МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка системи керування положенням контактної сонячної панелі

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1713-02
спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Електроніка
(код і назва освітньої програми)

Сапьянов Д. В.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н. доц. Шмагій С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент зам. дир. ПП НВП „Екотех" Шершов С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)
Освітня програма Електроніка
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Критська Т.В.
"9" 02 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Сапьникову Дмитро Вячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка системи керування положенням компактної сонячної панелі

керівник роботи к.т.н. доц. Шматій С.П.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "23" грудня 2025 року № 1830-с

2 Строк подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи натура RB кількість вісей - 2

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз методів підвищення ефективності, розробка системи стеження та контролю орієнтації фотоелектричних модулів, розрахункова частина, конструкторсько-технологічна частина, економічне обґрунтування

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Схема електрична структурна, схема електрична принципова
Моделювання сегментів, плата друкована, економічні показники
Охорона праці

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н. доц. Шмалій С.А.		
2	к.т.н. доц. Шмалій С.А.		
3	к.т.н. доц. Шмалій С.А.		
4	к.т.н. доц. Шмалій С.А.		
5	к.т.н. доц. Шмалій С.А.		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підготовка матеріалу 1 розділу	11.05.2026	
2	—//— 2 розділу	19.05.2026	
3	—//— 3 розділу	21.05.2026	
4	—//— 4 розділу	24.05.2026	
5	—//— 5 розділу	26.05.26	
6	Оформлення записки та графічного матеріалу	1.06.26	

Студент _____ Гальніков Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Шмалій С.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гуріна К.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Сторінок - 92, рисунків - 14, таблиць - 28, використаних джерел - 52.

СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДАТЧИК, ПОВОРОТНИЙ ПРИСТРІЙ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ГЕЛІОУСТАНОВКА, СЛІДКУЮЧИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

В дипломному проекті розроблено системи керування положенням компактної сонячної панелі з метою контролю оптимальної орієнтації фотоелектричного модулю на максимальний потік сонячного випромінювання для підвищення ефективності використання сонячної енергії. Розробка виконана на сучасній елементній базі з використанням сучасного мікроконтролеру.

Проведено необхідні технічні та економічні розрахунки та розроблені заходи з охорони праці та техногенної безпеки.

ЗМІСТ

Вступ 6
1 Аналіз методів та технологій підвищення ефективності малих фотоелектричних станцій 8
1.1 Дослідження потенціалу сонячної енергії в Запорізькій області 8
2 Розробка системи стеження та контролю орієнтації фотоелектричних модулів 18
2.1 Принцип роботи методу слідкування на основі диференціальних фотоелементів 18
2.2. Аналіз застосування пневматичних приводів у системах стеження за Сонцем 21
2.3 Розробка системи управління 22
2.4. Вибір та обґрунтування драйвера двигуна 31
2.5 Супервізор живлення мікроконтролера 35
3 Розрахункова частина 39
3.1 Розрахунок стабілізованого джерела напруги 49
3.1.1 Розрахунок випрямляча джерела живлення 41
3.1.2 Розрахунок параметрів вторинної обмотки трансформатора 42
3.1.3 Вибір магнітопроводу і розрахунок обмоток трансформатора 42
3.2 Моделювання пристрою управління 45
3.2.1. Загальна характеристика середовища Tinkercad 45
4 Конструкторсько-технологічна частина 49
4.1 Конструкція системи управління сонячною панеллю 49
4.2 Сучасний технологічний процес виготовлення та монтажу друкованих плат 51
4.3 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих

виробничих факторів 55
4.4 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів 57
4.5 Виробнича санітарія 60
4.6 Електробезпека 64
4.6.1 Розрахунок захисного заземлення 67
4.7 Пожежна та техногенна безпека 72
5. Економічне обґрунтування 76
5.1 Розшифровка суми витрат по статтям кошторису 76
5.2 Розрахунок собівартості серійного виробу проводиться на основі калькуляційних статей витрат 81
Висновки 84
Перелік використаних джерел 85
Додаток А 91
Додаток Б 92

ВСТУП

Однією з ключових глобальних проблем є забезпечення енергетичних потреб при мінімізації впливу на довкілля. Незважаючи на виснаження запасів викопного палива, світове споживання електроенергії продовжує зростати. Як зазначається у дослідженнях Nature, навіть провідні економіки, як-от Німеччина, змушені прискорювати перехід на відновлювані джерела енергії (ВДЕ) для досягнення вуглецевої нейтральності [1]. Використання традиційної енергетики супроводжується не лише обмеженістю ресурсів, але й значним забрудненням атмосфери, що викликає серйозні екологічні ризики [2].

Серед альтернативних джерел найбільш перспективною вважається сонячна енергетика завдяки її повсюдному поширенню, екологічній чистоті та значному ресурсному потенціалу: сонячна енергія, що надходить на Землю за тиждень, перевищує світові запаси всіх видів викопного палива [2]. Однак фотоелектричні модулі мають суттєвий недолік — їх ефективність прямо залежить від кута падіння сонячних променів, тому максимізація генерації можлива лише за умови постійного стеження за положенням Сонця. В умовах зміни положення Сонця протягом дня та сезону, статичні панелі втрачають значну частину потенційної генерації [3].

Для підвищення ефективності використовуються системи стеження (трекери), які орієнтують панель перпендикулярно до сонячних променів. Сучасні дослідження свідчать, що застосування двовісних систем стеження дозволяє збільшити виробіток енергії на 40-60% порівняно з нерухомими конструкціями [4]. Окремим викликом є розробка компактних та недорогих рішень, адаптованих для розподіленої генерації, складного рельєфу або побутового використання. Наприклад, компанія Nevados вже впроваджує трекери на нерівній місцевості, що раніше вважалося технічно складним [5].

Сучасний підхід до розробки такої системи керування положенням компактної сонячної панелі базується на поєднанні методів:

- Активного сенсорного контролю – із використанням диференціальних фоторезисторів (LDR) для виявлення максимальної освітленості [3, 6].

- Астрономічних алгоритмів – розрахунок траєкторії Сонця на основі GPS/GNSS даних (широта, довгота, час), що забезпечує базову орієнтацію навіть у хмарну погоду [7].

- Адаптивного керування – мінімізація помилки стеження з урахуванням енергоспоживання власних приводів та зовнішніх навантажень (наприклад, вітру) [6, 8].

Враховуючи вищезазначене, для розробки системи керування положенням компактної сонячної панелі поставлені наступні завдання:

- Аналіз методів та технологій підвищення ефективності малих фотоелектричних станцій на основі огляду сучасних наукових робіт (включно з підходами IoT та машинного навчання) [1, 3].

- Аналіз можливості використання гібридного алгоритму керування, що комбінує дані з астрономічного календаря та сигнали з датчиків освітленості (LDR) для компенсації похибок позиціонування [4, 7] для компактної сонячної панелі.

- Розробка програмно-апаратного комплексу на базі мікроконтролера (Arduino/STM32) з малопотужними сервоприводами, призначеного для роботи в автономних енергосистемах.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАЛИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

1.1 Дослідження потенціалу сонячної енергії в Запорізькій області

Сонячна енергетика є одним із напрямів відновлюваної енергетики, що базується на використанні енергії сонячного випромінювання для виробництва електричної, теплової або інших видів енергії.

До основних переваг сонячної енергетики належать висока надійність систем, відсутність потреби у паливі, екологічна безпечність та постійне вдосконалення технологій перетворення сонячної енергії. Крім того, розвиток виробництва фотоелектричних модулів сприяє поступовому зниженню їх вартості та підвищенню ефективності.

Разом із тим використання сонячної енергії має певні обмеження. Насамперед це залежність виробітку електроенергії від погодних умов і часу доби, а також необхідність застосування додаткових систем накопичення та перетворення енергії. Такі особливості впливають на загальну вартість сонячних енергетичних установок. Однак завдяки стрімкому розвитку технологій та зростанню обсягів виробництва обладнання собівартість сонячної електроенергії поступово знижується. Одночасно зі зростанням вартості традиційних енергоресурсів це підвищує конкурентоспроможність сонячної енергетики та розширює можливості її практичного застосування.

Сонце є практично невичерпним джерелом енергії для Землі. На поверхню планети безперервно надходить значний потік сонячного випромінювання, інтенсивність якого для площини, перпендикулярної до сонячних променів, залишається відносно стабільною.

Оцінка придатності проводилася методом зваженої суми з використанням кількох параметрів: даних кліматичних карт ERA5-Land, зокрема річної сумарної сонячної радіації (GHI), накопиченої температури вище 25 °C, середньорічної швидкості вітру та кількості річних опадів.

Додатково використовувалися «Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України» та дані Wikimapia щодо розташування великих діючих сонячних електростанцій в Україні [9, 10].

Результати показали, що значна частина території країни (понад 48%) має середній рівень придатності (оцінка 0,3–0,4). Загалом території, придатні для розміщення сонячних електростанцій, переважають над непридатними. Найбільш сприятливі умови спостерігаються в південних регіонах і на території Кримського півострова.

Також встановлено, що всі великі діючі сонячні електростанції України розташовані в зонах з оптимальними умовами, що підтверджує коректність моделі.

Крім того, виявлено, що такі області, як Одеська, Полтавська, Харківська, Запорізька, Дніпропетровська, Донецька та Луганська, мають добрі показники придатності (0,3–0,4), але використовуються недостатньо. Ці регіони мають значний потенціал для подальшого розвитку потужних сонячних енергетичних об’єктів [11].

Станом на 2026 рік енергетичний сектор України характеризується значним скороченням генеруючих потужностей. Згідно статистиці, станом на травень 2023 року втрати встановлених потужностей становили близько 27 ГВт [9].

Найбільш постраждалі енергетичні об’єкти розташовані у східних та південних регіонах країни, зокрема Запорізька атомна електростанція та Каховська гідроелектростанція. Сонячна енергетика також зазнала значних втрат: приблизно половина сонячних електростанцій була виведена з експлуатації.

Відновлення енергетичної інфраструктури є важливою умовою добробуту та подальшого розвитку держави. Проте будівництво традиційних джерел енергії, таких як гідро- та теплоелектростанції, потребує значних ресурсів. Натомість спорудження сонячних електростанцій може бути від-

носно швидким та економічно доступним завдяки сучасним технологіям і стандартизованим компонентам.

Сонячні електростанції характеризуються високою гнучкістю. Використання сонячної енергії сприяє зменшенню залежності від імпорту енергоресурсів та підвищує рівень енергетичної безпеки.

Вибір придатних місць для розміщення сонячних установок має вирішальне значення для максимізації виробництва електроенергії та підвищення ефективності систем. Дані дистанційного зондування Землі, зокрема супутникові знімки, надають цінну інформацію про кліматичні умови, рельєф місцевості та характер землекористування [12]. Аналіз таких даних [13–17] дає змогу визначати оптимальні території для ефективного розміщення сонячних електростанцій. Зокрема, перспективним напрямом автоматизації вибору місць для встановлення сонячних панелей є застосування сучасних моделей штучного інтелекту з високою точністю прогнозування [18].

В проведеній роботі проаналізовано придатність територій України для встановлення ефективних сонячних електростанцій із використанням даних дистанційного зондування Землі [9]. Основною метою роботи було визначення територій із найвищим потенціалом виробництва сонячної енергії. Додатково оцінювалось доцільність розміщення вже існуючих сонячних електростанцій в Україні для визначення загальної ефективності використання сонячної енергетики в країні.

Ефективність сонячних електростанцій залежить від взаємодії кількох ключових геологічних та кліматичних чинників. До кліматичних факторів належать дані про глобальну горизонтальну сонячну радіацію (GHI), температуру повітря, кількість опадів та швидкість вітру [19]. Серед геологічних факторів [17] враховуються висота місцевості над рівнем моря, крутизна схилів та затінення рельєфом [19].

Розподіл сумарної сонячної радіації по території України на основі аналізу даних приведено на рис. 1.1.

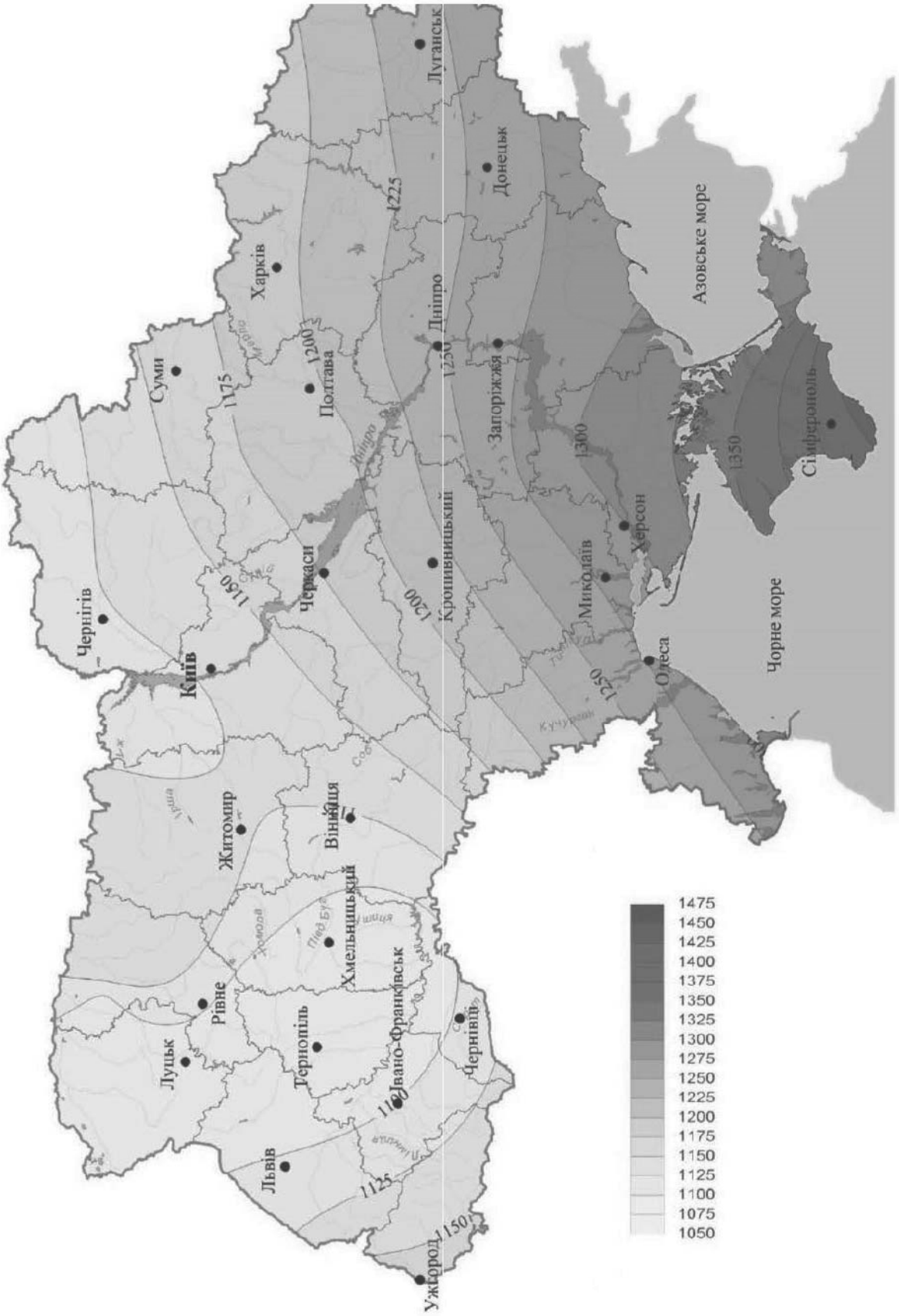


Рисунок 1.1 – Розподіл сумарної сонячної радіації по території України, кВт·год/м^2 на рік

У Запорізькій області тривалість сонячного сяйва за рік становить 2000 - 2200 годин.

Таблиця 1.1 – Тривалість сонячного сяйва

Місяці	Час доби, часи															
	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
Січень				0,3	3,3	6,2	8,1	9,7	9,8	9,8	9,8	7,4	0,9			
Лютий			0,1	1,7	5,3	8,6	10,3	10,8	11,0	11,1	10,2	8,9	4,4	0,5		
Березень			2,0	7,5	12,0	14,5	15,4	16,2	15,8	15,7	14,6	13,1	10,0	3,9	0,4	
Квітень		1,3	9,6	14,6	15,7	17,6	18,7	18,1	17,4	17,4	16,7	15,7	14,4	11,4	2,3	
Травень	0,6	8,5	15,5	18,0	19,5	20,8	21,3	21,0	20,6	21,0	20,4	19,9	19,1	17,5	12,0	1,0
Червень	1,7	15,0	20,3	22,5	23,7	24,0	23,9	24,3	23,3	23,2	22,1	21,4	20,5	19,6	15,6	2,7
Липень	1,1	15,0	21,8	25,4	26,1	26,5	26,8	27,0	26,0	26,0	25,6	25,0	24,1	22,0	16,3	1,8
Серпень		6,0	21,8	25,2	26,7	27,0	27,5	27,4	26,9	26,9	25,9	25,5	23,5	21,7	9,0	0,1
Вересень		0,4	10,5	20,1	22,8	24,1	24,2	24,2	23,7	23,7	23,1	22,5	21,1	13,2	0,5	
Жовтень			0,8	10,0	15,7	18,1	19,0	20,0	19,5	20,3	20,5	19,4	15,1	1,7		
Листопад				1,0	4,4	6,6	9,1	9,8	10,0	9,8	10,0	8,6	2,6			
Грудень				0,3	2,8	5,6	8,0	8,5	8,9	8,9	8,4	6,1	0,4			
Рік	3	46	102	147	178	200	213	217	213	214	207	194	156	112	56	6

Аналіз даних (рис. 1.2) показує, що найбільш сонячні місяці – травень-серпень, найменше сонця у листопаді-лютому.

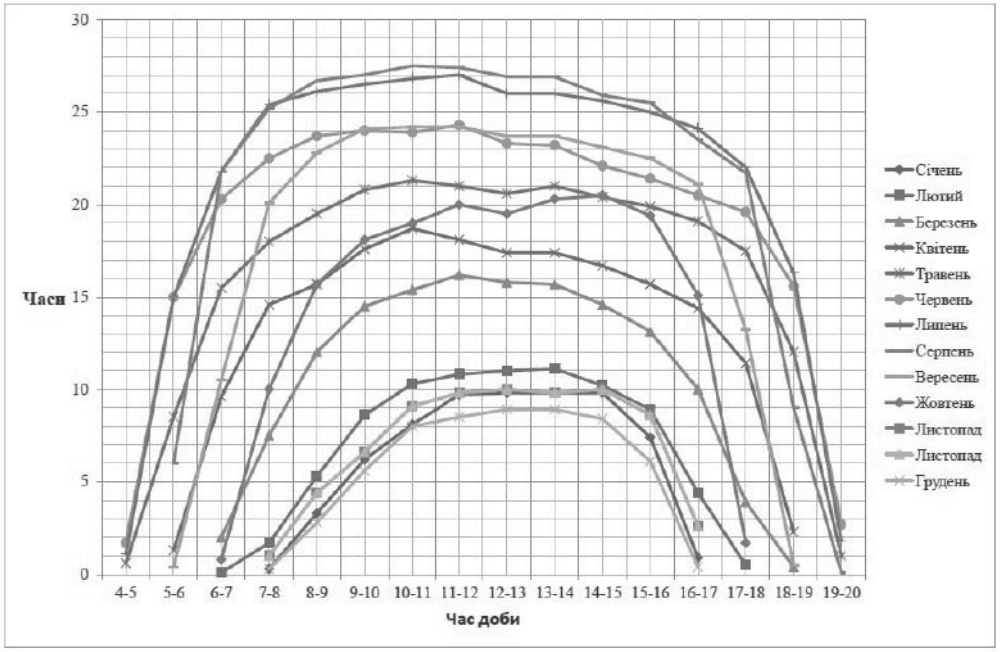


Рисунок 1.2 – Розподілення тривалості сонячного сяйва по місяцям

Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в Запорізькій області – 7 місяців (з квітня по жовтень). Тому фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися на протязі всього року.

Основним елементом сонячних електростанцій є сонячні фотоелектричні елементи. Це електронні прилади, що здійснюють пряме перетворення сонячного світла в електричну енергію. Енергія може використовуватися як безпосередньо різними навантаженнями постійного струму, так і запасатися в акумуляторних батареях для подальшого використання або покриття пікового навантаження, а також перетворюватися в змінний струм. Напруга сонячних батарей сягає десятків вольт, а потужність – десятків кіловат.

