + br) / 2;

    int verticalError = topAvg - bottomAvg;
    int horizontalError = leftAvg - rightAvg;

    int avgLight = (tl + tr + bl + br) / 4;

    Serial.print("TL=");
    Serial.print(tl);
    Serial.print(" TR=");
    Serial.print(tr);
    Serial.print(" BL=");
    Serial.print(bl);
    Serial.print(" BR=");
    Serial.print(br);

    Serial.print(" | V_err=");
    Serial.print(verticalError);
    Serial.print(" H_err=");
    Serial.print(horizontalError);

    Serial.print(" | Az=");
    Serial.print(azimuthAngle);
    Serial.print(" Ze=");
    Serial.println(zenithAngle);

    // -----
    // Перевірка рівня освітленості
    // Якщо світла мало — нічний режим
    // -----
    if (avgLight < LIGHT_MIN) {
        nightMode();
        return;
    }

    // -----
    // Керування зенітною віссю / кутом нахилу
    // SQ1 — мінімальний кут нахилу
    // SQ2 — максимальний кут нахилу
    // -----
    if (abs(verticalError) > DEAD_ZONE) {
        if (verticalError > 0) {
            // Верхні LDR освітлені сильніше — підняти панель
            if (!isPressed(SQ2_PIN)) {
                zenithAngle += STEP_ANGLE;
            }
        } else {
            // Нижні LDR освітлені сильніше — опустити панель
            if (!isPressed(SQ1_PIN)) {
                zenithAngle -= STEP_ANGLE;
            }
        }
    }
}

// -----

```

```

// Керування азимутальною віссю
// SQ3 — мінімальний азимут
// SQ4 — максимальний азимут
// -----
if (abs(horizontalError) > DEAD_ZONE) {
  if (horizontalError > 0) {
    // Ліві LDR освітлені сильніше — повернути вліво
    if (!isPressed(SQ3_PIN)) {
      azimuthAngle -= STEP_ANGLE;
    }
  } else {
    // Праві LDR освітлені сильніше — повернути вправо
    if (!isPressed(SQ4_PIN)) {
      azimuthAngle += STEP_ANGLE;
    }
  }
}

// -----
// Програмне обмеження кутів
// -----
azimuthAngle = limitAngle(azimuthAngle, AZIMUTH_MIN, AZIMUTH_MAX);
zenithAngle = limitAngle(zenithAngle, ZENITH_MIN, ZENITH_MAX);

// -----
// Передача команд на сервоприводи
// -----
servoAzimuth.write(azimuthAngle);
servoZenith.write(zenithAngle);

showLCD("AUTO TRACKING");
}

// -----
// SETUP
// -----
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Підключення сервоприводів
  servoAzimuth.attach(SERVO_AZIMUTH_PIN);
  servoZenith.attach(SERVO_ZENITH_PIN);

  // Кінцеві вимикачі
  pinMode(SQ1_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(SQ2_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(SQ3_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(SQ4_PIN, INPUT_PULLUP);

  // Імітація анеометра
  pinMode(WIND_SWITCH_PIN, INPUT_PULLUP);

  // Ініціалізація LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  // Початкове положення
  azimuthAngle = 90;
  zenithAngle = 90;

  servoAzimuth.write(azimuthAngle);
  servoZenith.write(zenithAngle);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Solar Tracker");
  lcd.setCursor(0, 1);

```

```

lcd.print("System Start");

Serial.println("Система орієнтації фотоелектричної панелі запущена.");

delay(1500);
lcd.clear();
}

// -----
// LOOP
// -----
void loop() {
    bool windAlarm = digitalRead(WIND_SWITCH_PIN) == LOW;

    if (windAlarm) {
        windProtectionMode();
    } else {
        trackingMode();
    }

