

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

на тему Проектування та моделювання системи відстеження сонця для
підвищення ефективності фотоелектричних установок

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ
Спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Коломієць В.О

В. Коломієць

Керівник Галай В.М

Рецензент


Леві, Д.І

Полтава – 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Рівень вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій


“ 15 ” 09 2025 р.

О.В. Шефер

2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Коломійцю Владиславу Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) **«Проектування та моделювання системи відстеження сонця для підвищення ефективності фотоелектричних установок»**
керівник проекту (роботи) Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від “03” 09 2025 року
№ 1025-ф.а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідні дані для проекту (роботи) **Географічне розміщення – Україна. Кількість ФЕП – 4. Показники освітленості отримані від оптичних сенсорів. Технічна документація фотоелектричних установок.**
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд сучасних сонячних електростанцій. Розрахунок навантаження, вибір обладнання. Математична модель положення Сонця(астрономічні рівняння). Розробка системи керування ФЕУ. Дослідження та аналіз розробленої ФЕУ. Висновки по роботі
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
 - 1) Структурна схема системи автоматичного відстеження сонця
 - 2) Електрична принципова схема
 - 3) Графіки зміни положення сонця та порівняння продуктивності
 - 4) Алгоритмічна схема роботи системи
 - 5) Висновки по роботі

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Термін	І	II	
1	Огляд трекера для сонячних електростанцій та акумулявання	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Методи підвищення ефективності двовісної сонячної електростанції	21.10.25	I	25%	Пл. 2
3	Двовісна система відстеження сонця	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Вибір сенсорів, виконавчих механізмів і контролера	11.11.25		50 %	Пл. 4
5	Розрахунок кутів орієнтації фотоелектричних панелей	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Розробка системи керування ВЕС з одним та двома вітроколесами.	25.11.25		70%	Пл. 6,7
7	Розробка веб серверу для дистанційного керування системою	09.12.25		90%	Пл. 8,9
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 10

Магістрант

В. Коліца
(підпис)

Коломієць В.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Г. Галай
(підпис)

Галай В.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи магістра

«Проектування та моделювання системи відстеження сонця для підвищення ефективності фотоелектричних установок»

Робота містить 76 сторінок, 42 рисунків, 15 таблиць, 22 використаних джерел.

Ключові слова: двовісний сонячний трекер,

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є розробка та моделювання конструктивної схеми, апаратних компонентів (сенсорів, виконавчих механізмів) та алгоритмів керування для двоосьової системи відстеження сонця. **Об'єктом дослідження** є процес перетворення сонячної енергії в електричну в умовах динамічної орієнтації ФЕП.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у проектуванні та обґрунтуванні технічних рішень системи відстеження, здатної забезпечити максимальний річний виробіток енергії ФЕ установкою.

Зростаючий попит на відновлювані джерела енергії вимагає постійного підвищення ефективності фотоелектричних (ФЕ) установок. Одним із найбільш дієвих способів максимізації вироблення енергії є використання систем активного **відстеження Сонця (сонячних трекерів)**. Такі системи забезпечують постійну перпендикулярну орієнтацію ФЕ панелей до сонячних променів, що суттєво збільшує загальну річну генерацію порівняно зі стаціонарними системами.

ABSTRACT

Master's qualification work

"Design and modeling of a solar tracking system to increase the efficiency of photovoltaic installations"

The work contains pages 76, 42 figures, 15 tables, 22 used sources.

Keywords: two-axis solar tracker,

The subject of the qualification work is the development and modeling of a structural scheme, hardware components (sensors, actuators) and control algorithms for a two-axis solar tracking system. The object of the research is the process of converting solar energy into electricity under conditions of dynamic orientation of the PV array.

The purpose of the qualification work is to design and justify technical solutions for a tracking system capable of ensuring the maximum annual energy output of a PV installation.

The growing demand for renewable energy sources requires a constant increase in the efficiency of photovoltaic (PV) installations.