Більш великим елементом є фотоелектричні модулі (ФМ). Які складаються з кількох об'єднаних фотоелектричних елементів (перетворювачів). Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі – це прилади, принцип дії

яких заснований на фотоелектричному ефекті – явищі виникнення фото-ЕРС в електричному p-n переході при опроміненні його світловим потоком.

Залежно від матеріалу, конструкції і способу виробництва виділяють три покоління ФЕП:

- ФЕП першого покоління на основі пластин кристалічного кремнію. За способом виготовлення розрізняють полікристалічні і монокристалічні пластини кремнію. В даний час ФЕП першого покоління завдяки низької собівартості набули найбільшого поширення;
- ФЕП другого покоління на основі тонких плівок, дозволяють виготовляти гнучкі і, в перспективі більш дешеві, ФЕП великої площі, але з меншим коефіцієнтом перетворення в порівнянні з ФЕП першого покоління;
- ФЕП третього покоління на основі органічних і неорганічних матеріалів знаходяться в даний час на стадії досліджень [20, 21].

Для опису сонячних елементів застосовується набір спеціальних параметрів і характеристик, що дозволяє проводити порівняльну оцінку сонячних елементів різного типу. До спеціальних характеристик сонячного елемента відносяться вольт-амперна (ВАХ) і спектральна характеристики. До спеціальних параметрів сонячного елемента відносяться ККД (ефективність), ff (фактора заповнення), U_{OC} (напруга холостого ходу), I_{SC} (струм короткого замикання) або J_{SC} (щільність струму короткого замикання).

Вольт-амперна характеристика сонячного елемента показує залежність вихідного струму сонячного елемента від напруги на його висновках (рис. 1.3). При зміні величини світлового потоку, що падає на сонячний елемент, його ВАХ змінюється [22, 23].

Спектральна характеристика являє собою залежність величини квантової ефективності (значення ефективності сонячного елемента при опроміненні його монохроматичним світлом на певній довжині хвилі) від довжини хвилі падаючого випромінювання.

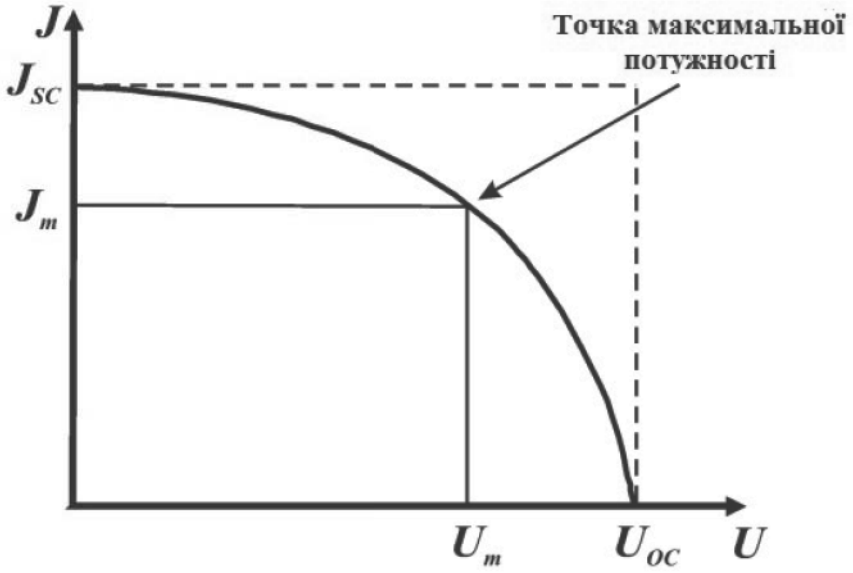


Рисунок 1.3 – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента

Ефективність (ККД) СЕ показує, яку частину (у процентному відношенні) сонячної енергії світла, що падає на нього, він може перетворити в електричну енергію. Розрізняють ККД по активній площі поверхні ($\eta_{акт}$) і ККД по загальної площі поверхні ($\eta_{заг}$):

$$\eta_{акт} = \frac{P_{ел}}{S_{акт} \cdot \Phi_0}, \tag{1.1}$$

$$\eta_{заг} = \frac{P_{ел}}{S_{заг} \cdot \Phi_0}, \tag{1.2}$$

де $P_{ел}$ – електрична потужність, що виробляється сонячним елементом при опроміненні; Φ_0 – щільність потоку світла, що падає на сонячний елемент; $S_{акт}$ і $S_{заг}$ – площі активної (доступної світлу) і загальної (що включає як поверхню, що доступна світлу, так і ділянки поверхні, що затінені електродною сіткою або скрайбовані від поглинаючого шару) поверхні сонячного елемента.

Напруга холостого ходу (U_{OC}) – це максимальне напруження, що виникає на розімкнутих висновках сонячного елемента при його опроміненні сонячним світлом.

Струм короткого замикання *(I_{SC})* – це максимальний струм, що протікає через висновки сонячного елемента при їх короткому замиканні.

Щільність струму короткого замикання визначається як відношення струму короткого замикання до площі поверхні сонячного елемента

Фактор заповнення *(ff)* показує, яка частина потужності, що виробляється сонячним елементом, використовується в навантаженні. Значення фактора заповнення визначається вибором режиму роботи сонячного елемента, тобто значеннями I_W і U_W. Значення *ff* може бути знайдено як відношення потужності на навантаженні, що підключено до висновків сонячного елемента, до повної електричної потужності, що виробляється сонячним елементом:

$$ff = \frac{I_W . U_W}{\int_0^{U_{OC}} I(U)dU}, \tag{1.3}$$

де I_W – струм, що протікає через навантаження в робочому режимі; U_W – робоча напруга сонячного елемента; $I(U)$ – вольт-амперна характеристика сонячного елемента.

Фактор заповнення вимірюється в % і варіюється від 50 до 85% для різних типів сонячних елементів.

Моделі характеризуються тим же набором параметрів і характеристик, що і сонячні елементи. Однак у них, як правило, U_{OC} і I_{SC} на порядок більше, ніж для сонячних елементів.

Недоліком фотоелектричного перетворювача є висока вартість і низький ККД. В даний час у фотоелементах на основі монокристалічного і полікристалічного кремнію ККД досягає 20-25%, фотоелементів на основі тонких плівок –20%, надвисокі значення ККД вище 40% мають сонячні батареї, які містять кілька p-n переходів (заснованих на напівпровідниках III-V груп), потенційно дешеві фотоелементи на основі органічних матеріалів мають ККД більше 6%.

Термін служби перетворювачів сонячної енергії:

- монокристалічні модулі – 30 і більше років;
- полікристалічні модулі – 20 і більше років;
- з аморфного кремнію (тонкоплівкові, або гнучкі) від 7 (перше покоління тонкоплівкових технологій) до 20 років (друге покоління тонкоплівкових технологій), тонкоплівкові модулі зазвичай втрачають від 10 до 40% потужності в перші два роки експлуатації.

Витрати на створення геліоустановок, навіть якщо враховувати при цьому тільки витрати на виробництво фотоелементів, за своєю питомої вартістю все ще перевершують витрати на створення атомних, теплових та гідроелектростанцій. Це пояснюється низькою щільністю сонячного випромінювання. Необхідно збирати сонячне випромінювання з великих площ, покриваючи їх дорогими напівпровідниковими фотоелементами. Вартість електроенергії, що одержується, значно перевершує вартість електроенергії, що виробляється традиційними способами. З часом відбувається зниження вартості сонячних елементів, головним чином, за рахунок зниження вартості напівпровідникових матеріалів. На даний момент собівартість сонячних елементів складає приблизно 2-3 дол/Вт. Вартість фотоелектричних геліоустановок в збірці доходить до 3-4 дол/Вт при вартості електроенергії 0,25-0,56 дол/Вт.

Наведені дані свідчать про те, що подальше зниження вартості сонячної електроенергії можливе не лише за рахунок удосконалення технології виготовлення фотоелементів, але й шляхом оптимізації умов їх експлуатації. Одним із найбільш ефективних та відносно недорогих методів підвищення енергоефективності фотоелектричних станцій є застосування систем керування положенням панелей, що забезпечують перпендикулярне падіння сонячних променів протягом світлового дня. Тому розробка компактної, енергоефективної та надійної системи стеження для малої сонячної панелі є актуальним науково-прикладним завданням.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ОРІЄНТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

2.1 Принцип роботи методу слідкування на основі диференціальних фотоелементів

Одним з найбільш простих та ефективних методів реалізації системи стеження за Сонцем є використання малих фотоелектричних перетворювачів як сенсорних елементів. Цей підхід було детально досліджено та експериментально підтверджено в роботі J. Rizk, and Y. Chaiko (близько 2003 р.), яка стала класичним прикладом реалізації низьковартісної системи стеження [24].

Автори запропонували використовувати не окремі фоторезистори (LDR) або фотодіоди, а додаткові малі сонячні елементи, які виступають у ролі саморегульованих датчиків освітленості [24].

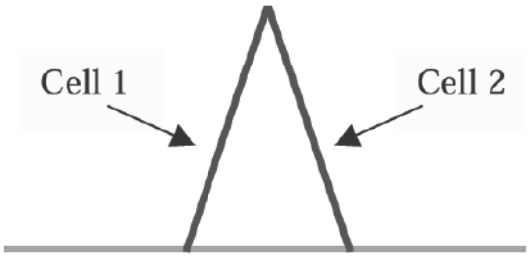


Fig. 2 Set-up of solar reference cells

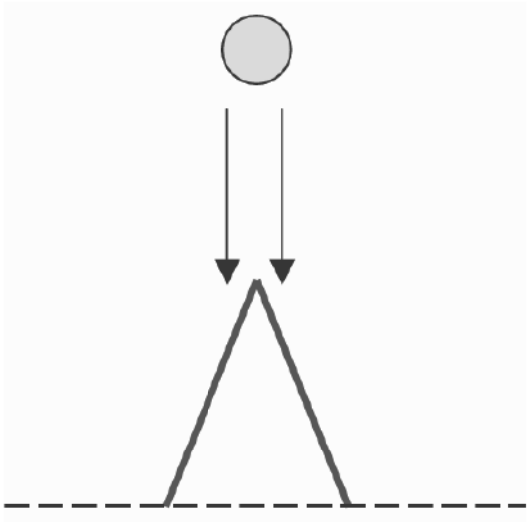


Fig. 3 Solar reference cells at rest position

Рисунок 2.1 - Схема встановлення сонячних референсних елементів

Відмінністю цього методу є використання самого фотоелектричного ефекту для генерування керуючого сигналу, а не просто зміни опору.

Як показано на рис. 2.1 (згідно з [24]), два малі сонячні елементи встановлюються під кутом один до одного (трикутна конфігурація). У стані спокою (коли сонячна панель орієнтована перпендикулярно до Сонця), обидва датчики отримують однакову кількість випромінювання, і їх вихідна напруга є рівною. При відхиленні положення Сонця один з датчиків освітлюється більше, а інший — менше, що створює різницю напруг. Ця різниця підсилюється та подається на виконавчий механізм (кроковий двигун), який повертає платформу до вирівнювання сигналів.

Перевагою такого підходу, на думку авторів, є лінійний характер вихідної напруги сонячного елемента в широкому діапазоні освітленості, на відміну від LDR або фотодіодів, які мають обмежену чутливість при фіксованому зміщенні [24].

Для верифікації запропонованого методу автори створили прототип одновісного сонячного трекера на основі крокового двигуна від старого принтера та редуктора від камери відеоспостереження. Як навантаження використовувалась сонячна панель Solarex потужністю 9 Вт [24].
Результати експерименту, проведеного в ясний день, показали наступне (табл. 1):

Таблиця 2.1 — Порівняння ефективності статичної та стежачої панелі за даними [24]

Параметр	Статична панель (горизонтальна)	Панель на трекері
Середня вихідна потужність за 12 годин	3,51 Вт (39% від номіналу)	6,30 Вт (71% від номіналу)
Приріст потужності	0% (базовий рівень)	~30% (в середньому)
Максимальний приріст (вранці/ввечері)	—	до 400%

Автори відзначають, що в ранкові та вечірні години, коли кут падіння променів на статичну панель наближається до 90°, приріст потужності сягав 400% [24]. Споживання самої системи стеження в режимі спокою становило

лише 48 мВт (4 мА при 12 В), що є незначним порівняно з отриманим приростом генерації [24].

Попри беззаперечні переваги описаного методу, слід враховувати, що дослідження проводилось на зразках сонячних панелей з ККД 15-20% (типового на той час). Сучасні комерційні монокристалічні модулі мають ККД 22-24%, а лабораторні зразки досягають 26-27% [26]. Крім того, автори використовували 12-годинний циклу вимірювань, що не враховує втрат на переорієнтацію трекера вранці (повернення у вихідне положення).

Важливим є те, що робота [24] демонструє низьковартісний підхід ($30-100), що є критичним для компактних систем. Однак сучасні системи стеження вимагають вищої точності позиціювання та стійкості до вітрових навантажень [25].

Подальші дослідження підтвердили ефективність методу, але з використанням сучасної елементної бази. У роботі [25] було досліджено двовісну систему стеження з аналогічним принципом диференціальних сигналів, але з використанням високоточних сервоприводів та мікроконтролерної обробки сигналів (STM32/Arduino). Приріст потужності склав 38,7% при безперервному режимі стеження [25].

На відміну від класичної роботи [24], де використовувався одновісний трекер, сучасні системи забезпечують двовісне стеження (азимут + зенітний кут), що додатково підвищує генерацію навесні та восени. Рекордні значення приросту потужності для двовісних систем на основі диференціальних фотоелементів сягають 67% [21].

На основі аналізу роботи [24] з урахуванням сучасних даних можна зробити наступні висновки щодо застосування методу диференціальних сонячних елементів у компактних системах керування положенням:

1) Низька вартість та простота: Метод залишається одним з найдешевших (вартість компонентів ~$30-100), що є визначальним для споживчих та навчальних прототипів.

2) Достатня точність: Експериментально підтверджений приріст у 30% для одновісної системи є суттєвим. Застосування двовісного стеження підвищує цей показник до 40-60% [25, 21].

3) Відсутність потреби в GPS/RTC: Система працює в реальному часі на основі зворотного зв'язку за освітленістю, що робить її незалежною від зовнішніх обчислень.

4) Недоліки, що потребують усунення: Чутливість до хмарності (різке зменшення диференціального сигналу) та потреба в калібруванні. Сучасні гібридні системи [25, 27] використовують комбінацію LDR-датчиків з астрономічним календарем для компенсації цього недоліку.

5) Перспективність для компактних панелей: Метод є оптимальним для систем потужністю до 100-200 Вт, де вартість комерційного трекера часто перевищує вартість самої панелі.

2.2 Аналіз застосування пневматичних приводів у системах стеження за Сонцем

Окремим перспективним напрямком, що відрізняється від традиційних електромеханічних систем, є використання пневматичних приводів. У роботі [27] запропоновано та експериментально досліджено двовісний сонячний трекер із замкнутим контуром керування на основі ПІД-регулятора, де виконавчими механізмами слугують два пневматичні циліндри подвійної дії.

Основні переваги пневматичного підходу, які наводять автори:

1) Низька вартість та простота конструкції порівняно з електричними аналогами;

2) Стійкість до зовнішніх температур (на відміну від деяких електричних систем);

3) Висока надійність та довговічність за менших витрат на обслуговування;

4) Відмінне співвідношення сила/вага та точне позиціювання [27].

Випробування проводилися в м. Кербела (Ірак) протягом трьох днів. Було встановлено, що використання одного пневмоциліндра (одновісне стеження) підвищує ефективність панелі на 62.3%, а двох циліндрів (двовісне стеження) — на 66.4% порівняно з нерухомою панеллю [27].

Показники якості керування (ПІД-регулятор):

Усталена похибка: 0.00734%

Перерегулювання: 0.505%

Час встановлення: 1.034 с

Це свідчить про високу точність та стабільність відпрацювання керуючих сигналів [27].

Незважаючи на те, що пневматичний підхід є менш поширеним у компактних побутових системах (через необхідність у компресорі та пневмолініях), він демонструє найвищі показники приросту ефективності (66.4%) серед розглянутих методів. Це робить його привабливим для стаціонарних великих установок або спеціалізованих промислових застосувань. Для порівняння: у попередньо розглянутій роботі з електроприводом приріст становив ~30% [24].

Враховуючи вартість таких систем розробка буде основана на більш дешевих датчиках та механізмах позиціонування.

2.3 Розробка системи управління

Система управління слідкуючого електроприводу компактної сонячної панелі складається з блоку контролю (управління), блоку живлення та датчиків.

Блок контролю зчитує сигнали фотоелектричних датчиків, обробляє їх по алгоритму і видає команду поворотному пристрою.

Для двоосьової системи контролю можна використовувати два фотоелектричних датчика (ФЕД), розташувавши один для контролю положення яскравої плями по азимуту, а другий – по екліптиці. Однак більш зручним у

використанні є датчик, виконаний єдиною конструкцією. Двовісний датчик положення Сонця в єдиному конструктиві зображений на рис. 2.2.

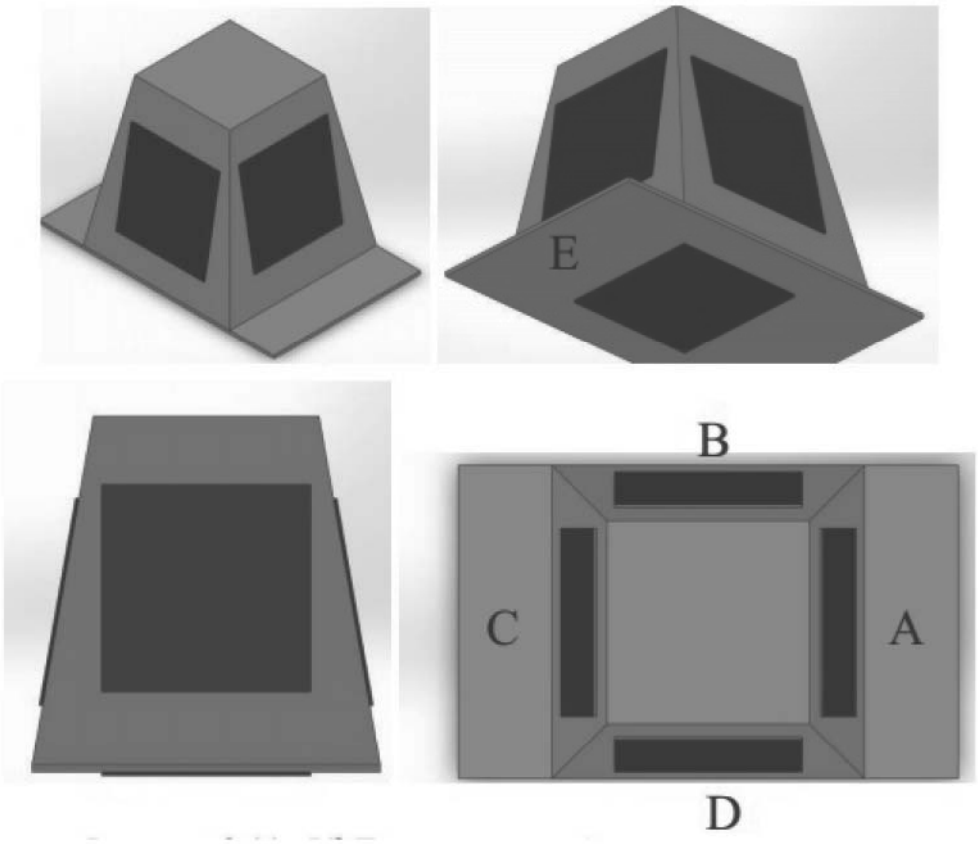


Рисунок 2.2 – Датчик для двоосьової системи контролю

Двовісний датчик складається з п'яти ідентичних за розміром чутливих елементів, виконаних з кремнієвих фотоелектричних перетворювачів і розташованих на гранях чотирикутної піраміди. Для орієнтування по азимуту використовується пара протилежних елементів, а для орієнтування по екліптиці – друга пара, п'ятий елемент розташований на тильній стороні і служить для визначення рівня фонового випромінювання і для запуску системи вранці. Для більшої чутливості відхилення Сонця кут між протилежними елементами становить 20^0.