    delay(LOOP_DELAY);
}

```

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при обслуговуванні фотоелектричних установок

Проектована система автоматичного керування двоосьовим сонячним трекером експлуатується на відкритих просторах у складі промислових або автономних фотоелектричних станцій. Обслуговування, ремонт та пусконаладження модулів автоматики, крокових двигунів/лінійних актуаторів та опорно-поворотних металоконструкцій пов'язані з впливом на черговий персонал низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Відповідно до специфіки об'єкта автоматизації, робоче місце інженера-налагоджувальника та оператора СЕС піддається таким основним факторам ризику:

Небезпечні електричні фактори (Ураження струмом)

Хоча внутрішня логіка мікроконтролера Arduino Uno R3 працює від напруги 5 В, а виконавчий актуатор АК-SY-A04B-F3-12V — від напруги 12 В постійного струму, вся система підключена до загальної промислової мережі живлення 220 В через імпульсні блоки живлення (наприклад, серії Mean Well).

Існує пряма небезпека ураження електричним струмом при:

- Порушенні ізоляції силових кабелів живлення перетворювачів LM2596S;

- Появі потенціалу на металевому корпусі шафи керування або металоконструкції щогли трекера внаслідок пробою ізоляції;
- Помилкових діях персоналу під час проведення ремонтних робіт під напругою.

Механічні небезпечні фактори (Рухомі частини механізмів)

Двоосьовий сонячний трекер є динамічною просторовою установкою, що здійснює рух за азимутальною та зенітною координатами.

- Лінійний актуатор вертикальної осі має рухомий висувний шток, який розвиває значне зусилля до 1500 Н (150 кгс).
- Черв'ячні мотор-редуктори азимутального приводу мають високі крутні моменти.

Захоплення одягу або кінцівок оператора рухомими елементами рами, шестернями чи штоком актуатора під час активного відпрацювання похибки або в аварійному режимі штормового паркування може призвести до важких механічних травм.

Метеорологічні та кліматичні чинники

Роботи з обслуговування трекерів виконуються на відкритому повітрі, що зумовлює тривалий вплив шкідливих природних факторів:

- Підвищена або понижена температура повітря (робочий діапазон обладнання становить від -25°C до $+65^{\circ}\text{C}$);
- Пряме сонячне ультрафіолетове та теплове випромінювання (ризик сонячного удару);
- Вітрові та снігові навантаження (ризик механічного руйнування конструкції та травмування уламками).

Небезпека падіння з висоти при використанні приставних драбин

Оскільки фотоелектрична панель закріплена на піднятій металевій щоглі, операції з очищення сенсорів \$QE1.1–QE1.4\$, заміни актуаторів або ремонту комутаційного обладнання шафи САК вимагають проведення робіт на висоті понад 1,3 м від рівня землі. Використання приставних драбин створює високий ризик травмування персоналу внаслідок:

- Втрати стійкості драбини та її перевертання через встановлення на нерівний або м'який ґрунт майданчика СЕС;
- Ковзання основи драбини по опорній щоглі трекера під час динамічних рухів працівника;
- Випадкового падіння інструменту чи самого робітника з висоти через недотримання правил безпеки.

4.2. Технічні рішення щодо забезпечення електробезпеки та заземлення конструкції трекера

Для нейтралізації дії виявлених небезпечних чинників у проєкті реалізовано комплекс організаційних та інженерно-технічних заходів безпеки (відповідно до вимог ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»):

1. Заходи забезпечення електробезпеки

Гальванічна розв'язка: інформаційні шини мікроконтролера Arduino повністю ізольовані від силових ланцюгів актуатора напругою 12 В за допомогою оптопар PC817. Це виключає вихід високої напруги на пульт керування.

Захисна оболонка: усі електронні плати, блоки живлення та DC-DC стабілізатори LM2596S розміщуються всередині пило- та вологозахищеної металевій шафи керування із класом захисту не нижче IP65, що унеможливорює випадковий дотик до струмоведучих частин. Шафа обов'язково замикається на ключ.

Апаратний захист: вхідні кола живлення 220 В захищаються двополюсним автоматичним вимикачем та пристроєм захисного вимкнення (УЗО) із струмом спрацювання 30 мА, що захищає персонал при витоках струму на корпус.

2. Заходи забезпечення механічної безпеки

Контур кінцевих вимикачів: програмно-апаратний комплекс обмеження кутів ходу на базі датчиків SQ1–SQ4 миттєво знеструмлює приводи при досягненні крайніх просторових положень, запобігаючи руйнуванню редукторів та металоконструкцій.

Програмний метеозахист: при комутації тумблера «Шторм» (імітація анеометра SE2-1) система автоматично перериває оптичне стеження та за 48 секунд складає панель у горизонтальне положення, мінімізуючи парусність та ризик завалення щогли.