One of the most effective ways to maximize energy production is the use of active Sun tracking systems (solar trackers). Such systems ensure constant perpendicular orientation of PV panels to the sun's rays, which significantly increases the total annual generation compared to stationary systems.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1.....	9
1.1 Основи роботи фотоелектричних систем.....	9
1.2 Типи сонячних панелей і їх характеристики.....	12
1.3 Системи акумулювання електричної енергії.....	16
1.4 Огляд трекера для сонячних електростанцій.....	17
1.5. Методи підвищення ефективності двовісної сонячної електростанції.....	24
1.6 Методи відстеження сонця.....	26
РОЗДІЛ 2.....	30
2.1 Вибір та обґрунтування конструктивної схеми системи.....	30
2.1.1 Двовісна система відстеження Сонця.....	30
2.1.2 Вибір сенсорів, виконавчих механізмів і контролера.....	37
2.1.3 Розрахунок кутів орієнтації фотоелектричних панелей.....	46
2.2 Огляд існуючої конструкції.....	49
2.3 Опис конструкції трекера.....	50
2.4 Розрахунок приводного двигуна.....	52
2.5 Вибір двигуна електропривода поворотного механізму.....	54
2.6 Вибір частотного перетворювача.....	56
2.7 Комп'ютерне моделювання системи.....	60
РОЗДІЛ 3.....	67
3.1 Огляд мобільного за стосунку.....	67
3.2 Порівняння характеристик стаціонарної та трекінгових систем.....	70
3.3 Висновки.....	73
Список літератури.....	74
Додаток А.....	76

ВСТУП

Суспільство, наука і технології дуже швидко розвиваються в наш час, що призводить до попиту на енергетичні ресурси — людина, використовує енергію майже у кожній сфері своєї діяльності, і кожного року ми маємо, зростаючу потребу в енергетичних ресурсах.[3]

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) швидко стає пріоритетом для розвитку глобальних енергетичних джерел. Використання ВДЕ визначається, не лише обмеженими запасами корисних копалин, але й необхідністю зменшення викидів парникових газів в атмосферу (особливо CO₂), щоб допомогти зменшити парниковий ефект. Щорічний потенціал ВДЕ планети, теоретично, в п'ятнадцять разів перевищує потенційний запас органічного та ядерного палива і в вісімдесят разів більше, ніж традиційні енергетичні ресурси. В теорії, лише сонячна енергія може конкурувати з сьогоdnішніми традиційними джерелами енергії з палива в боротьбі за енергоспоживання. [5]

Можливо, що лише 0,0125% сонячного світла, яке досягає поверхні Землі, може покрити поточне глобальне споживання енергії. Сонячна енергія — це енергія, доступна Землі від Сонця у вигляді сонячного випромінювання та світла. З доступних ВДЕ сонячна енергія є найбільш доступним і невичерпним джерелом енергії, яке можна практично використовувати по всій поверхні Землі.[1]

Тому люди розглядають сонячну генерацію енергії ,як перспективну галузь з точки зору технологій і прогресу у використанні ВДЕ. Завдяки географічному розташуванню потенціал сонячної енергії в Україні має високі показники, оскільки клімат і розташування країни сприятливі для виробітку сонячної енергії. Кількість сонячного випромінювання на квадратний метр Землі — є більшою, ніж у різних європейських країнах.[2]