Варіанти освітлення і команди поворотному пристрою представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти освітлення і команд поворотному пристрою

Елемент A	0	0	0	0	0
Елемент B	0	0	0	0	0
Елемент C	0	0	0	1	1
Елемент D	0	0	1	0	1
Елемент E	0	1	0	0	0
Положення яскравої плями	ніч	схід	нижче	на захід	нижче та на захід
Команда поворотному пристрою по осі екліптики	стояти	стояти	вниз	стояти	вниз
Команда поворотному пристрою по осі азимута	стояти	на схід	стояти	на захід	на захід
Елемент A	0	0	0	1	1
Елемент B	1	1	1	0	0
Елемент C	0	1	1	0	0
Елемент D	0	0	1	0	1
Елемент E	0	0	0	0	0
Положення яскравої плями	вище	вище та на захід	на захід	на схід	нижче та на схід
Команда поворотному пристрою по осі екліптики	вгору	вгору	стояти	стояти	вниз
Команда поворотному пристрою по осі азимута	стояти	на захід	на захід	на схід	на схід
Елемент A	1	1	1	1	1
Елемент B	0	1	1	1	1
Елемент C	1	0	0	1	1
Елемент D	1	0	1	0	1
Елемент E	0	0	0	0	0
Положення яскравої плями	нижче	вище та на схід	на схід	вище	точно
Команда поворотному пристрою по осі екліптики	вниз	вгору	стояти	вгору	стояти
Команда поворотному пристрою по осі азимута	стояти	на схід	на схід	стояти	стояти

Структурна схема система управління слідкуючого електроприводу компактної сонячної панелі представлена на рис. 2.3.

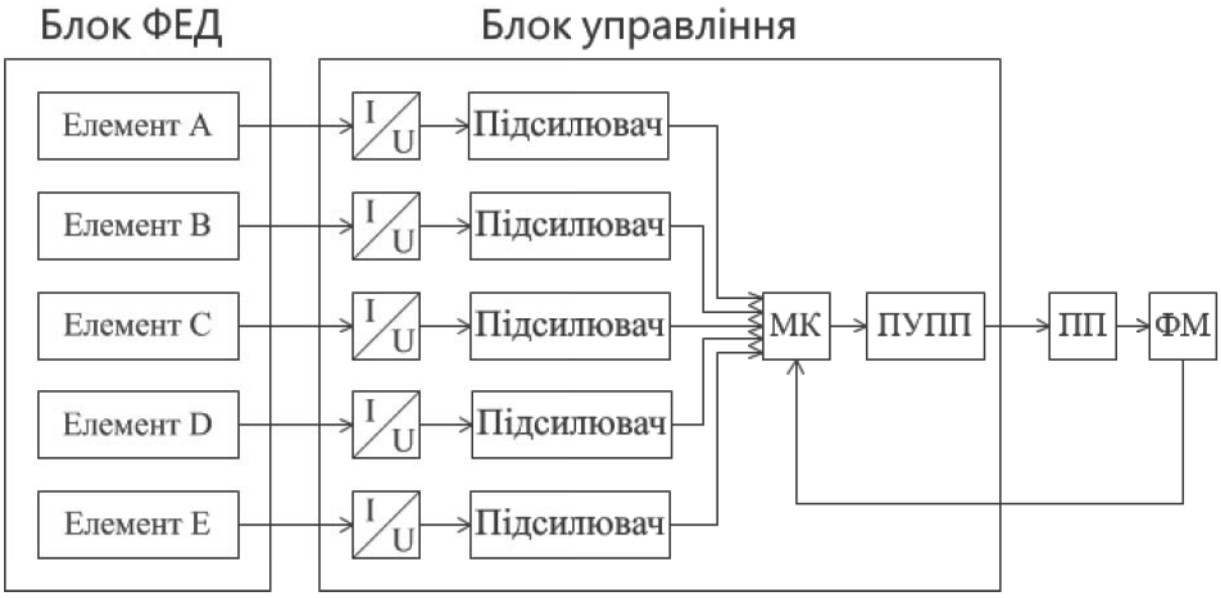


Рисунок 2.3 – Структурна схема система управління слідкуючого електроприводу компактної сонячної панелі

Схема складається з наступних елементів: ФЕД – фотоелектричний датчик, I/U – перетворювач струму в напругу [28], МК – мікроконтролер, ПУПП – пристрій управління поворотним пристроєм, ПП – поворотний пристрій, ФМ – фотоелектричний модуль (компактна панель).

Елементи ФЕД, що встановлені на поверхні ФМ, перетворюють світловий потік в струми, які пропорційні освітленості кожного елемента. Струми надходять в блок контролю, де перетворюються на напругу, яка посилюється для узгодження з діапазоном вхідних сигналів мікроконтролера за допомогою підсилювачів. Аналого-цифрові перетворювачі МК перетворюють напруги всіх п’яти сигналів у відповідні цифрові коди. Всі цифрові коди зчитуються в пам'ять МК і обробляються по закладеному алгоритму. МК подає на пристрій управління поворотним пристроєм код, відповідний необхідному напрямку і повороту ФМ. ПУПП за сигналами МК комутує сигнали для поворотного пристрою, забезпечуючи тим самим поворот в потрібному напрямку і на заданий кут.

Аналізуючи елементну базу операційних підсилювачів (ОП) які повинні підсилювати сигнал після перетворювача струму в напругу обираємо мікросхему AD8552 [29].

AD8552 — це одноканальний операційний підсилювач з нульовим дрейфом (zero-drift), що працює від однополярного джерела живлення. Він забезпечує вхідні та вихідні сигнали rail-to-rail. Гарантовано працює в діапазоні живлення від +2.7 В до +5 В. Основні характеристики мікросхеми зведені в табл. 2.3. Мікросхема поєднує низьку вартість з високою точністю завдяки новітній архітектурі автокалібрування (autozero stabilization). Не потребує зовнішніх конденсаторів.

Таблиця 2.3 - Основні характеристики мікросхеми

Характеристика	Значення	Переваги для поставленого завдання
Напруга зміщення (Offset Voltage)	1 мкВ (типове)	Дуже мала похибка вимірювання слабких струмів
Дрейф напруги зміщення	0.005 мкВ/°С	Стабільність при зміні температури (важливо для вуличної установки)
Вхідний струм зміщення (Input Bias Current)	20 пА (типове)	Мізерний струм, який не впливає на вимірювання фотоструму сонячного елемента
Смуга пропускання (GBP)	1.5 МГц	Достатньо для повільного сигналу від датчика освітленості
Швидкість наростання (Slew Rate)	0.4 В/мкс	Цілком достатньо для стеження за Сонцем
Рівень шуму (0.1-10 Гц)	1.0 мкВ пік-пік	Дуже низький шум — не буде помилкових спрацьовувань
Живлення	2.7 – 5.5 В	Сумісність з Arduino (5 В) або STM32 (3.3 В)
Струм споживання	700 мкА на підсилювач	Економний, підходить для автономної системи

Перетворювач «струм-напруга» на основі ОП має жорсткі вимоги до вхідного каскаду. Ось як AD8552 відповідає на них:

1. Надзвичайно низький вхідний струм зміщення (20 пА).

Фотострум від малого сонячного елемента-датчика може становити одиниці або десятки мікроампер. Якщо вхідний струм ОП буде сумірним (наприклад, 50 нА — типова величина для дешевих ОП), то похибка вимірюван-

ня стане катастрофічною. AD8552 має 20 пА — це в тисячі разів менше за сигнал, тому його впливом можна знехтувати.

2. Надзвичайно мала напруга зміщення (1 мкВ).

У трансімпедансному підсилювачі напруга зміщення ОП додається до сигналу. Для слабких сигналів це критично. AD8552 має 1 мкВ — це практично «електронний нуль». Для порівняння: типовий LM358 має зміщення 2-5 мВ (у 2000-5000 разів гірше).

3. Нульовий дрейф (автокалібрування)

Архітектура Autozero означає, що ОП постійно «самовиправляється». Для вуличної сонячної панелі, де температура змінюється від -20°C до +40°C, дрейф зміщення 0.005 мкВ/°C гарантує, що показання датчика освітленості не «пливтимуть».

4. Вхід Rail-to-Rail

Ваш сонячний елемент-датчик може бути підключений до землі або до живлення. AD8552 дозволяє подавати вхідну напругу в будь-якій точці від 0 В до +5 В. Це дає змогу використовувати схему як з низькостороннім, так і з високостороннім вимірюванням струму.

Таким чином, для перетворення фотоструму малого сонячного елемента-датчика в напругу, пропорційну освітленості, обрано операційний підсилювач AD8552 фірми Analog Devices. Цей підсилювач має рекордно низьку напругу зміщення (1 мкВ), надзвичайно малий вхідний струм (20 пА) та нульовий температурний дрейф (0.005 мкВ/°C) завдяки архітектурі Autozero. Зазначені характеристики роблять AD8552 ідеальним вибором для трансімпедансного підсилювача в системі стеження за Сонцем, оскільки забезпечують мінімальну похибку вимірювання в усьому діапазоні робочих температур та освітленостей. Крім того, підсилювач працює від однополярного живлення +5 В, що повністю сумісно з мікроконтролером Arduino, та споживає лише 700 мкА, що є критичним для автономної роботи

В якості перетворювача струм-напруга для даного проекту достатньо використовувати низькоомний резистор номіналом 1 Ом.

В якості мікроконтролеру управління обрано достатньо потужний для цього завдання та досить розповсюджений мікроконтролер ATmega328P.

ATmega328P — це 8-бітний мікроконтролер з архітектурою AVR RISC, виробництва компанії Microchip Technology. Він поєднує високу продуктивність з надзвичайно низьким енергоспоживанням, що робить його ідеальним вибором для автономних систем, таких як портативний сонячний трекер . Завдяки здатності виконувати до 131 інструкції за один такт, контролер забезпечує швидку обробку даних з датчиків та формування керуючих сигналів у реальному часі. Основні технічні характеристики наведені у табл. 2.4 [30].

Таблиця 2.4 — Основні технічні характеристики

Характеристика	Значення	Призначення
Архітектура	8-біт AVR RISC	Оптимальний баланс продуктивності та енергоспоживання
Тактова частота	16 МГц (максимум 20 МГц)	Достатньо для обробки сигналів датчиків та керування приводами в реальному часі
Flash-пам'ять	32 КБ	Для зберігання коду алгоритму стеження та калібрувальних даних
SRAM	2 КБ	Для тимчасового зберігання змінних та даних з датчиків
EEPROM	1 КБ	Для зберігання налаштувань та параметрів калібрування після вимкнення живлення
Напруга живлення	1.8 – 5.5 В	Сумісність з різними джерелами живлення (включно з Li-Ion акумулятором)
Струм споживання (робочий)	< 30 мА	Економне споживання, важливе для автономної роботи
Струм споживання (сон)	0.1-0.3 мкА	Можливість тривалого зберігання заряду батареї в режимі очікування
Аналогових входів (ADC)	6 каналів	Підключення кількох датчиків освітленості (LDR або сонячних елементів)
Розрядність АЦП	10 біт	Роздільна здатність 1024 рівнів (0-1023) на діапазоні 0-5 В
Вхідний опір АЦП	оптимізований під <10 кОм	Важливо для узгодження з виходом перетворювача «струм-напруга»
Цифрових виходів/ входів	14 (6 з ШІМ)	Для керування сервоприводами та іншими периферійними пристроями
Інтерфейси	UART, SPI, I²C (TWI)	Підключення додаткових модулів (GPS, дисплей, SD-карта)
Таймери	3 (2×8-біт, 1×16-біт)	Для генерації ШІМ-сигналів та створення часових інтервалів

Проаналізуємо, як характеристики мікроконтролера відповідають вимогам для системи керування положенням сонячної панелі.

1. Достатня продуктивність для алгоритмів стеження

Система керування положенням панелі потребує:

- Зчитування сигналів з датчиків освітленості (через АЦП);
- Виконання алгоритмів порівняння та прийняття рішень (наприклад, диференціальний метод);
- Генерації керуючих сигналів для сервоприводів (ШІМ);
- Опціонально — розрахунку астрономічної траєкторії Сонця.

Тактової частоти 16 МГц цілком достатньо для виконання цих завдань в реальному часі. Для порівняння: дослідження з MPPT-трекера на базі ATmega328P показало ефективність роботи алгоритму на рівні 99.21% [31].

2. Низьке енергоспоживання — критично для автономних систем

Сонячна панель живить не тільки себе, але й систему стеження. ATmega328P пропонує кілька режимів енергозбереження, надевених в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 — Режими енергозбереження

Режим роботи	Споживання	Застосування
Активний режим (16 МГц)	< 30 мА	Основний режим стеження
Режим сну (Idle/Sleep)	0.1-0.3 мкА	Нічний режим або тривале зберігання

Для системи управління це означає, що в нічний час, коли стеження не потрібне, контролер може переходити в режим глибокого сну, споживаючи мікроампери струму, що дозволяє зберігати заряд акумулятора.

3. 10-бітний АЦП для точного зчитування датчиків освітленості

Система стеження вимагає точного порівняння сигналів від декількох датчиків освітленості. ATmega328P має 6 аналогових входів з роздільністю 10 біт . Це дає 1024 рівні квантування на діапазоні 0-5 В.

Таким чином, вихід перетворювача «струм-напруга» на AD8552 має дуже низький вихідний опір (одиниці Ом), що ідеально узгоджується з вимо-

гами АЦП ATmega328P. Ця властивість забезпечує мінімальну похибку вимірювання.

4. ШІМ для керування сервоприводами

Більшість сервоприводів керуються ШІМ-сигналом з періодом 20 мс та тривалістю імпульсу 0.5-2.5 мс. ATmega328P має 6 апаратних ШІМ-каналів (на трьох таймерах), що дозволяє незалежно керувати двома двигунами (азимут і кут місця) та мати резерв для додаткових функцій.

5. Доступність та підтримка спільноти — зниження ризиків розробки.

Таким чином, для реалізації алгоритмів керування положенням сонячної панелі обрано мікроконтролер ATmega328P виробництва Microchip Technology. Важливою перевагою ATmega328P є його низьке енергоспоживання: в активному режимі мікроконтролер споживає менше 30 мА, а в режимі сну — лише 0.1-0.3 мкА, що є критичним для автономної роботи сонячної панелі, яка живить як систему стеження, так і власне навантаження.

Об'єм Flash-пам'яті (32 КБ) є достатнім для зберігання коду алгоритму стеження, а 2 КБ SRAM дозволяють комфортно працювати зі змінними та проміжними обчисленнями. Додатково наявність 1 КБ EEPROM дає змогу зберігати калібрувальні коефіцієнти та налаштування системи після вимкнення живлення [30].

Наявність інтерфейсів UART, SPI та I²C забезпечує можливість підключення додаткових модулів — GPS-приймача для астрономічного методу стеження, дисплея для індикації параметрів або карти пам'яті для логування даних.

Таким чином, ATmega328P є оптимальним вибором для розроблюваної системи керування положенням компактної сонячної панелі завдяки оптимальному співвідношенню продуктивності, енергоспоживання, вартості та наявності необхідних периферійних модулів.

Для підсилення сигналів ШІМ для керування двигунами потрібно обрати відповідний драйвер.

2.4. Вибір та обґрунтування драйвера двигуна.

Для керування виконавчими механізмами системи стеження — двигунами обертання за азимутом та зенітним кутом — необхідний потужний та надійний драйвер, здатний комутувати струми до декількох ампер при живленні до 24 В. На основі аналізу технічної документації обрано мікросхему BTM7740G виробництва Infineon Technologies.

BTM7740G є частиною сімейства TrilithIC — трьохкристальний модуль, що містить в одному корпусі два верхніх ключі (high-side) та два нижніх ключі (low-side). Така конфігурація дозволяє використовувати мікросхему як повний H-міст для керування двигунами постійного струму, а також в інших конфігураціях залежно від потреб системи [32].

Таблиця 2.6 - Основні характеристики BTM7740G

Параметр	Значення	Призначення
Конфігурація	Подвійний high-side + подвійний low-side	Можливість побудови H-моста для реверсивного керування двигуном
Напруга живлення	до 42 В	Запас міцності для сонячної панелі (типово 12-24 В)
Струм (піковий)	8 А (тип.)	Достатньо для двигунів середньої потужності
Опір каналу high-side (R_DS ON)	110 мОм (тип.)	Низькі втрати потужності
Опір каналу low-side (R_DS ON)	100 мОм (тип.)	Низькі втрати потужності
Струм спокою (quiescent)	5 мкА (тип.)	Дуже економний режим очікування
Частота ШІМ	до 1 кГц	Достатньо для керування двигунами трекера
Корпус	PG-DSO-28-22	Компактний, з покращеним тепловідведенням
Діагностика	Status flag (ST)	Сигналізація про помилки (перегрів, коротке замикання)
Захист	Від перегріву, короткого замикання, зниженої напруги	Підвищена надійність для вуличної установки
AEC Qualified	Так	Автомобільний клас — висока якість та надійність

Переваги BTM7740G з точки зору оптимального вибору:

1. Універсальність конфігурації (H-міст).

Для керування двигуном постійного струму в двох напрямках (поворот панелі на схід/захід або вгору/вниз) потрібен H-міст. BTM7740G дозволяє створити повний H-міст з двох верхніх та двох нижніх ключів. При цьому один корпус мікросхеми забезпечує керування одним двигуном. Для двовісного трекера знадобляться дві такі мікросхеми (або один корпус на вісь) [32].

2. Високий піковий струм (8 А) — запас надійності.

Сонячний трекер працює в умовах можливих поривів вітру, які створюють додаткове навантаження на двигун. Піковий струм 8А забезпечує значний запас для запуску двигуна в таких умовах.

Згідно з таблицею Absolute Maximum Ratings: «HS-drain current = 7A при TA = 25°C, tP < 100 ms» [32].

3. Надзвичайно низький опір каналів — високий ККД.

Опір high-side ключа становить 110 мОм, low-side — 100 мОм (типові значення). Це означає, що при струмі 2 А втрати потужності на мікросхемі складуть всього близько 0.4 Вт, що дозволяє працювати без додаткового радіатора для короткочасних включень (режим стеження).

4. Вбудовані захисні функції для вуличної експлуатації.

Система працює на відкритому повітрі, де можливі короткочасні короткі замикання, перегрів або просідання напруги від акумулятора. BTM7740G має вбудовані захисні механізми [32].

Таблиця 2.7 — Функції мікросхеми

Функція захисту	Опис
Short-circuit protection	Захист від короткого замикання виходу на землю або на живлення
Overtemperature shutdown	Автоматичне вимкнення при перегріві (Tj ~ 180°C) з гістерезисом
Undervoltage lockout	Вимкнення при зниженні напруги живлення нижче порогу (V_UVOFF)
Status flag (ST)	Вихід відкритий стік для сигналізації про помилки

5. Низьке енергоспоживання в режимі очікування

Днем трекер активний, але вночі (або в тривалі похмурі періоди) система може переходити в режим очікування. Типовий струм спокою BTM7740G становить лише 5 мкА [32].

6. Простота узгодження з мікроконтролером

Входи IH1 та IH2 сумісні з TTL/CMOS рівнями, що дозволяє підключати їх безпосередньо до виходів ATmega328P (через струмообмежувальні резистори).

На основі технічної документації пропонується наступна типова схема включення для одного двигуна, яка показана на рис. 2.4.