3. Заходи безпеки під час виконання висотноналагоджувальних робіт з приставних драбин

Для повної ліквідації ризиків травматизму під час регламентного обслуговування щогли трекера, всі роботи з переносних та приставних драбин мають суворо регламентуватися вимогами НПАОП 0.00-1.15-07 («Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті»):

- Технічний стан пристроїв: до експлуатації допускаються лише інвентарні металеві або дерев'яні драбини, що пройшли регулярні випробування (статичним навантаженням 1200 Н), мають інвентарний номер та надійно закріплені гострі металеві наконечники (для встановлення на ґрунт) або гумові башмаки (для твердого покриття).

- Геометрія встановлення: приставна драбина повинна встановлюватися під кутом нахилу до горизонтальної площини від 60° до 75°. Довжина драбини має забезпечувати можливість виконання робіт персоналом, стоячи на сходинці, розташованій на відстані не менше 1 метра від верхнього кінця драбини. Працювати з двох верхніх сходинок суворо заборонено.

- Організація страховки: при виконанні робіт на висоті понад 1,3 м з приставної драбини, електромонтер зобов'язаний застосовувати запобіжний безлямковий або лямковий пояс (ДСТУ EN 361), закріплений карабіном за надійні елементи конструкції щогли або силові анкерні точки трекера.

- Супровід робіт: виконання робіт з приставної драбини на висоті дозволяється виключно ланкою у складі не менше двох осіб, при цьому другий працівник (страхувальник) повинен перебувати внизу в захисній касці, утримувати драбину в стійкому положенні та контролювати зону можливого падіння інструменту. Підйом важкого інструменту або блоків автоматики по сходинках вручну забороняється — для цього має застосовуватися канат та спеціальний такелажний мішок.

4.3. Розрахунок захисного заземлення або блискавкозахисту установки

Оскільки сонячний трекер встановлюється на відкритій місцевості та має високу вертикальну металеву щоглу, виникає серйозна небезпека ураження персоналу внаслідок виносу потенціалу на корпус при пробіі логічних або силових кіл, а також прямих ударів блискавки в раму панелі.

Відповідно до вимог ПУЕ:2017 та ДСТУ Б В.2.5-82:2016, для захисту людей від ураження при дотику до металоконструкцій, що за звичайних умов не перебувають під напругою, необхідно виконати штучний контур захисного заземлення. Розрахунковий опір заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000 В не повинен перевищувати $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$.

1. Вихідні дані для розрахунку

- Тип заземлювачів: вертикальні стрижні (сталь кругла) завдовжки $l = 2,5 \text{ м}$, діаметром $d = 16 \text{ мм}$.
- Горизонтальний з'єднувач: сталева смуга перерізом $40 \times 4 \text{ мм}$, глибина закладання у ґрунт $h_0 = 0,7 \text{ м}$.
- Характеристика ґрунту: суглинок із базовим питомим опором $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
- Кліматична зона України: II зона. Коефіцієнт сезонності для вертикальних електродів $\psi_v = 1,3$; для горизонтальної смуги $\psi_g = 1,8$.

2. Розрахунок контуру заземлення

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних стрижнів з урахуванням промерзання та висихання:

$$\rho_{\text{раз}} = \rho \cdot \psi_v = 100 \cdot 1,3 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Визначаємо глибину занурення середини вертикального електрода від поверхні землі:

$$h = h_0 + \frac{l}{2} = 0,7 + \frac{2,5}{2} = 1,95 \text{ м}$$

Обчислюємо опір розтіканню струму одного поодинокого вертикального заземлювача за формулою:

$$R_v = \frac{\rho_{\text{раз}}}{2\pi l} \cdot \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4h+l}{4h-l}\right) \right]$$

Підставляємо числові параметри у формулу:

$$R_v = \frac{130}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.5} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 2.5}{0.016} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 1.95 + 2.5}{4 \cdot 1.95 - 2.5} \right) \right] = 8.28 \cdot [5.74 + 0.33] = 50.2 \text{ Ом}$$

Опір одного вертикального стрижня становить $R_v = 50,2$ Ом. Для досягнення цільових 4 Ом нам потрібен груповий контур. Прийmemo розміщення електродів по контуру «квадрат» навколо щогли трекера із відстанню між стрижнями $a = 5$ м (відношення віддалі до довжини $a/l = 2$). Для цієї конфігурації коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів становить $\eta_v \approx 0,72$.

Визначаємо попередню необхідну кількість вертикальних електродів без урахування провідної горизонтальної смуги:

$$n_0 = \frac{R_v}{R_{\text{доп}} \cdot \eta_v} = \frac{50.2}{4 \cdot 0.72} = 17.4 \rightarrow \text{приймаємо 18 стрижнів}$$

Для з'єднання 18 стрижнів, розставлених по периметру з кроком 5 м, загальна довжина горизонтальної сталевий смуги становитиме:

$$L_g = n_0 \times a = 18 \times 5 = 90 \text{ м}$$

Розрахуємо власної опір розтіканню цієї горизонтальної смуги. Розрахунковий опір ґрунту для смуги: $\rho_{\text{раз.g}} = \rho \cdot \psi_d = 100 \cdot 1,8 = 180 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Ширина смуги $b = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$.

$$R_v = \frac{\rho_{\text{раз.g}}}{2 \cdot \pi \cdot L_g} \cdot \ln \left(\frac{L_g^2}{b \cdot h_0} \right) = \frac{180}{2 \cdot 3.14 \cdot 90} \cdot \ln \left(\frac{90^2}{0.04 \cdot 0.7} \right) = 4.0 \text{ Ом}$$

Враховуючи коефіцієнт використання горизонтальної смуги у груповому контурі $\eta_g \approx 0,40$, визначимо результуючий еквівалентний опір усього штучного заземлювального пристрою САК:

$$R_{\text{сум}} = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + n_0 \cdot R_g \cdot \eta_v} = \frac{50.2 \cdot 4.0}{50.2 \cdot 0.4 + 18 \cdot 4.0 \cdot 0.72} = 2.79 \text{ Ом}$$

3. Висновок за результатами розрахунку

Оскільки отриманий сумарний опір штучного контуру заземлення сонячного трекера ($R_{\text{сум}} = 2,79 \text{ Ом}$) є меншим за максимально допущені нормативами ПУЕ 4,0 Ом ($2,79 \text{ Ом} < 4,0 \text{ Ом}$) розроблена конфігурація групового заземлювача є повністю надійною.

Впровадження розрахованого контуру (18 вертикальних сталевих стрижнів завдовжки 2,5 м, об'єднаних смугою 40×4 мм методом зварювання) гарантує 100% захист обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом та забезпечує ефективний відвід грозових розрядів блискавки у землю.

4.4. Заходи щодо пожежної безпеки та безпечної експлуатації електроустановок

Пожежна безпека на технологічному майданчику експлуатації автоматизованого сонячного трекера організована відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та «Правил пожежної безпеки в Україні» (НАПБ А.01.001-2014).

Основними пожежонебезпечними факторами у проєктованій системі є виникнення великих перехідних опорів у місцях болтових та гвинтових з'єднань силових кабелів актуатора 12 В, електричний пробій напівпровідникових релейних ключів драйвера через перегрів, а також термічне руйнування ізоляції кабельних шлейфів унаслідок тривалого впливу сонячної радіації та механічного тертя об рухомі вузли щогли.

Для запобігання пожежам та їх швидкої локалізації в системі автоматизації реалізовано такі заходи:

Конструктивна локалізація вогню: Корпус шафи керування виконано з листової негорючої сталі, а всі внутрішні монтажні шасі, клемні колодки та корпуси допоміжних реле виготовлені з термостійких полімерів, що не підтримують горіння (клас стійкості до займання UL94-V0). У разі виникнення внутрішньої електричної дуги або короткого замикання сталевий корпус шафи надійно обмежує зону горіння, запобігаючи перекиданню полум'я на конструкцію сонячних панелей та суху траву навколо трекера.

Правильний вибір та захист кабельних ліній: Для комутації силових кіл постійного струму використано мідний гнучкий кабель марки PV-1F із подвійною ізоляцією, яка є стійкою до жорсткого ультрафіолетового випромінювання та атмосферних опадів. Переріз жил розраховано за умов нагріву з інженерним запасом по струму не менше 35% від максимального струму навантаження актуатора при блокуванні штока. Усі кабельні траси від шафи керування до рухомої платформи прокладені в захисних гнучких гофрованих трубах із самозатухаючого полівінілхлориду (ПВХ), які зафіксовані пластиковими хомутами з урахуванням радіусів вигину рухомого шлейфа, що повністю виключає їх перетирання та залом.

Програмно-апаратний захист від теплового перевантаження: Захист від надструмів короткого замикання в колі 12 В актуатора реалізовано встановленням плавкого запобіжника номіналом 5 А. Крім того, вхідний опис загального алгоритму програми передбачає дискретні технологічні паузи ($\text{delay}(120)$), що знижує частоту перемикання реле та запобігає тепловому перевантаженню напівпровідникових елементів.

Оснащення первинними засобами пожежогасіння: Технологічний майданчик сонячного трекера в обов'язковому порядку комплектується пожежним щитом з інструментом. Безпосередньо поблизу шафи керування та щогли трекера розміщуються первинні засоби пожежогасіння, призначені для гасіння електроустановок — вуглекислотні вогнегасники марок ОУ-3 або ОУ-5 (міжнародне маркування — ВВ-2 та ВВ-3) або порошкові вогнегасники ОП-5 (ВВП-5).

Хімічні та інженерні переваги використання вуглекислотних вогнегасників:

Вуглекислота (діоксид вуглецю CO_2) перебуває у вогнегаснику в зрідженому стані під тиском. При активації вона моментально переходить у газоподібний снігоподібний стан, різко знижуючи температуру в зоні горіння до -70°C і витісняючи кисень, що призводить до негайного згасання полум'я.