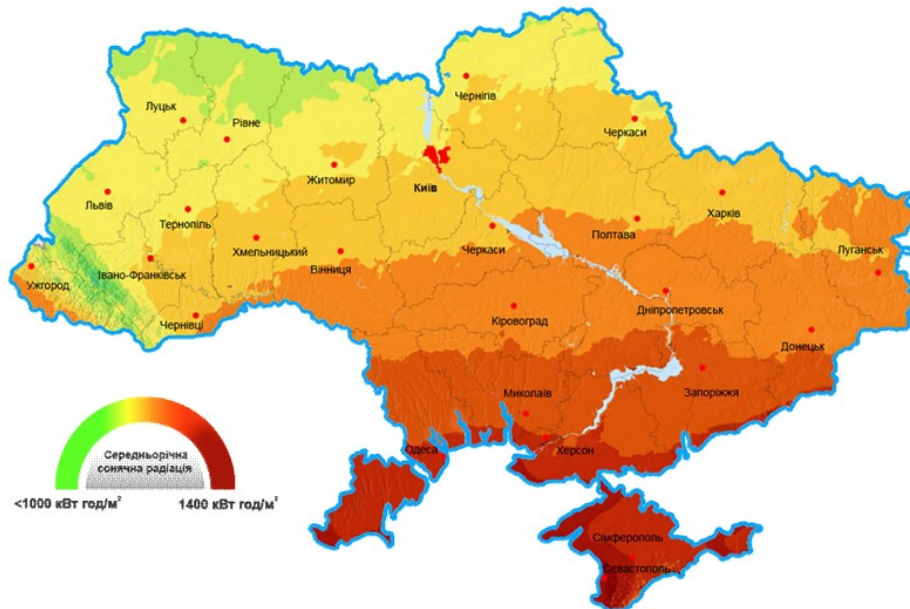


Рисунок В1. Рівень інсоляції на території України

Зі стрімким розвитком і все глобальним використанням ВДЕ, зокрема сонячної, зростає потреба в пошуку нових підходів і технічних рішень, які дозволяють підвищити ефективність та продуктивність уже наявних енергетичних систем. [4]

Основною метою таких досліджень є забезпечення найбільш ефективного перетворення сонячної енергії в електрику. Найпоширенішим методом прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію є використання фотоелектричних панелей (сонячних модулів). Вони є основним компонентом будь-якої фотоелектричної системи. Їхні переваги включають просту конструкцію, стабільні електричні характеристики, довговічність та високу стійкість до зовнішніх впливів.[1]

Потужність сонячного модуля визначається не лише його технічними характеристиками та інтенсивністю освітлення, але й кутом падіння сонячних променів. Для досягнення максимальної ефективності перетворення енергії цей кут повинен бути близьким до 90° . [1]

Оскільки Сонце рухається по дузі зі сходу на захід протягом дня, а його траєкторія змінюється протягом року — з півдня на північ — (в межах приблизно 45°), кут падіння сонячного випромінювання на поверхню Землі

також змінюється: влітку він становить близько 69° , навесні та восени близько 40° , а взимку приблизно 14° . (рис. 2) .

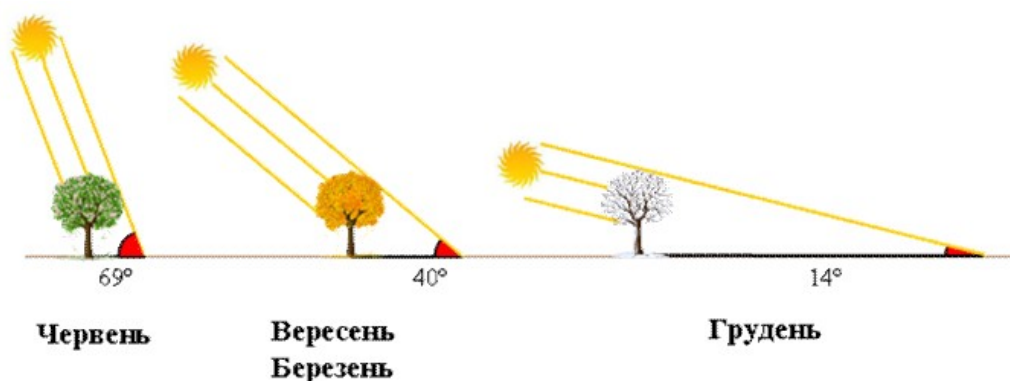


Рисунок В2. Зміна положення сонця відносно пори року

Через ці зміни фіксовані сонячні панелі втрачають близько 30–60% потенційно можливої енергії, оскільки промені Сонця не завжди падають на їхню поверхню під прямим кутом (Рис. 3).

Таким чином, для підвищення ефективності фотогальванічних модулів необхідно забезпечити можливість динамічної зміни їхнього кута нахилу.