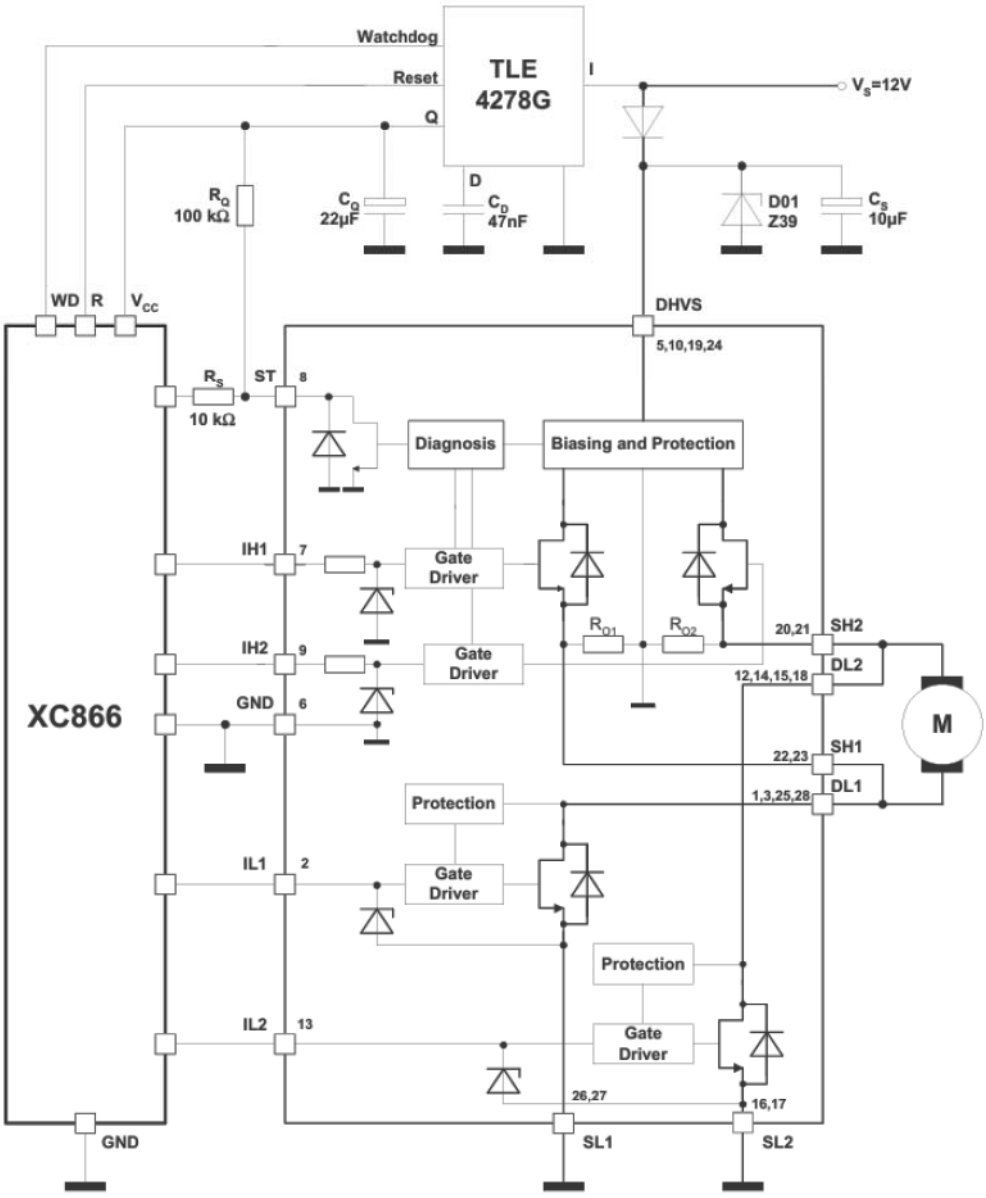


Рисунок 2.4 - Схема включення BTM7740G

Керуючи сигнали:

- IH1 (pin 7) та IH2 (pin 9) підключаються до виходів ATmega328P (через резистори).

- IL1 (pin 2) та IL2 (pin 13) зазвичай підключаються до +5 В для постійного ввімкнення нижніх ключів (або керуються додатково за потреби).

- ST (pin 8) — вихід діагностики (підтягується до +5 В через резистор 10 кОм).

Для реверсивного керування двигуном використовується наступна логіка (згідно з Truth table в даташиті [32]):

Режим	IH1	IH2	SH1	SH2	Стан двигуна
Стоп (гальмо)	0	0	Z	Z	Вільний вибіг
Вперед (схід)	1	0	H	L	Обертання в один бік
Назад (захід)	0	1	L	H	Обертання в інший бік
Стоп (гальмування)	1	1	H	H	Динамічне гальмування

де: `0` — логічний нуль (GND), `1` — логічна одиниця (+5 В), `H` — вихід підключений до живлення, `L` — вихід підключений до GND, `Z` — високий імпеданс (відключено).

Таким чином, драйвер BTM7740G є оптимальним рішенням для керування виконавчими механізмами компактного сонячного трекера завдяки наступним характеристикам [32]:

1. H-міст в одному корпусі — спрощує розробку друкованої плати та зменшує габарити системи.
2. Високий піковий струм (8А) — забезпечує надійний запуск двигуна навіть при вітровому навантаженні.
3. Низьке енергоспоживання (5 мкА в режимі спокою) — критично важливо для автономної системи, що живиться від сонячної панелі.
4. Вбудовані захисти (перегрів, КЗ, знижена напруга) — підвищують надійність роботи в польових умовах.
5. Діагностика через вихід ST — дозволяє мікроконтролеру відстежувати помилки та переходити в безпечний режим.

6. Автомобільний клас (AEC Qualified) — гарантує якість та довговічність.

Для забезпечення двовісного стеження (азимут + кут місця) у системі передбачено використання двох мікросхем BTM7740G — окремо для кожного двигуна. Обидві мікросхеми керуються від одного мікроконтролера ATmega328P, який формує ШІМ-сигнали на входах IH1 та IH2 відповідно до алгоритму стеження.

2.5 Супервізор живлення мікроконтролера

З метою забезпечення стабільності роботи в схемі бажано використовувати супервізор живлення. В якості такого елементу обрано TLE 4278 G — це монолітний інтегральний стабілізатор напруги з низьким падінням та фіксованою вихідною напругою 5В. Мікросхема розрахована на струм навантаження до 200 мА [33].

Основне застосування: живлення мікропроцесорних систем в автомобільній електроніці (суворі умови: перепади напруги, температура, перешкоди). Це робить її придатною для живлення мікроконтролера (наприклад, Arduino або подібного) в системі керування положенням сонячної панелі.

На відміну від звичайного стабілізатора (типу LM7805), TLE4278 містить вбудовані функції моніторингу та захисту, які роблять його повноцінним супервізором живлення [33].

Таблиця 2.8 — Функції мікросхеми TLE 4278

Функція	Призначення для системи керування
Стабілізація 5 В	Забезпечує стабільну напругу живлення для мікроконтролера (Arduino, ATmega тощо) та датчиків (LDR, потенціометри).
Reset Generator	Формує сигнал скидання (Reset) для мікроконтролера при ввімкненні живлення (Power-On Reset) або при падінні напруги нижче допустимого рівня (Under-Voltage Reset). Це гарантує старт процесора у визначеному стані.
Програмований поріг скидання	Дозволяє встановити рівень напруги, при якому генерується Reset (від 3,5 В до 4,6 В), що корисно для

Функція	Призначення для системи керування
(RADJ)	мікроконтролерів, які можуть працювати при зниженій напрузі.
Watchdog	Контролює працездатність мікроконтролера. Якщо контролер не подає періодичний сигнал (імпульси) на вхід WI, вихід WO сигналізує про зависання. Це критично для автономної системи стеження, яка має працювати без нагляду.
Налаштування активації Watchdog (WADJ)	Дозволяє відключати Watchdog при зниженні споживаного струму (наприклад, коли мікроконтролер переходить у "сплячий режим"), щоб уникнути помилкових спрацювань.
Програмована затримка Reset (D)	Зовнішній конденсатор задає час затримки між досягненням нормальної напруги та зняттям сигналу Reset. Це дає час для стабілізації живлення та запуску генератора мікроконтролера.

Для розробки системи живлення важливими є параметри наведені в табл. 2.9 (згідно з таблицею Electrical Characteristics) [33].

Таблиця 2.9 — Електричні параметри мікросхеми TLE 4278

Параметр (українською)	Позначення	Типове значення	Умови
Вихідна напруга	VQ	5,0 В ± 2% (4,9...5,1 В)	0...150 мА, VI = 6...28 В
Падіння напруги (Drop)	Vdr	0,25 В (тип.) / 0,5 В (макс.)	При IQ = 150 мА
Споживаний струм (у режимі без навантаження)	IQ,0	180...230 мкА	Tj = 85°C
Вхідна напруга (робочий діапазон)	VI	5,5 В ... 45 В	Забезпечує стабільність 5 В
Внутрішній поріг Reset	VQ,rt	4,65 В	RADJ на GND
Типова затримка Reset (t_rd)		20 мс	CD = 47 нФ
Захист		Вбудований	Від перегріву, КЗ, зворотної полярності

Важливі нюанси:

- Вихідний конденсатор (на виводі Q): обов'язковий, ємністю не менше 10 мкФ з еквівалентним послідовним опором (ESR) ≤ 5 Ом. Це критично для стабільності регулятора [33].
- Вхідні конденсатори (на виводі I): необхідні для компенсації перешкод по лінії живлення. Рекомендується керамічний + електролітичний.
- Робоча температура: вільний діапазон Tj від -40 до +150°C, що гарантує працездатність навіть під прямим сонячним промінням.

У контексті розробки системи керування положенням компактної сонячної панелі, TLE 4278 G може виконувати наступні ролі:

1. Джерело стабільної напруги 5 В для мікроконтролера (Arduino), LDR-датчиків, потенціометрів та інших низьковольтних компонентів, живлячись від акумулятора 12 В (який, в свою чергу, заряджається від сонячної панелі).
2. Супервізор скидання (Reset): гарантує коректний запуск мікроконтролера при подачі живлення (Power-On Reset) та захищає від збоїв при просадках напруги (наприклад, при запуску потужного сервоприводу). Програмований поріг (вивід RADJ) дозволяє адаптувати рівень скидання під конкретний мікроконтролер (наприклад, 3.5 В для ATmega328P).
3. Watchdog таймер: відстежує зависання програми в мікроконтролері. Якщо алгоритм стеження за Сонцем "зациклиться" або зависне, вихід WO (Watchdog Output) змінить стан, і можна буде або перезавантажити контролер, або активувати аварійний режим. Це підвищує надійність автономної системи.

Таким чином, застосування мікросхеми TLE 4278 G у розроблюваній системі живлення є технічно виправданим, оскільки вона поєднує в собі три критичні функції для автономного пристрою:

- Стабілізація напруги (LDO з низьким падінням, що важливо при роботі від акумулятора).
- Моніторинг живлення (Reset supervisor).
- Контроль працездатності процесора (Watchdog).

Це дозволяє спростити принципову схему, підвищити надійність системи керування та зменшити кількість дискретних компонентів.

Розгортаючи кожен блок до схеми електричної принципової отримуємо загальну схему системи управління (рис. 2.5).

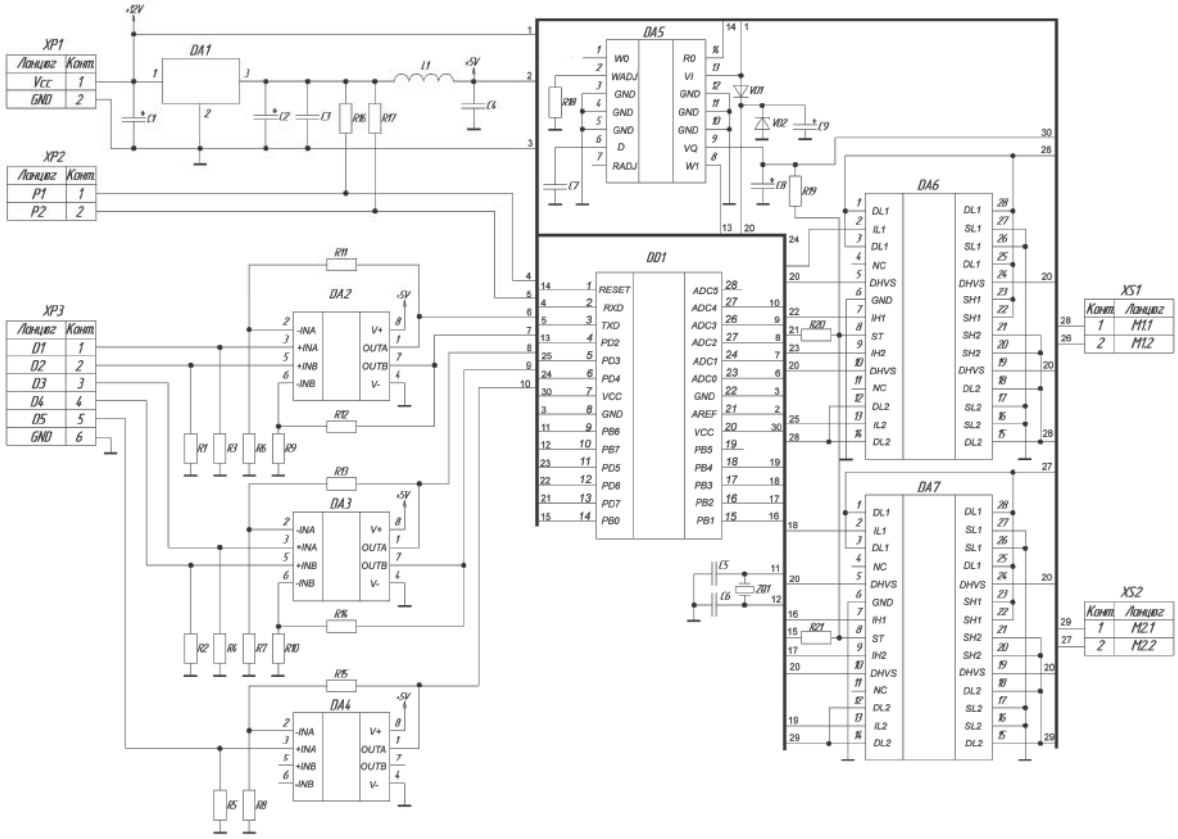


Рисунок 2.5 – Електрична принципова схема системи управління

Таким чином, розроблена схема керування базується на узгодженій роботі кількох ключових мікросхем. Центральний мікроконтролер ATmega328 реалізує гібридний алгоритм стеження, обробляючи сигнали з датчиків для визначення напрямку на Сонце. Стабільне живлення мікроконтролера та сенсорної частини забезпечує супервізор TLE 4278G, що підвищує надійність автономної роботи. Така архітектура дозволяє реалізувати надійне керування виконавчими механізмами на основі сигналу освітленості, забезпечуючи приріст ефективності сонячної панелі на рівні 40-60% порівняно зі статичним розташуванням.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

У розрахунковій частині буде вироблений розрахунок трансформатора блоку живлення для системи керування положенням компактної сонячної панелі.

Вихідними даними для розрахунку малопотужного силового трансформатора є такі величини:

- кількість фаз – m=1;
- номінальна потужність або струм вторинної обмотки;
- номінальні напруги –U2=12 В;
- частота мережі – f=50 Гц;

3.1 Розрахунок стабілізованого джерела напруги

В якості мікросхеми джерела стабілізованої напруги вибираємо інтегральну мікросхему серії LM7805 з параметрами, які представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри мікросхеми LM7805

Параметри	Значення
Вхідна напруга Uвх, В	8,5 ... 35
Вихідна напруга Uвих., В	5 ± 0,18
Струм навантаження Інавантаж., А	0,01-1,5
Нестабільність вихідної напруги %	4
Мінімальне падіння напруги, В	2,5
Максимальна розсіювана потужність, Вт	2

Розрахунок проводиться з умовою, щоб джерело напруги забезпечувало регулювання вихідної напруги від 4,1В до 5,9В. Схема включення мікросхеми LM7805 приведена на рис. 3.1 [34].

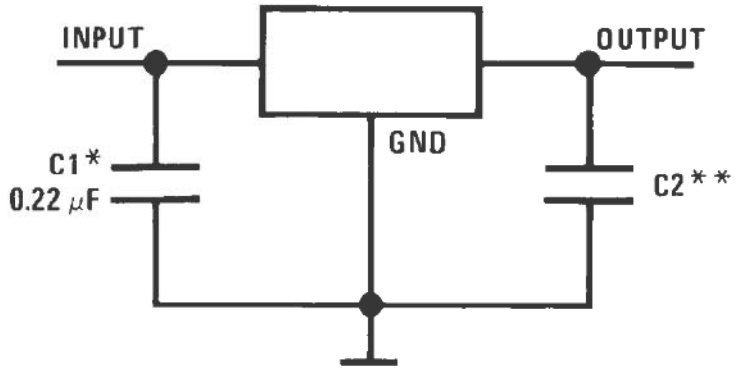


Рисунок 3.1 – Схема включення мікросхеми LM7805

Напруга на вході стабілізатора (DA1) повинна складати *Uвх* з урахуванням коефіцієнта пульсацій вхідної напруги *Кп* =5%.

Визначимо *Uвих.min* по формулі:

$$U_{вих.\min} = U_{вих} + \Delta U, \tag{3.1}$$

де ΔU – падіння напруги на регулюючому елементі ІМС.

$$U_{вих.\min} = 5,9 + 2,5 = 8,4\,B$$

Тоді *Uвх.min* рівно

$$U_{вх.\min} = U_{вх} \cdot 1,05 \tag{3.2}$$

$$U_{вх.\min} = 8,4 \cdot 1,05 \approx 9\,B$$

Uвх.min відповідає напрузі мережі живлення *Ucmin* = 0,9Uсном. Таким чином:

$$U_{вх.ном} = U_{вх.min} / 0{,}9 \quad (3.3)$$

$$U_{вх.ном} = 9/0{,}9 = 10\ B$$

При максимальній напрузі мережі:

$$U_{вх.\max} = U_{вх.ном} \cdot 1{,}1 \quad (3.4)$$

$$U_{вх.\max} = 10 \cdot 1{,}1 = 11\ B$$

На вході інтегральної мікросхеми встановлюється конденсатор С1, який є фільтром і виключає вплив перешкод з боку входу стабілізатора. Величина ємності конденсатора С1 забезпечує стабільну роботу стабілізатора та дорівнює 0.22 мкФ. Паралельно С1 також підключається електролітичний конденсатор. На основі інформації з довідника вибираємо наступний конденсатор: Capxon, ємністю 1000 мкФ.

Для підвищення стійкості стабілізатора, на виході також повинен бути встановлений конденсатор (керамічний) С2, номіналом 0.22 мкФ. В цьому випадку вибираємо паралельний конденсатор Capxon, ємністю 100 мкФ.

3.1.1 Розрахунок випрямляча джерела живлення

Середній струм діода мостового випрямляча рівний:

$$I_a = I_н / 2 \quad (3.5)$$

$$I_a = 1{,}0/2 = 0{,}5\ A$$

Струм діода, що діє, рівний:

$$I_{а\,д} = 1{,}15 \cdot I_н \quad (3.6)$$

$$I_{а\,д} = 1{,}15 \cdot 1{,}0 = 1{,}15\ A$$

Зворотна напруга, що прикладається до діодів, рівна:

$$U_b = 1{,}32 \cdot U_{вх.\max} \qquad (3.7)$$

$$U_b = 1{,}32 \cdot 11 = 14{,}52\ B$$

Як випрямні діоди вибираємо діоди типу 1N4001 з наступними параметрами:

- прямий середній струм - 1А;
- зворотна напруга - 50В;
- пряме падіння напруги - 1В.

3.1.2 Розрахунок параметрів вторинної обмотки трансформатора

Напруга вторинної обмотки трансформатора рівна:

$$U_2 = 0{,}71 \cdot U_{вх.ном} + U_0, \qquad (3.8)$$

де *Uo* - пряме падіння напруги на діодах випрямного моста (*Uo=2B).*

$$U_2 = 0{,}71 \cdot 10 + 2{,}0 \approx 9{,}1\ B$$

Струм вторинної обмотки, що діє:

$$I_2 = I_н \cdot 1{,}63 \qquad (3.9)$$

$$I_2 = 1{,}0 \cdot 1{,}63 = 1{,}63\ A$$

Встановлена потужність вторинної обмотки *S2* складає:

$$S_2 = 1{,}51 \cdot U_{ном} \cdot I_{ном} \qquad (3.10)$$

$$S_2 = 1{,}51 \cdot 12 \cdot 1{,}0 = 18{,}12\ BA$$

Струм первинної обмотки, обумовлений струмом навантаження джерела живлення, складає:

$$I_1 = I_2 / K_T, \qquad (3.11)$$

де $K_т$ – коефіцієнт трансформації ($K_т$ = U2/Uсном=220/12 =18,3)

$$I_1 = 1{,}0 / 18{,}3 \approx 0{,}055\ A$$

3.1.3 Вибір магнітопроводу і розрахунок обмоток трансформатора

Виходячи з того, що *S1 = S2*, де *S1* і *S2* – встановлені типові потужності первинною і вторинних обмоток трансформатора, розрахуємо твір площі активного поперечного перетину магнітопровода трансформатора *Scm* на площу вікна сердечника *Sок*, заповнюваного обмотками трансформатора.

$$S_{ст} \cdot S_{ок} \approx \frac{S_1 \cdot 10^2}{2{,}22 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot \delta_{ср} \cdot k_{ок} \cdot k_{ст}} \quad , \tag{3.12}$$

де *Scm* – площа перетину сталі магнітопровода, *см*^{2};

Sок – площа вікна магнітопровода, *см*^{2};

f = 50 *Гц* – частота мережі;

Bmax = 1,65 *Тл* – максимальна магнітна індукція стали;

δср = 2,7 - 3,5 *А/мм2* – щільність струму в обмотках;

$к_{ок}$ = 0,27 - 0,29 – коефіцієнт заповнення вікна;

$k_{ст}$ = 0,91 – коефіцієнт заповнення магнітопровода сталлю.

$$S_{ст} \cdot S_{ок} \approx \frac{18{,}12 \cdot 10^2}{2{,}22 \cdot 50 \cdot 1{,}65 \cdot 3 \cdot 0{,}28 \cdot 0{,}91} \approx 13 \ см^4$$

По отриманих результатах вибираємо кільцевий (тороїдальний) магнітопровід типу ОЛ 40/56 - 16, відповідний наступним параметрам:

- площа перетину магнітопровода *Scm* = 1,28 *см*^{2};
- ефективна довжина магнітної лінії *lcm* = 15 *см*;
- площа вікна *Sок* = 12,56 *см*^{2}.