Завдяки діелектричним властивостям газу CO_2 , вуглекислотні вогнегасники дозволяють безпечно проводити гасіння пожеж в електроустановках, що перебувають під напругою до 1000 В, без ризику ураження струмом оператора (через струмись вогнегасної речовини).

На відміну від водних, піноуткових чи деяких порошкових речовин, вуглекислотний газ є абсолютно чистим і не залишає після себе бруду чи паразитних хімічних нальотів. Він повністю випаровується в повітря, що дозволяє зберегти працездатність дорогої мікропроцесорної техніки (контролера Arduino, дисплея, плат розширення), яка не була пошкоджена безпосередньо вогнем.

Примітка: використання хімічно-пінних або водних вогнегасників на майданчику трекера суворо заборонено, оскільки вода та піна є провідниками електричного струму і їх використання призведе до коротких замикань,

вибухового руйнування плат та смертельного ураження людини, що здійснює гасіння.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем шляхом розробки та дослідження інформаційно-керуючої системи автоматичного двоосьового орієнтування (сонячного трекера) на базі сучасних мікропроцесорних засобів.

За результатами виконання проєкту отримано такі основні теоретичні та практичні результати:

1. Проведено глибокий аналітичний огляд сучасних методів стеження за сонячним диском. Доведено, що комбінація активного диференціального оптичного методу із програмно-апаратними контурами аварійного метеозахисту є найбільш ефективним рішенням для кліматичних умов України, оскільки забезпечує максимальний приріст генерації електроенергії (до 35–40% порівняно зі статичними СЕС) за помірної капіталомісткості системи.

2. Розроблено та обґрунтовано апаратну архітектуру технічного забезпечення системи автоматичного керування. Для промислового рівня обрано надійний низьковольтний лінійний актуатор АК-SY-A04B-F3-12V із вбудованими механічними кінцевиками, а для вимірювального вузла - напівпровідникові фоторезистори GL5528. Схемотехнічне розведення інтерфейсу індикації LCD 1602 через розширювач портів PCF8574 по шині I2C дозволило вивільнити дефіцитні цифрові порти мікроконтролера для контурів безпеки.

3. Синтезовано дискретний трипозиційний релейний закон керування із зоною нечутливості. Математично обґрунтовано параметри алгоритму (програмна зона толерантності $DEAD_ZONE = 45$ часток АЦП, крок інтегрування кута $STEP_ANGLE = 1^\circ$, період дискретизації $LOOP_DELAY = 120$ мс). Розрахунки підтвердили повну стійкість САК до виникнення автоколивань (ефекту «мисливства» приводу) та завад оптичних сенсорів, що мінімізує знос редукторів і власне енергоспоживання автоматики.

4. Створено та верифіковано інтерактивну комп'ютерну модель трекера у середовищі Tinkercad Circuits. Симуляційні випробування у реальному часі

повністю підтвердили працездатність принципової електричної схеми та розробленого програмного забезпечення на базі Arduino Uno R3. Експериментально доведено 100% надійність роботи алгоритму розподілу пріоритетів безпеки: примусове паркування панелі за сигналом анемометра (пін D8) та блокування реверсу двигунів при спрацюванні кінцевих вимикачів (піни D4–D7) відпрацьовують безконфліктно.

5. Виконано експертизу охорони праці та пожежної безпеки. Проведено інженерний розрахунок штучного захисного заземлення металоконструкції щогли трекера. Отриманий сумарний опір групового заземлювача (18 вертикальних електродів довжиною 2,5 м) становить 2,79 Ом, що повністю задовольняє суворим вимогам ПУЕ ($< 4,0$ Ом) та гарантує надійний захист персоналу від ураження струмом і грозових розрядів блискавки. Розроблено правила безпечного проведення робіт на висоті з приставних драбин та заходи пожежогасіння електроустановок під напругою до 1000 В.

Практична цінність роботи полягає у створенні універсального, повністю працездатного алгоритму та схемотехнічного шаблону двоосьового сонячного трекера. Розроблений лабораторний прототип може бути використаний як навчально-демонстраційний стенд на кафедрі ЕІА ДУЕТ, а запропоновані інженерні рішення силової частини - впроваджені під час проектування та модернізації об'єктів малої відновлюваної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Джерела кирилицею:

1. Анерн Солар. Трекери з фіксованим нахилом проти одноосьових: прибутковість, ризик, операційні витрати [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/fixed-tilt-vs-single-axis-trackers> (дата звернення: 28.05.2026).
2. Безвесільна О. М. Мікропроцесорні пристрої : підручник / О. М. Безвесільна, Ю. В. Ткачук. — К. : Кондор, 2017. — 312 с.
3. Годинники реального часу серії DS3231. Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal. Datasheet / Maxim Integrated. — 2015. — 20 p. — URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf> (дата звернення: 14.05.2026).
4. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електроустановки низької напруги. Заземлювальні пристрої захисні. Проектування, монтаж та перевірка. — К. : Мінрегіон України, 2017. — 83 с.
5. ДСТУ EN 62817:2017. Система трекерів сонячна. Кваліфікація проекту (EN 62817:2014, IDT). — К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019. — 54 с.
6. Energy-charts. Виробництво електроенергії для населення у 2025 році [Електронний ресурс]. — URL: <https://energy-charts.info/?l=de&c=DE> (дата звернення: 28.05.2026).
7. Журнал UNJ. Порівняння ефективності стаціонарних сонячних фотоелектричних систем, а також одноосьових та двоосьових сонячних трекерів [Електронний ресурс]. — URL: <https://journal.unj.ac.id/unj/index.php/jkem/article/download/50611/19195/148681> (дата звернення: 28.05.2026).
8. Інститут сонячних енергетичних систем Фраунгофера ISE. Дані про відновлювану енергетику [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/renewable-energy-data.html> (дата звернення: 28.05.2026).
9. Квасніков В. П. Автоматизація технологічних процесів : підручник / В. П. Квасніков, Л. М. Матвієнко. — К. : НАУ, 2019. — 284 с.
10. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI // Відомості Верховної Ради України. — 2013. — № 34-35. — Ст. 458.
11. Лавренцов А. О. Проектування систем автоматизації на базі платформи Arduino : навч. посіб. / А. О. Лавренцов. — Дніпро : Середняк Т. К., 2021. — 168 с.
12. Лінійні актуатори постійного струму серії АК-SY. Технічний опис та габаритні розміри приводу АК-SY-A04B-F3-12V. — 2022. — 8 с.
13. Лукутін Б. В. Системи автоматичного керування геліоустановками : монографія / Б. В. Лукутін, М. О. Попова. — Львів : Світ, 2018. — 196 с.
14. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки in Україні : затверджено Наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. — К. : Форт, 2015. — 142 с.
15. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті : затверджено Наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 27.03.2007 № 62. — К. : Основа, 2007. — 48 с.

16. НПА ОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : затверджено Наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. — К. : Інфодиск, 2008. — 118 с.
17. Оптоелектронні прилади комутації. Оптопарі транзисторні серії PC817. Datasheet / Sharp Microelectronics. — 2016. — 12 р.
18. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. — К. : Либідь, 2007. — 456 с.
19. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Вид. 4-те, перероб. і доп. — Х. : Форт, 2017. — 760 с.
20. Розширювачі портів введення-виведення для шини I2C. Мікросхема PCF8574 Remote 8-bit I/O Expander. Datasheet / NXP Semiconductors. — 2019. — 28 р. — URL: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574_PCF8574A.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
21. Системи відновлюваної енергетики. Фотоелектричні модулі та напівпровідникові сенсори GL5528 : довідник / під ред. К. М. Васильєва. — К. : Техніка, 2020. — 210 с.
22. Хорвиц П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хорвиц, У. Хилл. — Изд. 7-е. — М. : Мир, 2016. — 704 с.
Джерела латиницею:
23. Anernstore. Що відбувається всередині сонячного елемента, коли на нього потрапляє світло? [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.anernstore.com/blogs/diy-solar-guides/inside-solar-cell-light> (дата звернення: 28.05.2026).
24. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet / Microchip Technology Inc. — 2020. — 294 р. — URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega328P-Data-Sheet-10002061B.pdf> (дата звернення: 10.05.2026).
25. electro100. Сонячні трекири: ефективність та застосування в Україні [Електронний ресурс]. — URL: <https://electro100.ua/blog/sonyachni-trekeri-efektivnist-ta-zastosuvannya-v-ukraini> (дата звернення: 28.05.2026).
26. GameChange Solar. Розумніший підхід до ризиків, пов'язаних з вітровою фотоелектричною енергетикою [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.gamechangesolar.com/news/built-for-the-unexpected-a-smarter-approach-to-wind-driven-pv-risks> (дата звернення: 28.05.2026).
27. Mdpi. Огляд та порівняльний аналіз систем відстеження сонячної енергії [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/10/2553> (дата звернення: 28.05.2026).
28. newenergie. Сонячний трекер із вітростійкістю: покращений захист в екстремальних погодних умовах [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.newenergie.co.in/blog/tracker-movement-on-heavy-wind-speeds> (дата звернення: 28.05.2026).
29. Optics. Впровадження сонячної енергії в Європі [Електронний ресурс]. — URL: <https://optics.org/news/16/7/18> (дата звернення: 28.05.2026).