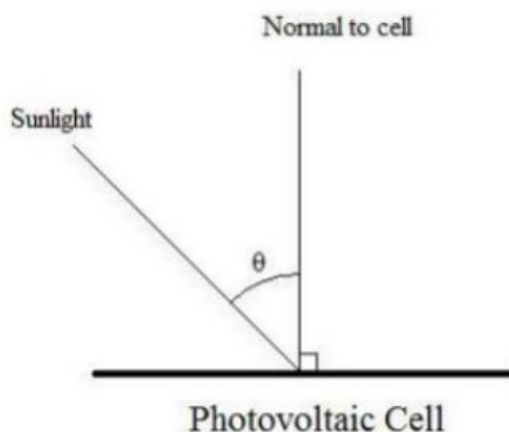


Рисунок В3. Кут падіння сонячних променів на сонячну анель

Одним з рішень цієї проблеми є використання сонячних трекерів — систем автоматичного відстеження руху Сонця, які змінюють положення фотогальванічних панелей протягом дня та року.

Такі пристрої дозволяють підтримувати оптимальний кут нахилу поверхні ФЕП, максимально наближений до 90° відносно напрямку сонячних променів, що значно підвищує ефективність виробництва електроенергії.

Метою дослідження є підвищення ефективності та продуктивності сонячних електростанцій шляхом розробки та впровадження оптимального дизайну системи відстеження (відстеження положення Сонця).[2]

Для досягнення цієї мети передбачається розробка системи з використанням сучасних комп'ютерних моделей та застосунків для руху сонячного випромінювання, оптимального розміщення сонячних фотоелектричних панелей та оцінки ефективності різних систем обертання на станції.[5]

Основною метою таких досліджень є забезпечення найбільш ефективного перетворення сонячної енергії в електрику. Найпоширенішим методом прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію є використання фотоелектричних панелей (сонячних модулів). Вони є основним компонентом будь-якої фотоелектричної системи. Їхні переваги включають просту конструкцію, стабільні електричні характеристики, довговічність та високу стійкість до зовнішніх впливів.[6]

Потужність сонячного модуля визначається не лише його технічними характеристиками та інтенсивністю освітлення, але й кутом падіння сонячних променів. Для досягнення максимальної ефективності перетворення енергії цей кут повинен бути близьким до 90° .[6]

Оскільки Сонце рухається по дузі зі сходу на захід протягом дня, а його траєкторія змінюється протягом року — з півдня на північ — (в межах приблизно 45°), кут падіння сонячного випромінювання на поверхню Землі також змінюється: влітку він становить близько 69° , навесні та восени близько 40° , а взимку приблизно 14° . (рис. 2) .

Система забезпечить ефективне використання сонячного випромінювання протягом світлового дня, мінімізуючи втрати енергії, а також забезпечить щорічне збільшення коефіцієнта ефективності сонячних установок. [3]

Об'єкт дослідження: Методи, алгоритми та технічні рішення для моделювання механічної та автоматичної системи відстеження Сонця з метою підвищення ефективності фотоелектричних установок. Методи дослідження. У цій дисертації будуть використані наступні методи: Аналітичні підходи: Обробка наукових публікацій, стандартів та технічної документації для знаходження правильних теоретичних основ для побудови систем відстеження Сонця.[2]

Методи математичного моделювання – опис кінематики руху Сонця та розрахунок оптимальних кутів орієнтації фотоелектричних панелей. Комп'ютерне моделювання – з використанням спеціального програмного забезпечення (наприклад: MATLAB/Simulink, SolidWorks, PVsyst) для підтвердження працездатності обраних алгоритмів та підходів до управління.