Визначимо кількість витків обмоток трансформатора.

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot (1 - \Delta U_1 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4{,}44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{ст}} \quad , \tag{3.13}$$

де *ΔY1* = 10% – падіння напруги в первинній обмотці за рахунок активних втрат.

$$W_1 = \frac{220 \cdot (1 - 10 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 1{,}65 \cdot 1{,}28} = 4223 \ вит.$$

Визначимо кількість витків у вторинній обмотці.

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot (1 + \Delta U_2 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4{,}44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{ст}} \quad , \tag{3.14}$$

де *U2* = 12 В – напруга вторинної обмотки трансформатора;

ΔY2 = 12% – падіння напруги у вторинній обмотці за рахунок активних втрат.

$$W_2=\frac{12\cdot\left(1+12\cdot10^{-2}\right)\cdot10^4}{4{,}44\cdot50\cdot1{,}65\cdot1.28}=287\ витків$$

Визначимо діаметри проводів обмоток. Вибір діаметрів здійснюється по формулі 3.15 [35].

$$S_{пр}=\frac{I_n}{\delta}\ , \qquad (3.15)$$

де In – струм у відповідній обмотці трансформатора, A;

δ – щільність струму в обмотці, приймаємо 3 $А/мм^2$.

Звідси:

$$S_{пр1}=\frac{0{,}055}{3}=0{,}018\ мм^2$$

$$S_{пр2}=\frac{1{,}0}{3}=0{,}33\ мм^2$$

З формули $S=\frac{\pi\cdot D^2}{4}$ визначимо діаметри проводів для обмоток трансформатора по формулі:

$$D=\sqrt{\frac{4\cdot S}{\pi}} \qquad (3.16)$$

Таким чином:

$$D_1=\sqrt{\frac{4\cdot0{,}018}{3{,}14}}\approx0{,}15\ мм$$

$$D_2=\sqrt{\frac{4\cdot0{,}33}{3{,}14}}\approx0{,}65\ мм$$

По довідкових таблицях [36] обрано емальований мідний обмотувальний провід. Діаметр проводу визначався за розрахованою площею поперечного перерізу та довідковими таблицями обмотувальних проводів згідно з IEC 60317.

Площу заповнення вікна сердечника розрахуємо по формулі:

$$S_{з1}=S_{пр1}\cdot W_1 \qquad (3.17)$$

Отримані дані наводимо в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Звідна таблиця результатів розрахунку

Номери обмоток	Кількість витків	Розрахунковий діаметр, мм	Діаметр провода, мм	Площа перетину дроту, мм^2	Площа заповн. вікна, мм^2
W1	4223	0,15	0,15	0,018	76
W2	287	0,65	0,6	0,33	94

1) Дані діаметри приведені з урахуванням товщини лакового шару.

Сумарна площа проводів всіх обмоток у вікні складає:

$$S_{пр\Sigma} = S_{пр1} + S_{пр2} \tag{3.18}$$

$$S_{пр\Sigma} = 76 + 94 = 170 \ мм^2$$

Перевіряємо можливість виготовлення трансформатора по формулі 3.19.

$$k_{зр} = \frac{S_{пр\Sigma}}{S_{ок}} \tag{3.19}$$

$$k_{зр} = \frac{170}{1256} \approx 0{,}13$$

Умова *кзр* < *кок* виконується. Розрахунковий коефіцієнт *кзр* = 0,13, що відповідає вимогам.

3.2 Моделювання пристрою управління

3.2.1. Загальна характеристика середовища Tinkercad

Для проєктування та попередньої верифікації електричних схем і алгоритмів керування компактною сонячною панеллю було обрано хмарне середовище Autodesk Tinkercad. Tinkercad — це безкоштовна, веб-орієнтована платформа, яка надає доступ до модуля Circuits, що дозволяє створювати віртуальні електронні схеми, програмувати мікроконтролери та

проводити симуляцію в реальному часі без необхідності фізичних компонентів [37-39].

Основною перевагою Tinkercad є його доступність та інтеграція з навчальним процесом: для роботи достатньо веб-браузера, а всі проєкти зберігаються у хмарі [37]. Це дозволяє зосередитись на логіці роботи системи стеження, не відволікаючись на пошук та заміну фізичних елементів. Платформа підтримує симуляцію популярної платформи Arduino Uno, що є ключовим фактором, оскільки саме на ній базується більшість навчальних та експериментальних трекерів [39].

Основним призначенням використання Tinkercad у даній роботі є моделювання електричної частини системи керування. Як показано в роботі [40], Tinkercad є ефективним інструментом для розробки двовісних сонячних трекерів, дозволяючи відтворити повну схему з'єднань між мікроконтролером Arduino, датчиками (LDR) та виконавчими механізмами (сервоприводи) . Процес моделювання дозволяє:

- Візуалізувати топологію схеми: Розмістити віртуальні компоненти (Arduino, фоторезистори, резистори, сервоприводи) на монтажній платі (breadboard) та виконати комутацію згідно з принциповою схемою.
- Розробити та налагодити алгоритм керування: Завантажити код у віртуальний Arduino та спостерігати за його виконанням. Це дозволяє перевірити логіку зчитування датчиків, розрахунок кута повороту та генерацію керуючих сигналів.
- Провести симуляцію в реальному часі: Змінювати рівень освітленості на віртуальні фоторезистори та спостерігати за реакцією системи (наприклад, поворот сервоприводу). Це дає змогу оцінити ефективність алгоритму стеження за Сонцем до виготовлення фізичного прототипу.

Результати моделювання можуть бути використані для уточнення параметрів системи, таких як порогові значення освітленості, швидкодія виконавчих механізмів та загальна стабільність роботи.

Порівняльний аналіз можливостей Tinkercad для розробки системи керування сонячним трекером наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Аналіз придатності Tinkercad для моделювання сонячного трекера

Характеристика	Можливості в Tinkercad	Обмеження / Нюанси
Моделювання Arduino	Повна підтримка написання, компіляції та налагодження коду C++ .	Неможливість симуляції деяких бібліотек або точних часових затримок.
Компонентна база	Наявність базових компонентів: Arduino Uno, LDR, сервоприводи, potentiometri, РК-дисплеї.	Відсутність специфічних або рідкісних компонентів. Бібліотека обмежена порівняно з професійними симуляторами.
Симуляція датчиків	Інтерактивна зміна значень (освітленість для LDR, положення для potentiometer).	Неможливість точної симуляції деяких протоколів (I2C/SPI) для складних сенсорів.
Візуалізація	Наочне відображення руху сервоприводів, стану світлодіодів, показань на екрані.	Менш реалістична механіка порівняно з CAD-пакетами, але достатня для задач керування.
Вартість та доступність	Повністю безкоштовний, працює в браузері, не потребує встановлення.	Вимога до постійного інтернет-з'єднання.
Приклади застосувань	Успішно використовується для моделювання сонячних трекерів студентськими та дослідницькими групами.	Не призначений для професійного проєктування промислових систем живлення.

Таким чином, Autodesk Tinkercad є оптимальним вибором для виконання завдань цієї роботи на етапі віртуального прототипування. Його використання дозволяє:

1. Прискорити розробку: Швидко створювати та змінювати електричну схему та код системи стеження.

2. Знизити ризики: Уникнути пошкодження фізичних компонентів через помилки в комутації або живленні.

3. Провести параметричну оптимізацію: Експериментально підібрати коефіцієнти фільтрів або пороги спрацювання датчиків у симуляції, що підтверджено практикою створення подібних трекерів.

Розроблена та верифікована в Tinkercad модель системи керування компактної сонячної панелі представлена на рис. 3.2.

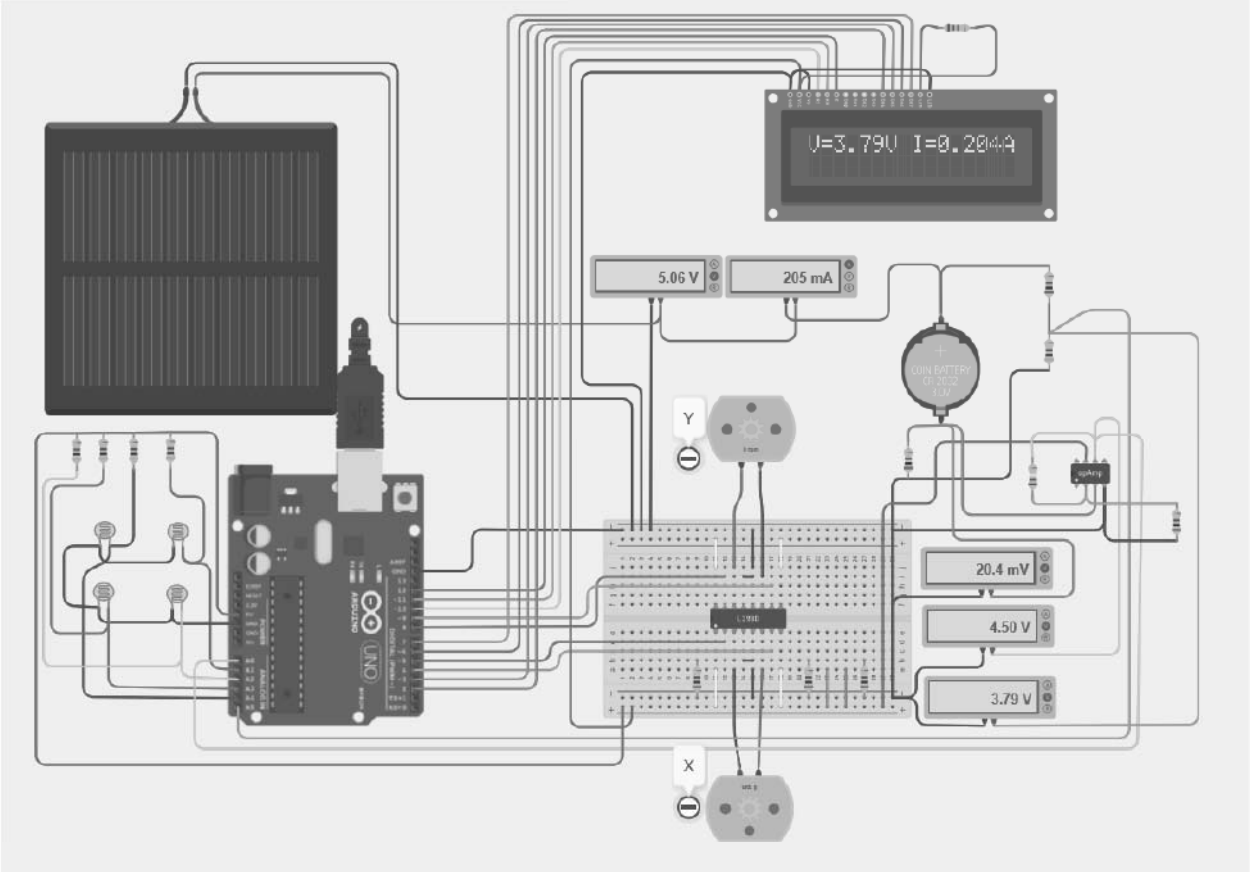


Рисунок 3.2 — Модель слідкуючого пристрою з компактним сонячним модулем

Розроблена модель дозволяє імітувати роботу системи позиціювання. Роботу датчиків та відповідних алгоритмів роботи системи в цілому. Також додано імітацію системи заряду акумулятора, що також дозволяє оцінювати зміну зарядного струму при зміні положення компактної сонячної панелі.

4 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Конструкція системи управління сонячною панеллю

Система управління реалізована як завершений функціональний виріб, розміщений в індивідуальному захисному корпусі, що забезпечує механічний захист, електромагнітну сумісність та зручність експлуатації.

Внутрішня архітектура пристрою побудована за модульним принципом і складається з двох функціонально незалежних друкованих плат, що дозволяє спростити налагодження, діагностику та сервісне обслуговування:

- плата джерела живлення — відповідає за перетворення напруг, необхідних для роботи всіх вузлів;

- плата системи управління — містить мікроконтролер, драйвери двигунів, стабілізатори та операційні підсилювачі, які реалізують задані алгоритми роботи.

Через значну кількість електричних з'єднань, перехресних маршрутів та високу щільність розміщення компонентів, розвести всі сигнальні провідники на одному шарі металізації не видається можливим. Тому плата системи управління виконана двосторонньою, що дозволяє:

- ефективно використовувати обидві сторони діелектрика для прокладання трас;

- мінімізувати довжину сигнальних зв'язків;

- зменшити паразитні наведення та перехресні завади (crosstalk) за рахунок оптимального рознесення ланцюгів по шарах;

- забезпечити компактні габарити кінцевого виробу.

Основний крок координатної сітки прийнято рівним 1,25 мм. Такий крок є стандартним для компонентів з виводами з кроком 2,54 мм та добре узгоджується з можливостями сучасного фрезерного та свердлильного обладнання.

Діаметр монтажних і перехідних отворів обрано рівним 0,50 мм. Габаритний розмір плати становить 76×56 мм, що є оптимальним компромісом між потрібною площею для розміщення компонентів та обмеженнями на внутрішній простір корпусу.

Проєктування топології друкованої плати виконано в сучасному САПР-середовищі DipTrace [41], яке дозволило:

- автоматично розставити компоненти з урахуванням електричних та теплових зв'язків;

- виконати інтерактивне трасування з контролем допустимих зазорів та ширин провідників;

- згенерувати вихідні файли для виробництва (Gerber, Excellon) згідно з вимогами сучасних PCB-фабрик.

На рис. 4.1 наведено топологічне креслення розробленої плати, яке візуалізує розміщення елементів та маршрути провідників обох шарів.

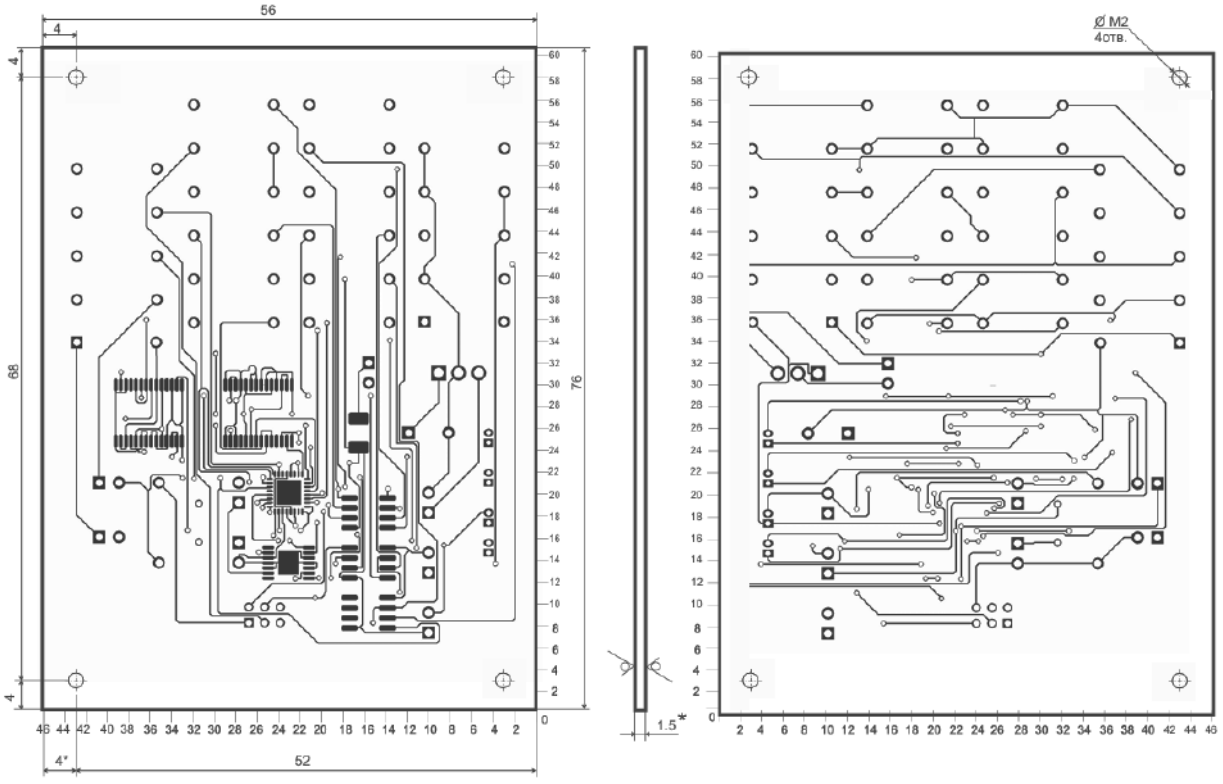


Рисунок 4.1 — Плата друкована, верхня та нижня сторона.

Друковані провідники виконані однакової ширини - 0,2 мм з допуском 0,05 мм. Провідники покрити сплавом "Розе". Маркування на платі виконувати труїнням шрифтом 2.5, у вузьких місцях шрифтом 2.

Для виготовлення друкованої плати відповідно до ОСТ 4.010.022 і з особливостей виробництва вибираємо комбінований позитивний метод.

1. Відповідно до ДСТУ 2.3751-86 для даного виробу необхідно вибрати четвертий клас точності друкованої плати.

2. Габаритні розміри друкованих плат повинні відповідати ДСТУ 10317-79. Для ОДП максимальні розміри можуть бути 600 х 600 мм. Габаритні розміри даної друкованої плати задовольняють вимогам даного ДСТ.

3. Відповідно до вимог ОСТ 4.077.000 вибираємо матеріал для плати на підставі склотканини - склотекстоліт FR4. Товщина 1.5 мм.

4. Спосіб отримання рисунка - фотохімічний.

Конструктивно пристрій розташовано в корпусі з ABS пластику. На верхній частині корпусу розташовано індикатор та кнопки управління пристроєм.

4.2 Сучасний технологічний процес виготовлення та монтажу друкованих плат

Сучасне виробництво друкованих плат (ДП) базується на трьох основних методах, кожен із яких має свою специфіку та сферу застосування [42].

Хімічний метод залишається найпоширенішим завдяки своїй простоті та технологічності. Суть методу полягає в нанесенні на мідну фольгу, приклеєну до діелектричної основи, захисного рисунка провідників. Найбільшого поширення набули фотохімічний, сітчасто-хімічний та офсетно-хімічний варіанти, які відрізняються способом нанесення захисного шару. Перевагами методу є відносна простота та можливість автоматизації. Недоліки — необхі-

дність використання металевих втулок при двосторонньому монтажі та непродуктивна витрата міді.

Електрохімічний метод передбачає нанесення негативного рисунка провідників з подальшим нарощуванням шару міді. Його основна перевага — можливість одночасної металізації отворів із формуванням провідників. Проте через низьку розсіювальну здатність (0,5-0,8 мм) та недостатню міцність зчеплення провідників з основою, цей метод застосовується переважно в дослідному та дрібносерійному виробництві двосторонніх плат.