30. rvcase. Стежачі сонячні панелі проти стаціонарних: як вибрати правильну систему кріплення для наземних фотоелектричних проєктів [Електронний

ресурс]. — URL: <https://pvcase.com/blog/fixed-tilt-vs-tracker-system-comparison-for-ground-mounted-pv-systems> (дата звернення: 28.05.2026).

31. Reda I. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications / I. Reda, A. Andreas // Solar Energy. — 2004. — Vol. 76, Issue 5. — P. 577–589.
32. smeirenewables. Системи відстеження проти фіксованого нахилу: що найкраще для великомасштабних сонячних проєктів? [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.smeirenewables.co.za/tracker-systems-vs-fixed-tilt/> (дата звернення: 28.05.2026).
33. Solartrackersystem. Одноосьові та двоосьові сонячні трекери [Електронний ресурс]. — URL: <https://solartrackersystem.com/single-axis-vs-dual-axis-trackers/> (дата звернення: 28.05.2026).
34. solartechonline. Системи сонячного трекера [Електронний ресурс]. — URL: <https://solartechonline.com/blog/solar-tracker-system-guide/> (дата звернення: 28.05.2026).
35. Visualizing and Simulation of Embedded Microcontroller Systems with Tinkercad Circuits / J. Smith, A. Johnson // International Journal of Computer-Integrated Technologies. — 2022. — No. 4. — P. 45–52.

ДОДАТКИ

Додаток А Структурна схема технічних засобів

Додаток Б Функціональна схема автоматизації

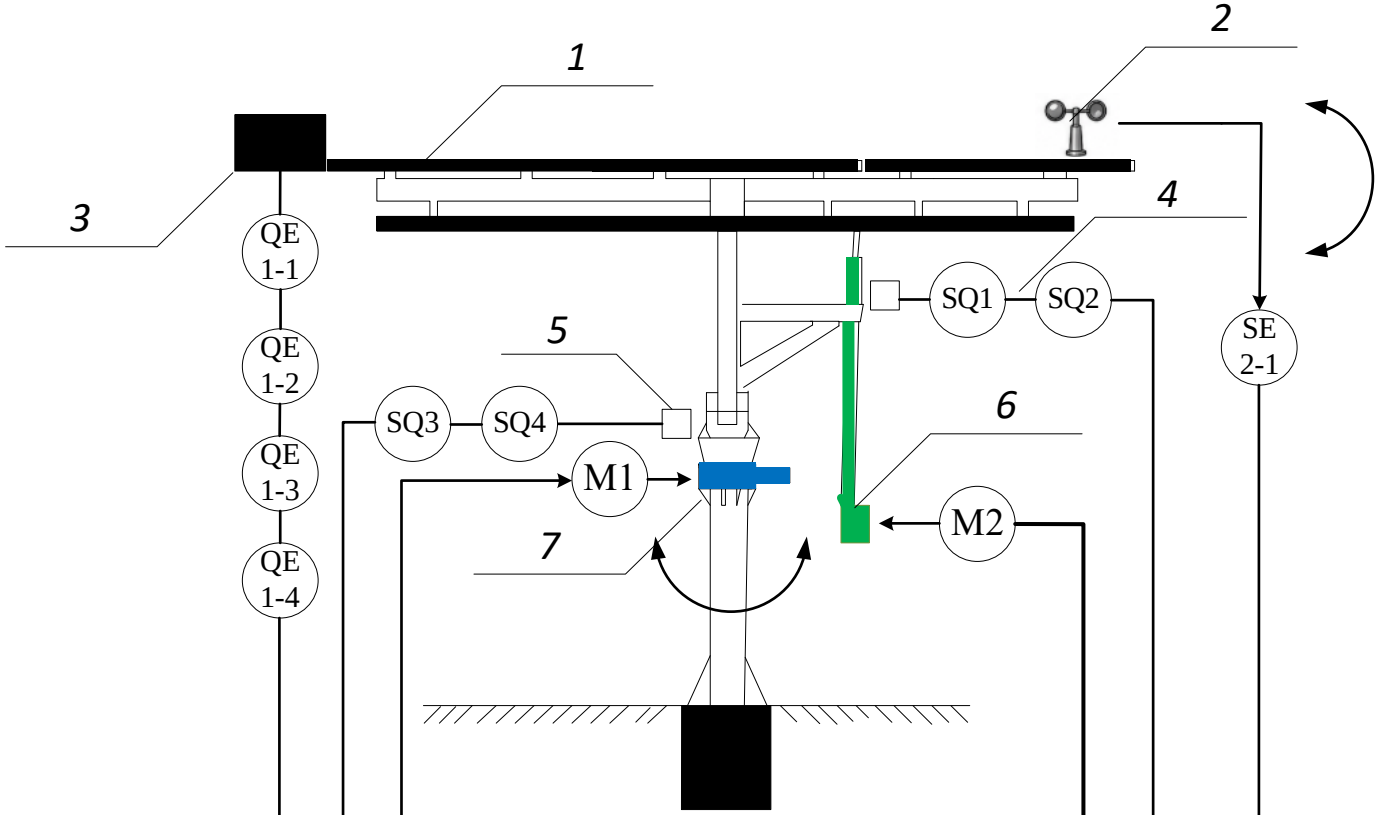
Додаток В Принципова електрична схема

Додаток Г Блок-схема алгоритма роботи



						ВРБ.151.239-ст.07.Е1.1			
						Структурна схема технічних засобів	Літера	Маса	Масштаб
Зм	Арк	№ документа	Підпис	Дата					
Розробив		Фурзенко О.А.							
Перевірив		Соломенко А.Г.							
							Аркуш	Аркушів	
Н.контр		Соломенко А.Г.					ННТІ ДУЕТ		
Затвердив		Модло Є.О.					Каф.ЕІА		
							гр.АВ-22		

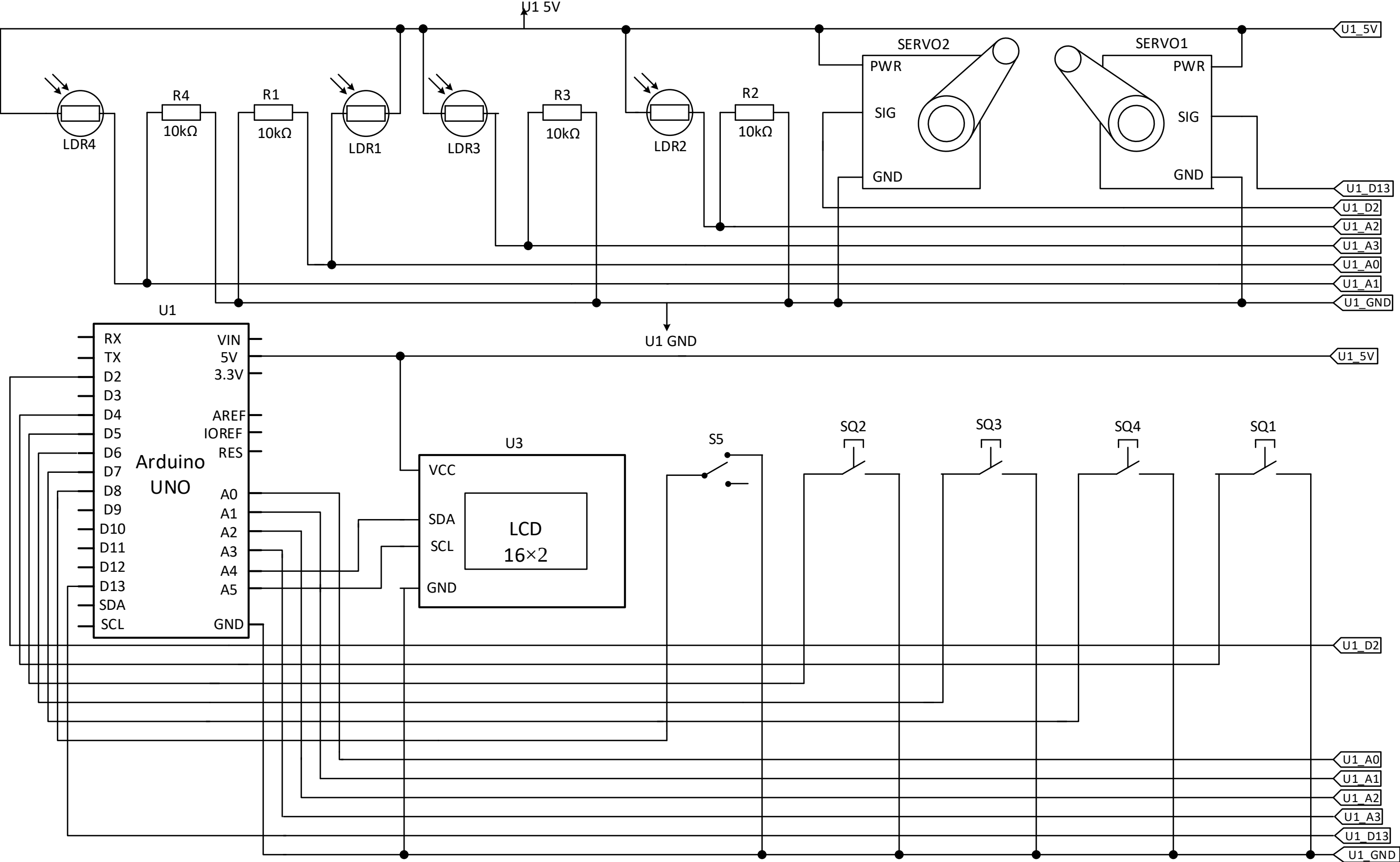
Функціональна схема автоматизації



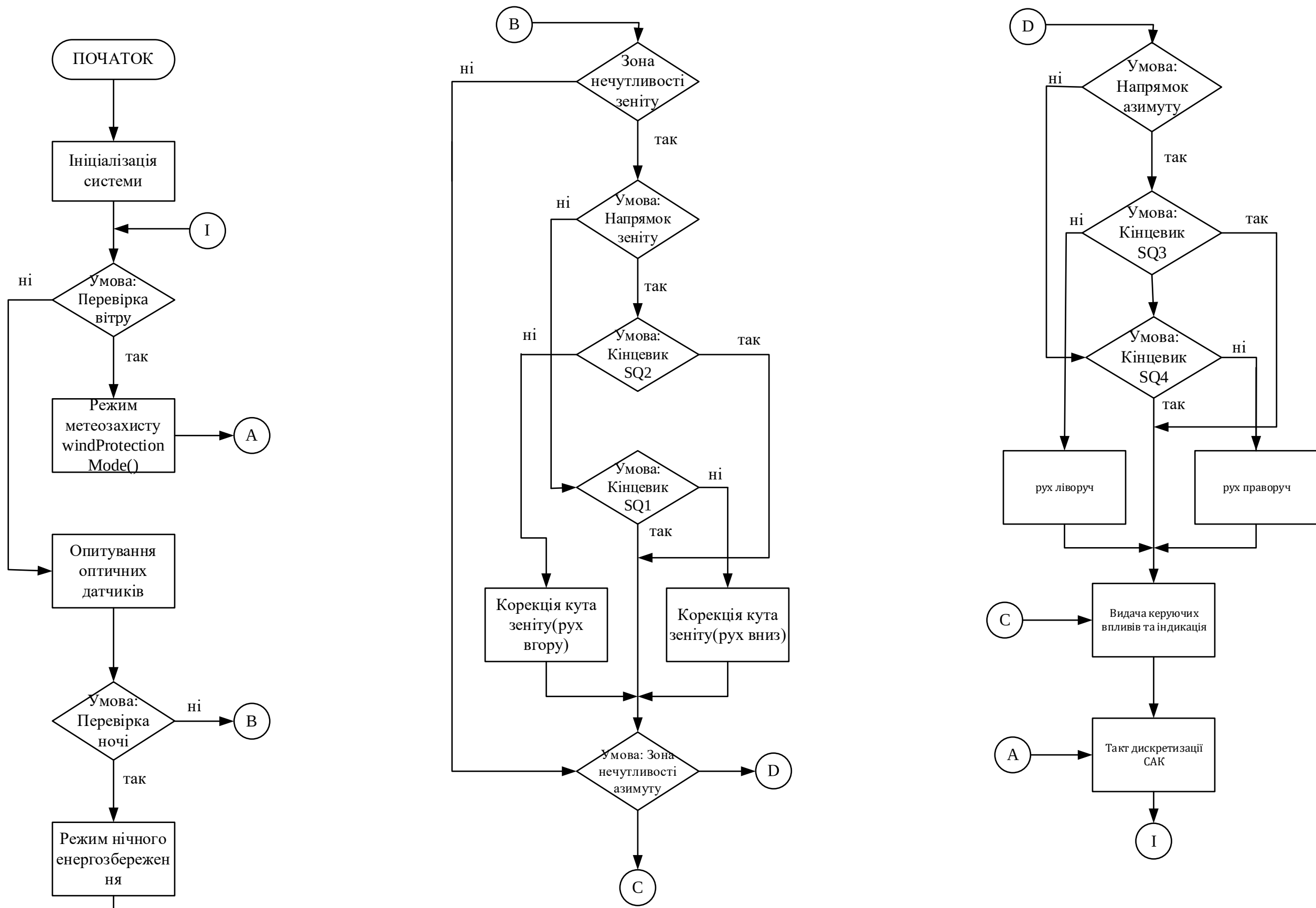
За місцем						
Мікроконтролер	AI					
	DI					
	AO					
	DO					
ПК						

№	Найменування	К-сть
1	фотоелектрична панель (PV)	1
2	датчик швидкості вітру / анемометр	1
3	QE1-1...QE1-4 — датчики освітленості LDR	4
4	SQ1, SQ2— кінцеві вимикачі горизонтальної осі	2
5	SQ3, SQ4 — кінцеві вимикачі вертикальної осі	2
6	M1 — привід азимутального повороту панелі	1
7	M2 — привід кута нахилу панелі	1

					ВРБ.151.239-см.07.Е1.2				
					Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування Функціональна схема автоматизації	Літера		Маса	Масштаб
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Фурзенко О.А.							
Перевірів		Соломенко А.Г.							
					Функціональна схема автоматизації	Аркуш		Аркушів	
						ННТІ ДУЕТ			
						Каф.ЕІА			
						гр.АВ-22			
Н.контр		Соломенко А.Г.							
Затвердив		Модло Є.О.							



					ВРБ.151.239-см.07.Е1.3			
					Принципова електрична схема лабораторного прототипу модуля керування сонячним трекером			
Зм	Арк	№ документа	Підпис	Дата	Літера			
Розробив	Фурзенко О.А.							
Перевірів	Соломенко А.Г.				Маса			
					Масштаб			
Н.контр	Соломенко А.Г.				Аркуш			
Затвердив	Модло Є.О.							
					ННТІ ДУЕТ			
					Каф.ЕІА			
					гр.АВ-22			



					ВРБ.151.239-см.07.Е1.4						
Зм	Арк	№ документа	Підпис	Дата	Блок-схема алгоритма роботи	Літера			Маса	Масштаб	
Розробив		Фурзенко О.А									
Перевірів		Соломенко А.Г									
						Аркуш			Аркушів		
Н.контр		Соломенко А.Г				ННТІ ДУЕТ					
Затвердив		Модло С.О.				Каф.ЕІА					
						гр.АВ-22					

ЗГОДА здобувача вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету

Я, Фурзенко Олександр Анатолійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота :
«Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомлений.

19.06.2026 р.  О. Фурзенко

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бакалавр

(бакалавра, магістра)

Студента Фурзенко Олександра Анатолійовича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

групи АВ-22

Тема випускної кваліфікаційної роботи: Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

пояснювальна записка	<u>77 с;</u>
таблиць	<u>6;</u>
схем і рисунків	<u>12;</u>
листів графічної частини(демонстраційного матеріалу)	<u>4.</u>

Якісні відмінності кваліфікаційної роботи бакалавра

Кваліфікаційна робота Фурзенко О.А. відзначається високим рівнем інженерного опрацювання, системністю викладу матеріалу та чітко вираженою практичною спрямованістю. Автор продемонстрував глибокі знання в галузі мікропроцесорної техніки, електроніки та теорії автоматичного керування при розробці завадостійкої системи керування двоосьовим сонячним трекером. Робота виконана самостійно, на високому науково-технічному рівні, а її результати мають реальну практичну цінність для модернізації сучасних геліоенергетичних установок.

Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра

Як побажання, у роботі доцільно було б ширше розглянути можливість інтеграції бездротових протоколів передачі телеметрії (наприклад, Wi-Fi або LoRa) для віддаленого моніторингу СЕС. (Це класичний «безпечний» недолік, який показує перспективу розвитку і не занижує оцінку) .

**Характеристика загальної, спеціальної і виробничої підготовки автора
випускної кваліфікаційної роботи , ступінь самостійності виконання,
уміння користуватися літературними матеріалами**

Студент Фурзенко О.А. за час проектування виявив високу самостійність,
ініціативність, вміння працювати з технічною документацією та сучасними
інструментами комп'ютерного моделювання автоматизованих систем

Можливість використання кваліфікаційної роботи

Результати роботи та розроблений лабораторний прототип можуть бути
використані у навчальному процесі кафедри ЕІА при вивченні
мікроконтролерних систем автоматизації, а також при проектуванні
промислових геліосистем малої та середньої потужності

Оцінка кваліфікаційної роботи

Керівник _____ Соломенко А.Г.

(прізвище, ім'я та по-батькові)

_____ д-р філософії з фізики, доц.

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

_____ (підпис)

« ____ » _____ 20____ р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу _____ бакалавра
(бакалавра, магістра)
Студента _____ Фурзенко Олександра Анатолійовича
(прізвище, ім'я та по-батькові)

Групи АВ-22	
Тема кваліфікаційної роботи	бакалавра (бакалавра, магістра)
Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування	
Тема спеціальної частини кваліфікаційної роботи	бакалавра (бакалавра, магістра)
Розробка двохосьових систем стеження за Сонцем	
Переваги кваліфікаційної роботи	бакалавра (бакалавра, магістра)
Представлена кваліфікаційна робота Фурзенко О.А. є завершеним, комплексним дослідженням, що вирішує практичну задачу автоматизації двоосьових геліоустановок. Робота виконана на високому інженерному рівні та має низку суттєвих переваг: Глибоке обґрунтування схемотехніки: автор раціонально підійшов до проектування принципової схеми модуля керування на базі ATmega328P, використавши мікросхемний розширювач портів PCF8574 для інтеграції дисплея LCD 1602 по послідовній шині I2C. Ефективність алгоритмічних рішень: синтезований дискретний трипозиційний релейний закон керування із зоною нечутливості в 45 одиниць АЦП забезпечує чітке позиціонування сонячної панелі, повністю виключаючи шкідливі автоколивання від мікрошумів атмосфери та хмарності. Надійність багаторівневого захисту: у керуючому коді та схемах успішно реалізовано алгоритми безпеки — пріоритетне паркування за сигналом анемометра при штормовому вітрі, перехід у режим нічного енергозбереження, а також блокування реверсу актуаторів	
Недоліки кваліфікаційної роботи	бакалавра (бакалавра, магістра)
Як розвиток проєкту, у системі збору даних та індикації було б корисним впровадження бездротових інтерфейсів (наприклад, Wi-Fi або LoRa) для інтеграції трекера в загальну мережу моніторингу диспетчерського пункту CEC (SCADA)	
Рекомендації: результати роботи можуть стати основою для створення реальної системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування .	
Рецензент	

(прізвище, ім'я та по-батькові)

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ДОВІДКА

про підготовку студента-випускника

Фурзенко Олександра Анатолійовича

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр, назва)

Назва кваліфікаційної роботи бакалавр

(бакалавра, магістра)

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра:

(бакалавра, магістра)

Автоматизація системи орієнтації фотоелектричної панелі за допомогою мікропроцесорного керування

Керівник кваліфікаційної роботи: д-р філософії з фізики, доц. Соломенко А.Г.

(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

№ з/п	Найменування розділу проекту (роботи)	Консультант	Зараховано / не зараховано	Дата	Підпис консультанта	Примітка
1	Аналітична частина					
2	Основна частина					
3	Охорона праці					
4						
5						
6						
7						
8						

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

151-15д-2026врб

Автор

151-15д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.О.

ІД документу

334249741

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/10/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

1.33%

1.33%

КП 1

14539

Кількість слів

0.74%

0.74%

КЦ

118936

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв



40

Інтервали



0

Мікропробіли



0

Білі знаки



0

Парафрази (SmartMarks)



11

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	МКР_Щербина_Андрій_Володимирович_ЕЕМ-21 5/26/2026	35 (0.24 %)