Імітаційне моделювання – для розрахунку продуктивності системи в різних погодних та сезонних умовах, а також для моделювання продуктивності та енергоефективності.[3]

РОЗДІЛ 1

1.1 Основи роботи фотоелектричних систем

Фотовольтаїчні пристрої — або сонячні панелі — отримали свою назву від процесу, за яким світло (фотони) перетворюється на електрику (напругу), так званий фотоелектричний ефект.[7]

Щоб довести, що фотовольтаїчна технологія є новим засобом отримання сонячної енергії, вчені з Bell Laboratories у 1954 році розробили першу ефективну кремнієву сонячну панель, яка могла генерувати електричний струм під сонячним світлом. Спочатку сонячні панелі використовувалися для живлення космічних супутників та невеликих пристроїв, таких як калькулятори та годинники.[7]

Сьогодні електроенергія від сонячних елементів може бути конкурентоспроможною в багатьох регіонах, і фотовольтаїчні системи встановлюються у великому масштабі для живлення електричної мережі. Порівняно з більшістю сучасних сонячних елементів, які виготовляються сьогодні, вони виробляються з кремнію за розумною ціною та з великою ефективністю.[8]

Ці елементи збираються в модулі, які можна прикріпити до дахів будівель або встановити великі установки на наземних стійках різних структур системи. Іншою дуже поширеною технологією є сонячні панелі, виготовлені з тонких шарів напівпровідникового матеріалу, включаючи телурид кадмію або мідь-індій-галій-диселенід.[7]

Ці панелі є гнучкими та легкими, що робить їх придатними для портативних застосувань. Третій різновид — це III-V сонячні панелі, що складаються з елементів, які належать до груп III та V періодичної таблиці, наприклад, галій та арсен. Вони дорожчі у виготовленні, але мають вищу ефективність, тому використовуються для високотехнологічних застосувань, наприклад, космічних супутників. Перетворення сонячної енергії в електрику відбувається завдяки фотоелектричному ефекту, який виникає, коли сонячне випромінювання

(фотони) потрапляє на гетерогенну напівпровідникову решітку, звану «р-п переходом».[4]

Ця гетерогенна структура є результатом легування напівпровідника різноманітними домішками, включаючи фосфор або арсен. Один пласт може бути легований фосфором, а інший пласт бором.[3]

Це призводить до надлишку електронів на пласті, легovanому фосфором, і дефіциту на пласті, легovanому бором, або, іншими словами, до утворення "р-п переходу". Коли електрони отримують енергію від фотонів світла, вони рухаються через цей перехід, створюючи впорядкований рух заряджених частинок і викликаючи утворення електричного струму.[3]

Тонкі мідні смужки, що з'єднують напівпровідникові пластини, збирають струм і передають його споживачу. Продуктивність фотогальванічних перетворювачів значно варіюється в залежності від ряду параметрів, включаючи характеристики конкретного напівпровідника.[4]

Найефективніші сонячні елементи наразі виготовляються з полікристалічного або монокристалічного кремнію з ефективністю приблизно 17%. Але вже існують сонячні панелі з ефективністю понад 20%. Сонячні елементи на основі аморфного кремнію мають нижчу ефективність (близько 12%), але є переважними через їх гнучкість.[4]

Для підвищення продуктивності вивчаються альтернативні напівпровідникові технології (наприклад, галій, кадмій, селен, телур).[7]