Комбінований метод поєднує травлення фольгованого діелектрика з електрохімічною металізацією отворів. Цей метод забезпечує чіткі лінії провідників, меншу трудомісткість та вищу надійність плат, оскільки фольга захищає діелектрик від дії електроліту. Широко застосовується у виробництві двосторонніх ДП.

Сучасне виробництво ДП, особливо багатошарових (МПП), включає такі ключові етапи :

1. Підготовка файлів та написання керуючих програм. Вхідними даними слугують CAM-файли, комплекти Gerber+Excellon або ODB++. На цьому етапі виконується перевірка правил проєктування (DRC) та аналіз технологічності конструкції (DFM). Це критичний етап, оскільки "накреслити можна все, але не все можна виготовити".

2. Підготовка матеріалу. Розкрій листів або рулонів матеріалу (найпоширеніший розмір заготовки — 18×24 дюйми або 457×610 мм), зняття фаски та зачистка кромок.

3. Виготовлення внутрішніх шарів. Включає нанесення фоторезисту, експонування, проявлення, проміжний контроль системою автоматичної оптичної інспекції (AOI), травлення, видалення фоторезисту та фінішний контроль AOI.

Важливо зазначити, що нанесення та експонування фоторезисту відбувається в спеціально обладнаних приміщеннях з класом чистоти ISO 7 (або

ISO 5 для складних плат), з контрольованою температурою (20-22°C ±1°C) та відносною вологістю (40-55%) .

Матеріали для виготовлення плат:

- Найпоширеніший матеріал підкладки — FR-4 (композит скловолокна з епоксидним сполучним) з різними температурами склування (Tg 135, 150, 175°C)

- Для високочастотних застосувань використовуються поліміди, СВЧ-матеріали, спеціальні високошвидкісні матеріали.

Сучасні технологічні можливості дозволяють виготовляти плати з кількістю шарів до 48, з мінімальними діаметрами отворів 0,05 мм (лазерні) та співвідношенням товщини плати до діаметра металізованого отвору 18:1.

3. Монтаж та складання

Сучасний монтаж друкованих плат виконується переважно за технологією поверхневого монтажу (SMT), яка забезпечує високу щільність розміщення компонентів та автоматизацію виробництва.

Типова SMT-лінія включає наступні етапи:

1. Вхідний контроль компонентів та плат

2. Трафаретний друк паяльної пасти (або струменеве дозування)

3. SPI-інспекція (перевірка якості нанесення пасти)

4. Автоматичне встановлення компонентів (Pick & Place)

5. Оплавлення паяльної пасти за контрольованим температурним профілем

6. Автоматична оптична інспекція та/або рентгенівський контроль

7. Відмивання та нанесення захисного покриття

8. Функціональні випробування

Матеріали та обладнання:

- Сучасні флюси: забезпечують видалення оксидів та запобігають вторинному окисленню під час паяння

- Припої: крім традиційного ПОС-61 (олова 61%, свинець) та ПОС-60, широко застосовуються безсвинцеві припої (SAC305 тощо);

- Для паяння хвилею припою використовуються установки з двохпіковою структурою (турбулентна хвиля для якісного заповнення отворів та плоска — для видалення надлишків припою), з температурою ванни 245±5°C та часом паяння 3-5 секунд;

- Для ремонтних робіт використовуються паяльні станції з потужністю не більше 25 Вт та обов'язковим заземленням.

Особливості монтажу:

- При встановленні компонентів необхідно використовувати антистатичні браслети;

- Висновки елементів попередньо формують згідно з кресленням, після встановлення обрізають до 1 мм;

- Для корпусних мікросхем підгинають чотири ніжки з контролем положення ключа;

- Після монтажу плати миють у спеціалізованих установках та сушать у сушильних шафах.

4. Контроль якості та захист

Для забезпечення надійності виробів застосовується багатоступеневий контроль:

- Автоматична оптична інспекція для виявлення дефектів паяння та монтажу;

- Внутрішньосхемне тестування електричних параметрів;

- Функціональне тестування готових виробів;

Для захисту провідників використовуються паяльні маски на основі епоксидних смол або сухого плівкового резисту.

Відповідно до актуальних даних, на території України виготовляється незначний процент від загального обсягу споживаних друкованих плат, решта постачається з-за кордону, переважно з Китаю. Спостерігається активний розвиток вітчизняного виробництва: масштабне переоснащення діючих підприємств, нарощування потужностей, відкриття нових виробництв та центрів досліджень і розробок.

Важливим аспектом є впровадження підходів Design for Manufacturing (DFM), що дозволяє оптимізувати конструкцію плати для ефективного та надійного виробництва, зменшуючи кількість дефектів та витрати [43].

4.3 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

У лабораторії, де проводяться дослідно-конструкторські роботи зі розробки систем управління позиціонуванням компактних сонячних панелей (трекінгових систем), виникає комплекс специфічних шкідливих і небезпечних виробничих факторів [44]. Їх умовно можна поділити на групи:

1. Фізичні фактори

• Недостатня або нерівномірна освітленість робочої зони, що ускладнює візуальний контроль за процесами налагодження, особливо при роботі з дрібноелементною базою та оптичними датчиками.

• Некомфортні мікрокліматичні умови: підвищена температура повітря в зоні проведення паяльних робіт, а також нагрівання силових ключів перетворювачів і двигунів під час тривалих випробувань.

• Підвищений рівень шуму та вібрації, що генеруються двигунами, редукторами та механічними вузлами позиціювальних платформ під час їх роботи та налагодження. Інтенсивний щоденний шум може не лише погіршувати самопочуття та знижувати продуктивність праці (на 1–15%), але й за тривалої дії призводити до професійної нейросенсорної приглухуватості. Крім того, шум здатний тимчасово активізувати або, навпаки, стійко пригнічувати психічні процеси.

• Небезпека ураження електричним струмом – одна з головних загроз у лабораторії. Вона зумовлена роботою з силовими колами (перетворювачі напруги, драйвери двигунів, акумуляторні батареї), де напруга може сягати значень, небезпечних для життя. Причинами можуть бути: недостатнє знання

правил експлуатації електрообладнання, порушення ізоляції, відсутність заземлення, випадковий контакт з струмопровідними частинами.

• Небезпека опіків від нагрітих елементів (двигуни, радіатори силових ключів, паяльник) під час монтажу та налагодження.

2. Хімічні фактори

• Забруднення повітря робочої зони парами олова та свинцю, які утворюються під час ручного паяння, особливо при використанні традиційних припоїв типу ПОС-61 або безсвинцевих аналогів. Олово, навіть не належачи до особливо токсичних металів, при систематичному перевищенні гранично допустимих концентрацій (ГДК) здатне накопичуватися в організмі (печінка, нирки, легені, кісткова тканина) та викликати хронічну інтоксикацію. Симптомами є металевий присмак у роті, зниження апетиту, головні болі, запаморочення, порушення зору, диспепсичні розлади, гіперглікемія, зниження рівня цинку та міді в крові. Особливу небезпеку становлять органічні сполуки олова, які мають виражений кумулятивний ефект, можуть спричиняти хромосомні аберації в клітинах кісткового мозку та впливати на центральну нервову систему. Використання безсвинцевих припоїв зменшує свинцеву загрозу, але проблема олов'яних випарів залишається актуальною.

• Пари органічних розчинників (етилового, ізопропілового спирту, сумішей для знежирення) під час очищення друкованих плат, оптичних поверхонь сонячних елементів та контактних з'єднань.

• Пил та мікрочастинки склотекстоліту, які утворюються під час механічної обробки (свердління, різання, фрезерування) заготовок друкованих плат для макетів, а також абразивний пил від механічних вузлів позиціювальних систем.

3. Психофізіологічні фактори

• Статичні та динамічні перевантаження опорно-рухового апарату через тривале перебування в незручній робочій позі під час монтажу, паяння, складання та юстування оптико-механічних вузлів.

• Нервово-психічні фактори:

• Розумова перенапруга під час проєктування, написання програмного коду для мікроконтролерів та алгоритмів стеження за сонцем;

• Перенапруга аналізаторів (зорове навантаження при роботі з осцилографами, аналізаторами спектра, дрібним текстом специфікацій та схем);

• Емоційне перевантаження через відповідальність за коректне налагодження систем, особливо при роботі з високовольтними акумуляторними збірками або потужними двигунами;

• Монотонність праці при виконанні рутинних операцій (багаторазове калібрування датчиків, перевірка з'єднань, повторювані цикли тестування).

Додаткові специфічні фактори для лабораторії трекінгових систем

• Підвищена яскравість світла та інфрачервоне випромінювання від потужних джерел, що імітують сонячне випромінювання (галогенні лампи, сонячні симулятори), які використовуються для тестування фотоелектричних перетворювачів. Це може призводити до опіків сітківки та теплових уражень шкіри за відсутності захисних екранів.

• Рухомі механічні частини (позиціювальні платформи, редуктори, системи тросів), що створюють ризик травмування при випадковому пуску двигунів під час налагодження без відповідних блокувань.

4.4 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

У процесі налагодження та випробувань розробленої системи управління на базі мікроконтролера можливі збої, спричинені струмовими перевантаженнями або електромагнітними завадами (як внутрішніми, так і зовнішніми). Особливу небезпеку становить ймовірність мимовільного підвищення швидкості обертання виконавчого двигуна, що призводить до різкого

прискорення руху позиціювальної платформи. Це може спричинити механічні пошкодження вузлів, зрив закріплених зразків сонячних елементів або травмування обслуговувального персоналу.

З метою мінімізації цих ризиків у схемотехнічному рішенні передбачено комплекс заходів:

- гальванічне розділення сигнальних та силових кіл («земель») для підвищення завадостійкості та запобігання проникненню імпульсних перешкод у керуючу логіку;

- апаратні обмежувачі струму та швидкодіючі запобіжники на входах живлення, що спрацьовують при перевищенні допустимих значень;

- резервний датчик обертів (енкодер або тахогенератор), сигнал якого використовується для формування аварійної зупинки у разі розузгодження із заданою швидкістю;

- незалежні аварійні вимикачі (кінцеві вимикачі та кнопка «Стоп») для механічного розриву силового кола поза мікроконтролером.

До проведення налагоджувальних робіт у лабораторії допускаються виключно розробники, які:

- пройшли цільовий інструктаж з техніки безпеки;

- досконало вивчили схеми живлення та керування пристроєм;

- ознайомлені з порядком дій в аварійних ситуаціях та правилами локалізації несправностей.

Робота з силовими колами (драйвери двигунів, акумуляторні батареї, імпульсні перетворювачі) створює ризик електротравм у разі:

- стрибків напруги у мережі живлення;

- пробою ізоляції;

- випадкового дотику до струмопровідних частин.

Для забезпечення електробезпеки застосовуються технічні, організаційні та індивідуальні засоби :

Технічні засоби:

- вхідні запобіжники (плавкі або самовідновлювані) захищають персонал від наслідків перевантажень на лінії або підстанції;

- примусове заземлення корпусів обладнання та вимірювальних приладів;

- блокування вмикання при відкритих захисних кожухах.

Ізолюючі електрозахисні засоби (при роботі під напругою понад 50 В):

- ізольовані електровимірювальні кліщі для контролю струмів без порушення кола;

- покажчики напруги для перевірки відсутності небезпечного потенціалу;

- діелектричні рукавиці (з обов'язковою перевіркою цілісності та термінів придатності).

Під час роботи двигунів, редукторів і випробувальних стендів рівень шуму може перевищувати допустимі норми, що знижує продуктивність праці (на 1–15%) та загрожує розвитком нейросенсорної приглухуватості.

Для зниження акустичного навантаження використовуються:

- засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – протишумні заглушки, навушники або вкладиші, які підбираються індивідуально залежно від частотного спектра та інтенсивності шуму з обов'язковим контролем їх технічного стану;

- організаційно-технічні заходи – вивчення умов шумоутворення, застосування малошумних конструктивних рішень (гальмівні демпфери, шумопоглинальні кожухи), дотримання гранично допустимих рівнів (ГДР) на робочих місцях.

Тривала робота електродвигунів та обертових механізмів супроводжується вібрацією, яка може спричиняти професійні захворювання опорно-рухового апарату та судинної системи. Для профілактики застосовуються:

- віброзахисні рукавиці (або рукавички) з еластомерним демпфуючим покриттям;

- спеціальне взуття з амортизуючими підошвами;

- регламентовані перерви під час тривалих випробувальних циклів.

При механічній обробці (свердлінні, фрезеруванні макетів плат та конструктивних елементів) у повітря виділяється пил склотекстоліту, абразивний та металевий пил . Це може викликати подразнення дихальних шляхів, шкіри та слизових оболонок.

Для зниження запиленості вживаються такі заходи:

- герметизація пиловиділяючого обладнання;
- установка місцевої витяжної вентиляції (пилосмоків) безпосередньо біля робочих зон обробки;
- укриття обладнання суцільними кожухами з ефективною системою аспірації;
- своєчасна заміна фільтрів у системах загальнообмінної та припливно-витяжної вентиляції;
- використання респіраторів при виконанні операцій з підвищеним пилоутворенням.

Оскільки випробування систем позиціонування сонячних панелей часто вимагають використання потужних джерел світла (галогенних або ксенонових ламп для імітації сонячного випромінювання), необхідно передбачити:

- теплозахисні екрани та світлофільтри;
- обмеження часу безперервної роботи з джерелами високої яскравості;
- захисні окуляри з відповідними спектральними характеристиками.

4.5 Виробнича санітарія

Виробниче приміщення лабораторії має відповідати чинним санітарним нормам щодо забезпечення комфортних та безпечних умов праці [44].

Дотримання цих параметрів забезпечує не лише санітарно-гігієнічний комфорт, а й вільне переміщення персоналу, доступ до обладнання та безпечну евакуацію у разі надзвичайних ситуацій.

У лабораторії передбачено центральне водяне опалення з використанням радіаторів, що повністю відповідає вимогам [45]. Цей вид опалення має такі переваги:

- рівномірність прогріву приміщення по висоті та площі;

- можливість централізованого регулювання температури теплоносія (води) залежно від сезону та навантаження;

- відсутність продуктів згоряння та запаху гарі;

- стабільна підтримка відносної вологості повітря в допустимих межах, що особливо важливо для роботи чутливого електронного обладнання та оптичних систем.

Ефективний повітрообмін є критичним фактором для лабораторії, де проводяться паяльні роботи, використовуються органічні розчинники (етиловий спирт, знежирювачі) та можливе виділення пилу від склотекстоліту.

Для забезпечення нормованого повітрообміну пропонується використання механічної (припливно-витяжної) вентиляції з канальними вентиляторами типу ВЕНТС ТТ 125 (або аналогічними продуктивністю, що відповідає об'єму приміщення). Принцип дії ґрунтується на примусовому переміщенні повітря за рахунок різниці тисків, створюваної вентиляторами. Режим роботи вентиляції:

- вмикати перед початком паяльних робіт;

- вимикати не раніше ніж через 10–15 хвилин після їх завершення для повного видалення залишкових шкідливих речовин.

Особливості організації повітрообміну для парів етилового спирту

Оскільки пари етилового спирту мають густину, більшу за густину повітря, вони накопичуються переважно в нижній зоні приміщення. Тому розподіл витяжки повинен здійснюватися у співвідношенні:

- 60 % забрудненого повітря видаляється з нижньої зони (на рівні 0,3–0,5 м від підлоги);

- 40 % – з верхньої зони (під стелею).

Таке рішення запобігає утворенню застійних зон з високою концентрацією шкідливих речовин на рівні дихання персоналу.

Для локалізації шкідливих виділень безпосередньо в джерелі їх утворення (паяльні станції, місця промивки плат, зони механічної обробки) застосовується місцева витяжна вентиляція – гнучкі повітрозабори, зонти, витяжні шафи або столи з бортовими відсмоктувачами [45, 46]. Це дозволяє знизити загальне навантаження на систему загальнообмінної вентиляції та мінімізувати поширення забруднень по всьому приміщенню.

Правильно організоване освітлення є важливою складовою безпеки праці, особливо при виконанні робіт, що потребують високої точності зору (монтаж компонентів, читання схем, робота з вимірювальним обладнанням).

Штучне освітлення реалізоване з використанням енергоефективних люмінесцентних ламп (або сучасних світлодіодних аналогів з відповідними спектральними характеристиками). Прийняті рівні освітленості наведено в таблиці 4.1 [47].

Таблиця 4.1 – Прийняті значення освітленості в лабораторії

Найменування дільниці	Розряд зорової роботи	Освітленість (лк) та коефіцієнт запасу при використанні люмінесцентних ламп		
		Система комб. освітлення	Система заг. освітлення	Коефіцієнт запасу
Лабораторія	3 Б	750	300	1.2

Розряд зорової роботи III Б передбачає виконання точних операцій з об'єктами розрізнення 0,3–0,5 мм, що типічно для монтажу компонентів та налагодження плат. Коефіцієнт запасу 1,2 враховує природне старіння ламп та забруднення світильників протягом експлуатації.

Лабораторія належить до категорії робіт Іб (легка фізична робота), що виконується в основному сидячи, з деяким фізичним напруженням, а також може супроводжуватися короткочасним переміщенням.

Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату відповідно до [46] наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Оптимальні та допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в лабораторії

Період року	Температура, °С		Відносна вологість		Швидкість руху, м / с	
	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.
Холодний	21-23	24-17	40-60	75	0,1	<0,2
Теплий	22-24	28-19	40-60	55	0,2	0,1-0,3

Додаткові вимоги:

- коливання температури повітря по горизонталі в робочій зоні, а також протягом робочої зміни допускаються не більше ніж на 4 °С для категорії легких робіт;

- відносна вологість на нижній межі (40–45 %) особливо важлива для запобігання конденсації вологи на друкованих платах та електронних компонентах під час випробувань;

- швидкість руху повітря не повинна перевищувати допустимих значень, щоб не викликати відчуття протягу та не впливати на стабільність температурних режимів випробувального обладнання.

Таким чином, у лабораторії реалізовано комплексний підхід до створення безпечних та комфортних умов праці, що включає:

- об'ємно-планувальні рішення (достатній об'єм та площа, ергономічні проходи);

- тепловий комфорт (центральне водяне опалення, мікрокліматичний контроль);

- повітрообмін (поєднання загальнообмінної та місцевої вентиляції з урахуванням властивостей забруднювачів);

- якісне освітлення (комбінована система з нормованими рівнями для точної роботи).

Дотримання зазначених норм і правил дозволяє мінімізувати вплив шкідливих факторів на розробників та забезпечити стабільність експериментальних досліджень систем позиціонування сонячних панелей.

4.6 Електробезпека

У лабораторії використовується електрообладнання напругою до 1000 В, зокрема:

- паяльні станції;
- осцилографи та багатофункціональні вимірювальні прилади;
- джерела живлення (лабораторні блоки живлення, імпульсні перетворювачі);
- світильники місцевого освітлення;
- електродвигуни випробувальних стендів та позиціювальних платформ.

Усі прилади мають робочу ізоляцію струмопровідних частин та передбачені конструктивно елементи для підключення захисного заземлення.

Основним технічним засобом захисту від ураження електричним струмом у лабораторії є захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання металевих неструмопровідних частин електрообладнання (корпусів, шаф, рам) із заземлювальним пристроєм.

- за наявності замикання фази на корпус опір заземлювального пристрою становить не більше 4 Ом (згідно з ПУЕ) [48];
- опір тіла людини становить приблизно 1–2 кОм (залежно від стану шкіри, вологості тощо);
- у разі одночасного контакту людини із заземленим корпусом та землею струм, що проходить через тіло, розраховується за законом Ома: через малий опір заземлення основна частина струму відводиться по заземлювальному провіднику, а струм через людину виявляється безпечної величини.

Таким чином, захисне заземлення перетворює небезпечне замикання на корпус на однофазне коротке замикання, що призводить до спрацювання струмового захисту (автоматичних вимикачів або запобіжників) і відключення пошкодженого обладнання.

Для забезпечення надійного захисту персоналу передбачено комплекс заходів, що охоплюють технічну, організаційну та індивідуальну складові.

Технічні заходи:

- захисне заземлення всіх металевих корпусів обладнання, яке може опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції;

- занулення (для обладнання в системах із глухозаземленою нейтраллю) як альтернативний варіант захисного відключення;

- подвійна ізоляція струмопровідних частин для обладнання, що працює без заземлення (клас захисту II);

- автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення (ПЗВ) для оперативного знеструмлення пошкоджених ділянок;

- знижена напруга (до 42 В) для ручного паяльного інструменту через розділовий трансформатор;

- блокування вмикання обладнання при відкритих захисних кожухах.

Організаційні заходи:

- допуск до робіт виключно осіб, які пройшли навчання, перевірку знань з електробезпеки та мають кваліфікаційну групу не нижче II (для робіт з обладнанням напругою до 1000 В);

- періодичні інструктажі (вступний, первинний, повторний, цільовий) з фіксацією в журналах;

- перевірка справності заземлення, ізоляції та захисних пристроїв перед початком робіт;

- призначення відповідального за електрообладнання серед персоналу лабораторії.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) від електротравм:

- ізольовані електровимірювальні кліщі;

- покажчики напруги (низьковольтні, до 1000 В);

- діелектричні рукавиці (з обов'язковими періодичними електричними випробуваннями);

- діелектричні килимки та ізолювальні підставки для робіт на струмопровідних підлогах.

Згідно з класифікацією Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) лабораторія належить до приміщень:

- без підвищеної небезпеки, оскільки:

  - відносна вологість не перевищує 75%;

  - температура в приміщенні не перевищує +35 °С;

  - підлоги струмонепровідні;

  - відсутні хімічно активні середовища, що руйнують ізоляцію.

За наявності випробувальних стендів з відкритими струмопровідними частинами лабораторія може класифікуватися як приміщення з підвищеною небезпекою, тому для роботи на стендах передбачаються додаткові заходи (огородження, попереджувальні знаки, дистанційне керування).

Для захисту персоналу від наслідків стрибків напруги та струмових перевантажень у мережі живлення та силових колах системи позиціонування передбачено:

- вхідні запобіжники (плавкі вставки або самовідновлювальні) — спрацьовують при перевищенні номінального струму в лінії, запобігаючи нагріванню проводки та можливому займанню;

- мережеві фільтри та обмежувачі перенапруг (варистори, газорозрядники) — захищають від імпульсних перенапруг у живильній мережі та комутаційних викидів;

- розділення сигнальної та силової земель — запобігає потраплянню небезпечного потенціалу на органи керування та вимірювальні прилади.

У разі перевантаження в лінії або на підстанції ці засоби забезпечують автоматичне відключення живлення, що виключає можливість ураження

персоналу електричним струмом та виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

4.6.1 Розрахунок захисного заземлення

Розрахунок заземлення проводиться для того щоб визначити опір споруджуваного контуру заземлення при експлуатації, його розміри і форму. Як відомо, контур заземлення складається з вертикальних заземлювачів, горизонтальних заземлювачів і заземлюючого провідника. Вертикальні заземлювачі забиваються в грунт на певну глибину [44].

Горизонтальні заземлювачі з'єднують між собою вертикальні заземлювачі. Заземлювальний провідник з'єднує контур заземлення безпосередньо з електрощитом.

Розміри і кількість цих заземлювачів, відстань між ними, питомий опір ґрунту - всі ці параметри безпосередньо залежать на опір заземлення.

Заземлення служить для зниження напруги дотику до безпечної величини. Завдяки заземленню небезпечний потенціал йде в землю тим самим, захищаючи людину від ураження електричним струмом.

Величина струму стікання в землю залежить від опору заземлюючого контуру. Чим опір буде менше, тим величина небезпечного потенціалу на корпусі пошкодженої електроустановки буде менше.

Заземлювальні пристрої повинні задовольняти покладених на них певним вимогам, а саме величини опір розтікання струмів і розподілу небезпечного потенціалу.

Тому основний розрахунок захисного заземлення зводиться до визначення опору розтікання струму заземлювача. Це опір залежить від розмірів і кількості заземлюючих провідників, відстані між ними, глибини їх закладення і провідності грунту [44].

Вихідні дані для розрахунку заземлення

1. Основні умови, яких необхідно дотримуватися при спорудженні заземлюючих пристроїв це розміри заземлювачів.

1.1. Залежно від використовуваного матеріалу (куточок, смуга, кругла сталь) мінімальні розміри заземлювачів повинні бути не менше:

а) смуга 12х4 - 48 мм^2;

б) куточок 4х4;

в) кругла сталь - 10 мм^2;

г) сталева труба (товщина стінки) - 3.5 мм.

Мінімальні розміри арматури застосовуються для монтажу заземлюючих пристроїв

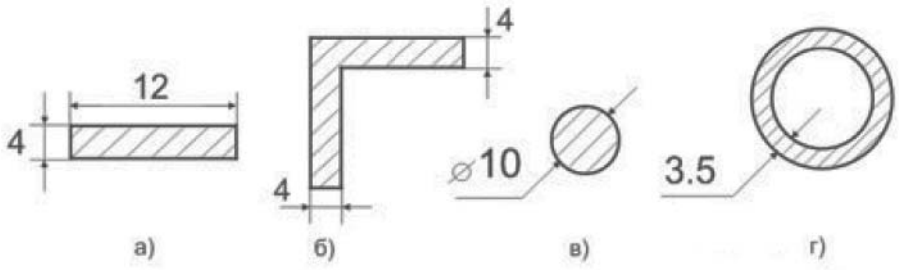


Рисунок 4.2 – Мінімальні розміри арматури

2. Довжина стрижня, що заземлює повинна бути не менше 1.5 - 2 м.

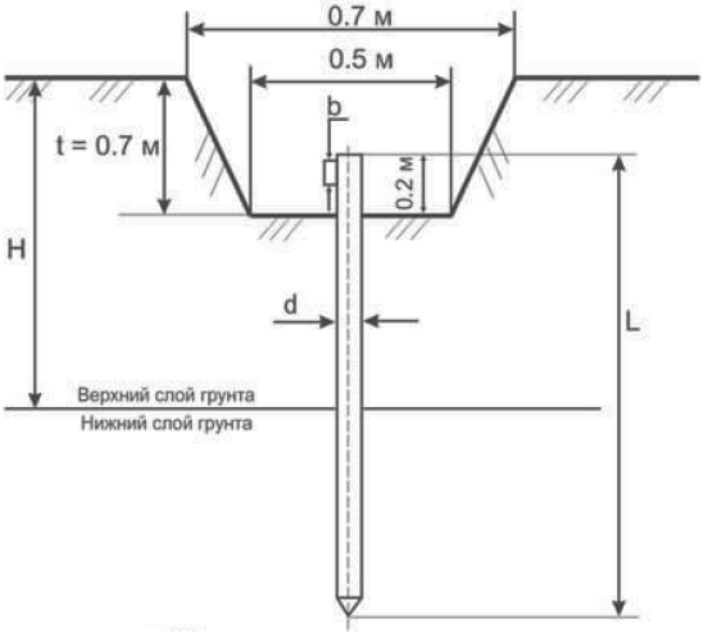


Рисунок 4.3 – Стержень заземлення

1.3. Відстані між заземлювальними стрижнями береться зі співвідношення їх довжини, тобто: а = 1xL; а = 2xL; а = 3xL.

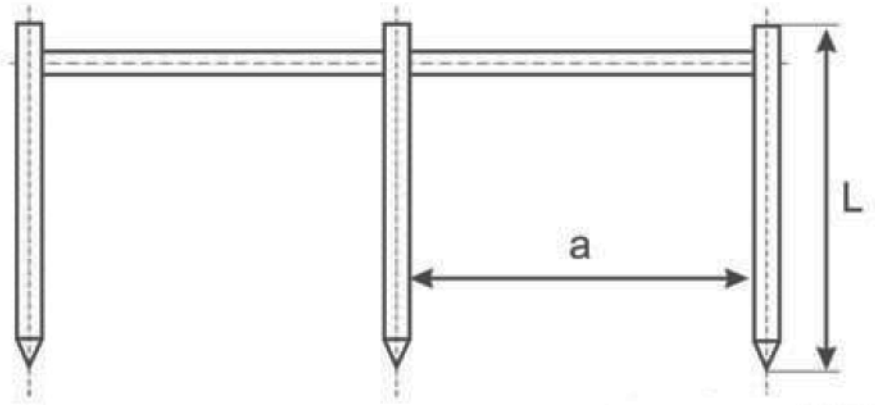


Рисунок 4.4 – Відстані між заземлювальними стрижнями

Залежно від що дозволяє площі і зручності монтажу заземлення стрижні можна розміщувати в ряд, або у вигляді який не будь фігури (трикутник, квадрат і т.інш.) [44].

Основною метою розрахунку заземлення є визначити число заземлюючих стрижнів і довжину смуги, яка їх з'єднує.

Вихідні дані для розрахунку пристрою заземлення:

- опір заземлювального пристрою розтіканню струму - не більше 4 Ом;
- вид грунту - супісок;
- кліматична зона - 1;
- розташування вертикальних заземлюючих електродів – по контуру.

Опір розтікання струму одного вертикального заземлювача (стержня):

$$R_0 = \frac{\rho_{ekv}}{2\pi L}\left(\ln\left(\frac{2L}{d}\right) + 0.5\ln\left(\frac{4T+L}{4T-L}\right)\right)$$

де - ρ_{ekv} - еквівалентний питомий опір ґрунту, Ом·м;

L - довжина стержня, L=8 м;

d - його діаметр, d=0.01 м;

T - відстань від поверхні землі до середини стрижня, м.

У разі установки заземлювального пристрою в неоднорідний грунт (двошаровий), еквівалентний питомий опір ґрунту знаходиться за формулою:

$$\rho_{ekv}=\frac{\psi\cdot\rho 1\cdot\rho 2\cdot L}{\left(\rho 1\left(L-H+t_g\right)+\rho 2\left(H-t_g\right)\right)}$$

де Ψ - сезонний кліматичний коефіцієнт =1.8 (табл. 4.3);

ρ1, ρ2 - питомий опору верхнього і нижнього шару грунту відповідно, ρ1= ρ2 =150 Ом·м;

Н - товщина верхнього шару грунту, Н =1м;

t_g - заглиблення вертикального заземлювача (глибина траншеї) t_g = 0.7 м.

Так як питомий опір ґрунту залежить від його вологості, для стабільності опору заземлювача і зменшення на нього впливу кліматичних умов, заземлювач розміщують на глибині не менше 0.7 м.

Заглиблення горизонтального заземлювача можна знайти за формулою:

$$T=\left(\frac{L}{2}\right)+t_g$$

Монтаж і установку заземлення необхідно проводити таким чином, щоб заземляючий стрижень пронизував верхній шар грунту повністю і частково нижній.

Таблиця 4.3 - Значення сезонного кліматичного коефіцієнта опору грунту

Тип заземлюючих електродів	кліматична зона			
	I	II	III	IV
Стрижневий (вертикальний)	1.8 ÷ 2	1.5 ÷ 1.8	1.4 ÷ 1.6	1.2 ÷ 1.4
Смуговий (горизонтальний)	4.5 ÷ 7	3.5 ÷ 4.5	2 ÷ 2.5	1.5
	Кліматичні ознаки зон			
Середня багаторічна нижча температура (січень)	от -20 до +15	от -14 до +10	от -10 до 0	от 0 до +5
Середня багаторічна вища температура (липень)	от +16 до +18	от +18 до +22	от +22 до +24	от +24 до +26

$$T=\left(\frac{8}{2}\right)+0.7=4.7$$

$$\rho_{ekv}=\frac{1.8\cdot 150\cdot 150\cdot 8}{\left(150\left(8-1+0.7\right)+150\left(1-0.7\right)\right)}=270$$

$$R_0=\frac{270}{6{,}28\cdot 8}\left(\ln\left(\frac{2\cdot 8}{0.01}\right)+0.5\ln\left(\frac{4\cdot 4.7+8}{4\cdot 4.7-8}\right)\right)=42.2\,Ом$$

Кількість стрижнів заземлення без урахування опору горизонтального заземлення знаходиться за формулою:

$$n_0=\frac{R_0\cdot\psi}{Rn}$$

$$n_0=\frac{42.2\cdot 1.8}{4}=19 \text{ (приймаємо =19)}$$

Опір розтікання струму для горизонтального заземлювача:

$$R_g=0.366\left(\frac{\rho_{ekv}\cdot\psi}{L_g\cdot\eta_g}\right)\cdot lg\left(\frac{2\cdot L_g^{\,2}}{b\cdot t_g}\right)$$

де Lg, b - довжина і ширина заземлювача, Lg=1м, b=0.2м;

Ψ - коефіцієнт сезонності горизонтального заземлювача, Ψ=1.8;

ηg - коефіцієнт попиту горизонтальних заземлювачів, ηg=0.47.

Довжину самого горизонтального заземлювача знайдемо виходячи з кількості заземлювачів:

L_g=a (для контуру).

де a - відстань між заземлювальними стрижнями.

$$R_g=0.366\left(\frac{270\cdot 2}{1\cdot 0.47}\right)\cdot lg\left(\frac{2\cdot 1^2}{0.2\cdot 0.7}\right)=1000$$

Визначимо опір вертикального заземлювача з урахуванням опору розтікання струму горизонтальних заземлювачів:

$$R_v=\frac{R_g\cdot R_n}{R_g-R_n}$$

$$R_v=\frac{1000\cdot 4}{1000-4}=4.016$$

Загальна кількість вертикальних заземлювачів визначається за формулою:

$$n = \frac{R_0}{R_v \cdot \eta_v}$$

де η_v - коефіцієнт попиту вертикальних заземлювачів, η_v=0.69.

$$n = \frac{42.2}{4.016 \cdot 0.27} = 38.9$$

Приймаємо кількість вертикальних заземлювачів для забезпечення заданого опору рівним 40 шт.

4.7 Пожежна та техногенна безпека

Відповідно до вимог [49, 50], будівля, в якій розташована лабораторія, належить до категорії Д за пожежною небезпекою згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 (або чинними нормами). Це означає, що в приміщенні зберігаються та використовуються переважно негорючі речовини та матеріали в холодному стані.

Клас можливої пожежі в лабораторії — Е, що відповідає пожежам, пов'язаним з горінням електроустановок, які перебувають під напругою. Це обумовлено наявністю значної кількості електрообладнання: джерел живлення, вимірювальних приладів, електродвигунів випробувальних стендів, комп'ютерної техніки та паяльного інструменту.

Площа лабораторії становить 60 м², що враховується при визначенні необхідної кількості первинних засобів пожежогасіння.

Для гасіння пожеж класу Е (електрообладнання під напругою) у лабораторії передбачено вогнегасники, що не проводять електричний струм і не пошкоджують електронне обладнання.

Тип та кількість вогнегасників:

- ручні вуглекислотні вогнегасники марок ВВК-1,4 (маса заряду 1,4 кг) або ВВК-5 (маса заряду 5 кг) — 2 одиниці;

- вуглекислотні вогнегасники обираються тому, що вони:

  - не залишають слідів після використання;

  - не пошкоджують радіоелектронну апаратуру;

- ефективні для гасіння обладнання під напругою до 1000 В;

- не проводять електричний струм.

Вимоги до розміщення пожежного інвентарю:

- усе пожежне обладнання та інвентар повинні утримуватися в справному стані;

- розташовуватися в видних місцях з вільним доступом;

- на шляхах евакуації, але не створюючи перешкод для руху;

- з позначенням відповідними вказівними знаками згідно з ДСТУ ISO 7010.

Лабораторія обладнана автоматичною системою пожежної сигналізації, яка забезпечує раннє виявлення загоряння та своєчасне оповіщення персоналу.

До складу системи входять:

- два комбіновані пожежні датчики Sapsan Pro 5T — реагують на два фактори пожежі одночасно:

- дим (оптичний канал) — для виявлення продуктів тління та горіння;

- тепло (термічний канал) — для фіксації критичного підвищення температури;

- комбінований принцип знижує ймовірність хибних спрацьовувань;

- оповіщувач пожежний світлозвуковий — забезпечує візуальне (миготливі світлові сигнали) та акустичне (гучний звуковий сигнал) інформування персоналу;

- оповіщувач ручний — дозволяє вручну активувати тривогу у разі виявлення загоряння;

- панель пожежної сигналізації (приймально-контрольний прилад) — здійснює обробку сигналів від датчиків та передає інформацію про загоряння на центральний пульт охорони або комп'ютер диспетчерської служби.

При проєктуванні будівлі передбачено внутрішній пожежний водопровід, який забезпечує подачу води до будь-якої точки приміщення. Основні вимоги до нього:

- з двох різних пожежних кранів можливе одночасне підключення двох пожежних рукавів для формування водяних струменів, що досягають будь-якої точки будівлі;

- пожежні стояки прокладаються в місцях з необмеженим доступом (найпоширеніше рішення — сходові клітки або безпосередньо біля них);

- внутрішній пожежний водопровід виконується замкнутим із живленням від зовнішнього побутового або пожежного водопроводу;

- у разі ймовірності замерзання трубопроводу в холодну пору року передбачається ретельна теплоізоляція всіх ділянок системи.

Відповідно до ДСТУ Б В.2.5-38:2008 (або ДСТУ EN 62305), для будівлі лабораторії передбачено блискавкозахист за другою категорією. Оскільки лабораторія не належить до вибухонебезпечних зон, зони з вибухонебезпечними сумішами відсутні, що дозволяє застосувати другий рівень захисту. Заходи включають:

- влаштування блискавкоприймачів на даху будівлі;

- прокладання струмовідводів;

- монтаж системи вирівнювання потенціалів для запобігання іскрінню та занесенню високого потенціалу в лабораторію через комунікації.

У разі виявлення пожежі або ознак горіння персонал лабораторії зобов'язаний діяти згідно з затвердженим планом евакуації [50]:

1. Негайно зателефонувати до Державної служби України з надзвичайних ситуацій за номером 101 (або 112), чітко повідомивши адресу, місце загоряння та наявність небезпечних факторів.

2. Перевірити безпечність шляху евакуації: обережно торкнутися дверей або металевої ручки тильною стороною долоні. Якщо вони гарячі — двері не відкривати, обрати альтернативний шлях.

3. Не входити до приміщень з високою концентрацією диму та видимістю менше 10 м — це свідчить про небезпечний рівень продуктів горіння.

4. Пересуватися до виходу пригнувшись (повзком або нахилившись), оскільки продукти горіння та отруйні гази накопичуються на рівні зростання людини та вище. Рот і ніс захистити підручними засобами (зволожена тканина, димозахисна маска).

5. Щільно зачиняти за собою двері на шляху евакуації, щоб перешкодити поширенню вогню та диму в суміжні приміщення.

6. Після виходу з небезпечного приміщення повідомити про своє місцезнаходження посадовим особам або керівнику робіт для проведення перевірки наявності персоналу.

7. До прибуття пожежних підрозділів розпочати гасіння пожежі первинними засобами (вуглекислотними вогнегасниками) за умови відсутності загрози для життя та з урахуванням безпечної відстані.

Для забезпечення пожежної безпеки в лабораторії також передбачено:

- план евакуації, розміщений на видному місці (біля входу);

- вказівні знаки напрямку до найближчих виходів та місць розташування вогнегасників;

- періодичні інструктажі з пожежної безпеки для всіх співробітників;

- навчальні тренування з евакуації не рідше двох разів на рік;

- перевірка справності системи пожежної сигналізації та вогнегасників згідно з регламентом.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Одним з основних показників, за допомогою якого оцінюється економічна ефективність нової техніки, є величина капітальних вкладень [49].

До таких капітальних вкладень відносяться витрати на науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи, включаючи випробування і доопрацювання дослідних зразків.

Для визначення вартості конструкторської підготовки виробництва складається кошторис витрат з моменту отримання завдання до виготовлення і заводських випробувань дослідного зразка включно і коректування документації за наслідками цих подій.

5.1 Розшифровка суми витрат по статтям кошторису:

І. Зарплата розробників по етапам розраховується, виходячи з кількості технічної документації (схем, креслень, текстової документації), що розробляється, з використанням нормативів базового підприємства на розробку різних видів документації. Зарплата виконавців по кожному етапу є сумою добутків тривалості етапів в днях на денну ставку виконавця (по всім виконавцям).

Тривалість етапу визначаємося як добуток кількості листів розробленої документації на відповідну норму часу в нормо-годинах на розробку, поділене на число прийнятих розробників і середню тривалість робочого дня (8 годин).

Денна ставка виконавця визначається відношенням місячного окладу до середнього числа робочих днів в місяці (22 дні).

Розрахунок зарплати розробників технічної документації на розробку системи керування положенням компактної сонячної панелі приведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок зарплати розробників технічної документації

№	Найменування етапів розробки	Одиниця	К-ть креслень	Норматив часу на одиницю, нормо - година	Трудомісткість етапу, люд.- година	Число виконавців	Тривалість етапу, днів	Денна ставка виконавців	Зарплата на етап, грн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Схема електрична функціональна	Схема ф.А1	1	1	1	1	0,12	564,4	70,55
2	Схема електрична принципова	ф.А1	1	8	8	1	1	487,5	487,5
3	Складальне креслення	ф.А1	1	12	12	1	2	471,2	942,4
4	Розрахунки	ф.А4	6	2	12	1	2	487,5	975,0
5	Записка пояснення	ф.А4	80	1	80	1	10	487,5	4875,00
6	Документи інші	ф.А4	3	1	3	1	0,38	471,2	176,70
7	Креслення друкованої плати	ф.А4	1	1	1	1	1	567,6	567,6
	Разом								8094,75

Зарплата виконавців на коректування документації визначається з трудомісткості розробки відповідних документів: коректування складає 15… 20% цій трудомісткості.

2. Зарплата на виготовлення і випробування дослідного зразка по всім етапам визначається таким чином: дослідний зразок виготовляється і випробовується в лабораторії; тривалість цих робіт узяті з досвіду базового підприємства, а потім розраховані аналогічно розрахунку зарплати на розробку документації (див. таблицю 5.1).

При визначенні зарплати на виготовлення дослідного зразка трудомісткість по видам робіт збільшена на 100% проти трудомісткості серійного виробу і підвищені розряди роботи на один з урахуванням ручних робіт в дослідному виробництві.

Таблиця 5.2 – Зарплата за виготовлення дослідного зразка

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудо-місткість нормо - год	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Монтажні	5	5	82,16	410,80
2	Складальні	6	2	93,60	187,20
3	Регулювальні	5	2	82,16	164,32
	Разом				762,32

3. Матеріальні витрати на зразок складаються з вартості матеріалів (таблиця 5.3) і комплектуючих виробів (таблиця 5.4) на проектований виріб. При цьому, виходячи з обліку втрат, вартість матеріалів і комплектуючих збільшена на 30%.

Таблиця 5.3 – Вартість матеріалів

№	Найменування	Одиниця виміру	К-ть на виріб	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Ізоляційні матеріали	кг	0,3	20,00	6,00
2	Провід, кабель	м	7	12,00	84,00
3	ПОС-60	кг	0,05	4500,00	225,0
4	Металеві вироби	кг	0,1	25,00	2,5
	Разом:				317,5

Таблиця 5.4 – Витрати на куповані комплектуючи вироби

№	Найменування	Кількість	Ціна одиниці	Сума, грн
1	Трансформатор 220/12	1	520,00	520,00
2	Конденсатор	9	6,10	55,00
3	Мікроконтролер	1	200,00	200,00

4	Резистор	21	0,50	10,50
5	Діод	2	12,00	24,00
6	Інтегральний стабілізатор	1	30,00	30,00
7	Кварцевий резонатор	1	17,00	17,00
8	Гніздо	2	12,42	24,84
9	Мікросхеми	6	257,80	1547,00
10	Роз'єми	3	20,00	60,00
11	Дросель	1	62,00	62,00
	Разом:			2550,34

4. Накладні витрати беруться у розмірі 20…140% сумарної зарплати розробників з урахуванням виготовлення і випробування дослідного зразка і коректування документації за наслідками випробувань.

5. Собівартість дослідного зразка визначається за формою таблиці 5.5.

Інші витрати включають невраховані витрати на виготовлення або придбання спеціальної апаратури, необхідної для випробування макету і дослідного зразка. Виходячи з вищенаведених розрахунків, складається кошторис витрат на конструкторську підготовку виробництва виробу (табл. 5.6).

Таблиця 5.5 – Калькуляція собівартості дослідного зразка

№	Стаття витрат	Витрати на проектований виріб, грн.
1.	Матеріали	317,5
2	Куповані комплектуючи вироби	2550,34
3	Транспортні витрати (5% п.1+п.2)	143,4
4	Заробітна плата виробничих робочих	762,32
5	Нарахування на зарплату (37%)	282,06
6	Накладні витрати(120% п.4)	914,8
	Разом собівартість	4970,42

Таблиця 5.6 – Кошторис витрат на конструкторську підготовку виробництва

№	Стаття витрат	Сума, грн
	Зарплата розробників по всім етапам розробки	8094,75
	Зарплата на коректування технічної документації за наслідками випробувань дослідного зразка (20% п.1)	1618,95
	Разом ФЗП	9713,70
	Нарахування на зарплату (37%)	3594,07
2	Накладні витрати (120% ФЗП)	11656,44
3	Собівартість дослідного зразка	4970,42
	Інші витрати	914,8
	Всього вартість розробки	40563,13

Для складання калькуляції собівартості і визначення ціни виробу необхідно розрахувати зарплату робочих, безпосередньо зайнятих у виробництві розробленого блоку.

Заробітна плата виробничих робочих визначається на підставі трудомісткості виготовлення виробу, розрядів і відповідних тарифних ставок по видах робіт [50].

Розрахунок заробітної плати виробничих робочих представлений в таблиці 5.7. Основними видами виконуваних робіт є складальні, монтажні і регулювальні роботи.

Таблиця 5.7 – Заробітна плата виробничих робочих

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудомісткість нормо - год	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Монтажні	4	2	70,20	140,40
2	Складальні	5	1	82,16	82,16
3	Регулювальні	5	1	82,16	82,16
	Разом				304,72

5.2 Розрахунок собівартості серійного виробу проводиться на основі калькуляційних статей витрат

Загальновиробничі витрати прийняті у розмірі 120% від суми основної заробітної плати виробничих робочих. Прибуток – 30% від виробничої собівартості.

Таким чином, калькуляція собівартості і ціни одиниці виробу має вигляд, представлений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Калькуляція собівартості і ціни одиниці виробу

№	Стаття витрат	Величина на проектований виріб, грн.	Примітка
1	Матеріали	317,5	Табл. 5.3
2	Куповані комплектуючі вироби	2550,34	Табл. 5.4
3	Транспортні витрати	143,4	5% (п.1+п.2)
4	Основна зарплата робочих	304,72	Табл. 5.7
5	Додаткова зарплата робочих	60,94	20% п.4
6	Відрахування на соц. заходи	135,3	37% (п.4+п.5)
7	Загальновиробничі витрати	438,8	120% п.4
8	Разом виробнича собівартість	3951	
9	Прибуток	1185,3	30% п.8
	Ціна виробника	5136,63	

У сучасних умовах при проектуванні будь-якого виробу необхідно обґрунтувати доцільність його серійного випуску за допомогою розрахунку основних економічних показників.

Економічне обґрунтування технічних рішень включає визначення економічного ефекту, ефективності і терміну окупності інженерної розробки.

Річний економічний ефект розраховується по формулі [49]:

$$Э = П \times В - е \times К, \qquad (5.1)$$

де $П$ – очікуваний прибуток від реалізації одиниці продукції,

П=1185,3 грн.;

$В$ – об'єм випуску продукції в рік, В=100 шт.;

$е$ – нормативна величина ефективності, е = 0,15;

$К$ – капітальні вкладення на розробку виробу К=40563,13 грн.

Підставимо у формулу (5.1) очікуваний прибуток від реалізації одиниці продукції і капітальні вкладення на розробку виробу і розрахуємо величину річного економічного ефекту:

$$Є = 1185{,}3 \times 100 - 0{,}15 \times 40563{,}13{,}00 = 112445{,}5\, грн.$$

Економічна ефективність визначається по формулі:

$$E = \frac{Є}{K}. \qquad (5.2)$$

Тобто, економічна ефективність інженерної розробки буде дорівнювати:

$$E = \frac{112445{,}5}{40563{,}13} = 2{,}7 \text{ грн./грн.}$$

Термін окупності є величиною, зворотною економічній ефективності і розраховується по формулі [49]:

$$\mathrm{T} = \frac{1}{\mathrm{E}}. \qquad (5.3)$$

Термін окупності проектованого виробу складе:

$$T = \frac{1}{2{,}55} = 0{,}36 \text{ року.}$$

Таблиця 5.9 – Основні економічні показники

Найменування показника	Одиниці виміру	Величина показника
Вартість капітальних вкладень	грн.	40563,13
Ціна виробника	грн.	5136,63
Випуск за рік (орієнтований)	шт.	100
Річний економічний ефект	грн.	112445,5
Економічна ефективність	грн./грн.	2,7
Термін окупності	рік	0,36

Економічні розрахунки підтвердили доцільність виготовлення системи керування положенням компактної сонячної панелі.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту розроблено систему керування положенням компактної сонячної панелі, призначену для забезпечення оптимальної орієнтації компактного фотоелектричного модуля відносно джерела сонячного випромінювання з метою підвищення енергетичної ефективності сонячної установки. Виконано комплекс робіт згідно поставленого завдання.

Обґрунтовано актуальність створення систем стеження за сонцем для компактних фотоелектричних модулів, оскільки застосування двовісних трекерів дозволяє збільшити виробіток електроенергії на 20–40 % порівняно з нерухомими конструкціями.

Розроблено структурну та принципову схеми системи керування на основі сучасного мікроконтролера, що забезпечує:

- обробку сигналів від оптичних датчиків;
- формування керуючих впливів на приводи;
- реалізацію алгоритму відстеження положення сонця за двома осями.

В конструкторсько-технологічному розділі спроєктовано друковану плату системи керування у середовищі DipTrace та розглянуті сучасні методи виготовлення друкованих плат.

В розділі техніко-економічного обгрунтування були проведені розрахунки які підтвердили доцільність розробки.

Також розглянуті питання з охорони праці та техногенної безпеки, було розраховано заземлення для лабораторії де проводиться проектування систем управляння.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Germany should accelerate its renewable energy transition. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.nature.com/articles/s43247-025-02919-5.

2. Unveiling the drivers of environmental performance by investigating the Nexus of energy, economic complexity and institutional quality in G7 nations. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.nature.com/articles/s41598-024-81727-x.pdf#7#4

3. THE RISE OF SMART SOLAR: HOW INTELLIGENT TRACKING SYSTEMS ARE CHANGING THE INDUSTRY. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A15%3A14762399/detailv2?sid=ebsco%3Aocu_results%3Asitemap&id=ebsco%3Adoi%3A10.26634%2Fjps.13.3.22653&bquery=DE%20%22EFFICIENCY%20of%20photovoltaic%20cells%22&page=1&crl=f&link_origin=none

4. Automated-Solar-Tracking-System. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/RustyUjjwal/Automated-Solar-Tracking-System

5. Success Story: Nevados Tackles Siting Challenges with Innovative Solar Trackers. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stage.energy.gov/cmei/systems/articles/success-story-nevados-tackles-siting-challenges-innovative-solar-trackers

6. Design and evaluation of a microcontroller-based prototype of automatic dual-axis solar tracking system with integrated wind protection. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/397800901_Design_and_evaluation_of_a_microcontroller-based_prototype_of_automatic_dual-axis_solar_tracking_system_with_integrated_wind_protection

7. HelioWatcher: Automatic Solar Panel Control. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/

FinalProjects/s2012/jeb373_jpw97/WEBSITE_HTML_HELIOWATCHER/HelioWatcher.htm

8. The Aerodynamically Driven Orientation Control of a Solar Panel on an Aircraft with Numerical Simulation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2012/jeb373_jpw97/WEBSITE_HTML_HELIOWATCHER/HelioWatcher.htm

9. Assessing Ukrainian Territory Suitability for Solar Power Station Placement Using Satellite Data on Climate and Topography. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/31430ca5-6955-4777-aec6-48b829ae08de/content

10. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas_2024_publication.pdf

11. Global Solar Atlas. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://globalsolaratlas.info/map

12. M. V. Maryushko, R. E. Pashchenko and N. S. Kobluk, "Monitoring of agricultural cultures using Sentinel-2 space images", RADIOELECTRON. COMPUT. SYST. , No. 1, pp. 99-108, March. 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.32620/reks.2019.1.11H

13. A., Effat, "Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis", International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, vol. 2, pp.205-220, Aug. 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:40338368

[14] R. Mahtta, P. K. Joshi, and A. K. Jindal, "Solar power potential mapping in India using remote sensing inputs and environmental parameters," Renew. Energy , vol. 71, pp. 255-262, November. 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.037

[15] S. N. Shorabeh, M. K. Firozjaei, O. Nematollahi, H. K. Firozjaei, and M. Jelokhani-Niaraki, "A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for

solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran," Renew. Energy, vol. 143, pp. 958-973, Dec. 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.063

[16] N. S. Imamverdiyev, "Site selection for solar photovoltaic system installation using analytical hierarchy process model in Azerbaijan," J.Belarusian State University. Geogr. Geol., no. 1, pp. 75-92, Jun. 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-1-75-92

[17] J. Heo, H. Moon, S. Chang, S. Han, and D.-E. Lee, "Case Study of Solar Photovoltaic Power-Plant Site Selection for Infrastructure Planning Using a BIM-GIS-Based Approach," Appl. Sci., vol. 11, no. 18, p. 8785, Sep. 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.3390/app11188785

[18] V. Kharchenko, H. Fesenko, and O. Illiashenko, “Basic model of non-functional characteristics for assessment of artificial intelligence quality”, RADIOELECTRON. COMPUT. SYST., no. 2, pp. 131-144, 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.11

19. K. Mohammadi and N. Goudarzi, "Study of inter-correlations of solar radiation, wind speed and precipitation under the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California," Renew. Energy, vol. 120, pp. 190-200, May 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.069

20. Schmid M. Revisiting the Definition of Solar Cell Generations. Advanced Optical Materials. 2023. Vol. 11, No. 24. P. 2300697. DOI: 10.1002/adom.202300697.

21. Ahmed S., Ali A., Ansari J.A., Qadir S.A., Kumar L. A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic Systems: Scope, Technologies, Applications, Progress, Challenges, and Recommendations. IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 69723-69750. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3558539

22. Xu J. A comprehensive survey of the maximum power point condition of photovoltaic models. Solar Energy. 2024. Vol. 275. P. 112650. DOI:10.1016/j.solener.2024.112650.

23. Olayiwola T.N., Hyun S.H., Choi S.J. Photovoltaic Modeling: A Comprehensive Analysis of the I–V Characteristic Curve. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 432. DOI: 10.3390/su16010432

24. J. Rizk, and Y. Chaiko. Solar Tracking System: More Efficient Use of Solar Panels // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol:2, No:5, 2008.

25. Rajendra Singh, Sunil Kumar Gupta, Neeraj Tiwari. Enhancing solar energy collection with the implementation of a dual-axis tracking system. IOP Publishing Engineering Research Express, Vol. 7(1), January 2025. DOI: 10.1088/2631-8695/adabb9

26. Best Research-Cell Efficiency Chart. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.nlr.gov/pv/cell-efficiency

27. Design and implementation of pneumatic actuators in a dual-axis solar tracker under the climatic conditions of karbala city. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148124022201

28. Перетворювач струм-напруга. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-photovoltaic-and-photoconductive-modes-of-photodiode-operation/

29. Analog Devices. (2021). AD8551/AD8552/AD8554: Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers (Rev. 0) [Datasheet]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8551_8552_8554.pdf

30. Microchip Technology Inc. (2024). ATmega328/P [Datasheet]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328

31. Banik Rita; Biswas Ankur. An Efficient Solar Energy Management Using IoT-Enabled Arduino-Based MPPT Techniques. ICFAI University Tripura,Department of EEE; Tripura Institute of Technology,Department of CSE DOI: 10.1002/9781119905233.CH10

32. Infineon Technologies AG. (2007). BTM7740G: TrilithIC (Rev. 1.0) [Datasheet]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https:// www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTM7740G-DS-v01_01-en.pdf

33. TLE 4278 G: 5-V Low Drop Fixed Voltage Regulator [Datasheet]. Neubiberg: Infineon Technologies AG, 2005. 19 p. Rev. 1.3.

34. Texas Instruments. LM340, LM340A and LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf

35. Трансформатори малої потужності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/8185

36. Technical Data for Magnet Copper Wire by Size acc. to IEC 60317 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.elektrisola.com/en-us/ Products/Enamelled-Wire/Technical-Data

37. Simulate Circuits Online: Circuit Simulation Made Simple. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.elektormagazine.com/articles/ simulate-circuits-online-circuit-simulation-made-simple

38. Autodesk. Thinkercad. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tinkercad.com

39. Tinkercad Arduino Simulation: Teach Electronics Online Free [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zbotic.in/tinkercad-arduino-simulation-teach-electronics-online-free/

40. Arduino Solar Tracker. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/marcoseverini/arduino-solar-tracker

41. Програма Diptrace. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http:// diptrace.com/

42. Printed Circuit Boards Technology and Services: An Insight into SQPCB. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sqpcb.com/ru/ printed-circuit-boards-technology/

43. Технологія та практичні аспекти поверхневого монтажу SMT. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tme.eu/ua/news/library-

articles/page/73156/tekhnologiia-ta-praktichni-aspekti-poverkhnevogo-montazhu-smt/

44. Гандзюк М.П. Желібо Є. П. Основи охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ктеп.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Gandzyuk-osnovy_ohorony_prac.pdf

45. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція і кондиціонування. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018 (дата звернення: 18.02.2026).

46. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

47. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ: Мінрегіонбуд України, 2018.

48. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. — Київ: Міненерговугілля України, 2017.

49. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою

50. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні

51. Попова В.Д. Методичні вказівки до виконання економічної й організаційної частини дипломної роботи – Запоріжжя, 2005,-36с.

52. Мінімальна заробітна плата в Україні 2026. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://index.minfin.com.ua/ua/labour/salary/min/ (дата звернення: 21.02.2026).

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 Е1	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Схема електрична структурна		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 Е3	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Схема електрична принципова		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 Д1	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Моделювання алгоритмів		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.01	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Плата друкована		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 Д2	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Економічні показники		
А1			ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 Д3	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі		
				Охорона праці		

Перев. заспюсув.

Дубл. №

Підп. і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. і дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00		
Розроб.		Сальніков		8.06.26	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Шмалій		8.06.26				1
Н.контр.		Туришев		8.06.26		ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1713-с2		
Затверд.		Критська		8.06.26				

Копіював

Формат А4

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		Конденсатори		
	C1	KF 1000 мкФ 25В	1	Jamicon
	C2	KF 100 мкФ 16В	1	Jamicon
	C3	К73-5-0.1 мкФ 50В +/-5%	1	
	C4	К73-5-100 пФ 50В +/-5%	3	
	C5	К73-5-22 мкФ 50В +/-5%	1	
	C6..C7	К10-7В-22 пФ 25В	2	
	C8	К73-5-0,047 мкФ 50В +/-5%	1	
	C9	К73-5-10 мкФ 25В +/-5%	1	
	DA1	Мікросхема LM7805	1	
	DA2..DA4	Мікросхема AD8552	3	
	DA5	Мікросхема TLE4278G	1	
	DA6..DA7	Мікросхема BTM7740G	2	
	DD1	Мікроконтролер ATmega328	1	Microchip
	L1	Дросель CD54NP-100MC-10мкГн +|-10%	1	
	R1..R5	Резистор С2-23-0,5-1 Ом +/-10%	5	
	R6..R10	Резистор С2-23 2кОм +/-10%	5	
	R11..R15	Резистор С2-23-2 39кОм +/-10%	5	
	R16, R17	Резистор С2-23 22кОм +/-10%	2	
	R18	Резистор С2-23 510кОм +/-1%	1	
	R19	Резистор С2-23 100кОм +/-1%	1	
	R20, R21	Резистор С2-23 10кОм +/-1%	2	
	VD1	Діод 1N5400	1	
	VD2	Стабілітрон MM9Z39	1	
	XP1,XP2	Разъем NS25-W2K	2	Elhurt
	XP3	Разъем NS25-W6K	1	Elhurt
	XS1..XS2	Разъем WH-2R	2	Ninigi
	ZQ1	Кварцевий резонатор KXO-210 16.0 MHz	1	

Перев. застосув. | Довід. № | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підп. і дата | Інв. № подл. | Підп. і дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ Д.23664.00.00.00.00 ПЕЗ		
Розроб.		Сальніков		8.06.26	Система керування керування положенням компактної сонячної панелі Перелік елементів	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів
Перевір.		Шмалій		8.06.26			ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1713-с2
Н.контр.		Туришев		8.06.26			
Затверд.		Критська		8.06.26			

Копіював | Формат А4