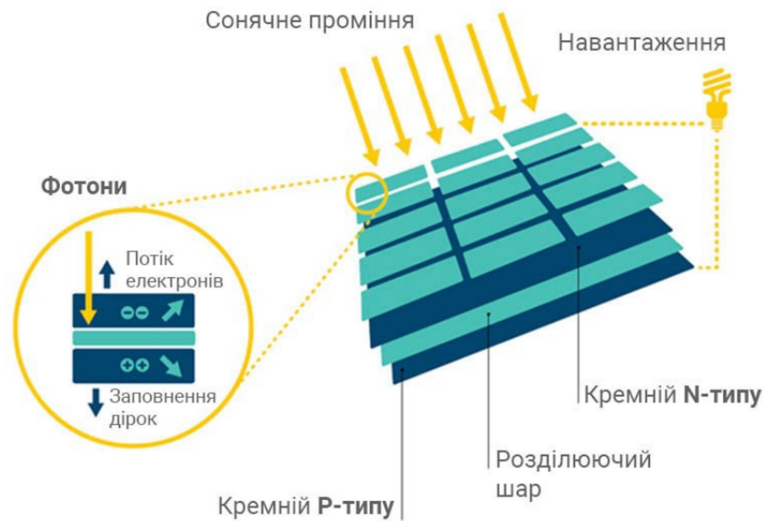


Рисунок 1.1 Принцип роботи сонячної батареї

Розвиток технологічних досягнень, підвищення енергоефективності та зниження цін на сонячні панелі дійсно зробили сонячну енергію конкурентоспроможною і вже відіграють важливу роль у глобальному енергетичному ландшафті.[3]

У 2017 році загальна встановлена потужність сонячних панелей досягла 90 ГВт, що приблизно відповідає потужності генерації електроенергії цілої країни, такої як Туреччина.[9]

Це досягнення відображає великий ріст сонячної енергії як продуктивного джерела електрики. Завдяки передовим технологіям виробництва, сонячні панелі також стали більш доступними на ринку за значно простішими економічно ефективними методами - зниженням ціни на "сонячне" постачання енергії.[3]

Тепер ці технології повністю конкурують із традиційними формами джерел енергії, без жодних стимулів, які могли б знадобитися, таких як зелені тарифи.[7]

Це має ширші перспективи для розвитку сонячної енергії як стійкого та життєздатного джерела енергії і для зменшення залежності від вугілля та інших форм енергії, які виробляють величезні обсяги вуглекислого газу.[5]

Так само зростаюча популярність сонячної енергії може допомогти досягти глобальних цілей щодо зменшення викидів парникових газів і у формуванні енергетичного майбутнього.[5]

1.2. Типи сонячних панелей і їх характеристики

Існує кілька різних видів сонячних панелей, які представлені на ринку, з різними дизайнами, ефективністю, вартістю та застосуванням. Переваги та недоліки, пов'язані з кожним типом, роблять його найкращим рішенням для певної задачі. Система повинна знати ці відмінності, щоб вирішити, яка сонячна система найкраще відповідає потребам.[2]

Монокристалічні сонячні панелі. Такі панелі широко визнані еталоном ефективності. Вони виготовлені з одного, кристалічного твердого кристала надчистого кремнію; тому вони мають стандартний темно-синій або майже чорний відтінок.[2]

Полікристалічні сонячні панелі. Полікристалічні панелі містять багато кремнієвих кристалів, на відміну від монокристалічних панелей. Вони можуть легко змінювати і притягувати сонячне світло. Нерівномірна кристалічна структура надає їм характерний "плямистий" синій відтінок. Це набагато менш енергоємне і дешевше виробництво, тому полікристалічні панелі набагато дешевші.[2]

Тонкоплівкові сонячні панелі. Коротко кажучи, тонкоплівкові панелі є не лише найдешевшими, але й найменш ефективними. Вони є тонкими шарами фотогальванічного матеріалу (такого як аморфний кремній і кадмій телурид) на гнучкій підкладці. Як наслідок, вони легкі та гнучкі, що розширює їх застосування. Ми розглянемо кожен з них у різному світлі: Монокристалічні панелі. Ці панелі складаються з одного однорідного кристала кремнію (99,99%).[2]

Ця структура розвивається за допомогою методу Чохральського, який відокремлює "вирощування" кристала з розплавленого кремнію за допомогою

насіння. Однорідна кристалічна решітка містить найменші дефекти, тому електрони можуть природно переміщатися на межах зерен. Це основна причина їхньої вищої ефективності.[2]

Монокристалічні панелі мають низький температурний коефіцієнт потужності (зазвичай $-0,35$ до $-0,40$ $\%/^{\circ}\text{C}$). Тому при нагріванні вони втрачають менше ефективності, ніж полікристалічні панелі. Вони найкраще працюють при низьких температурах і морозі.[2]

Вони так структуровані, що поглинають значну кількість синього, ультрафіолетового світла — вони дуже добре працюють у ясні дні і тому продуктивні.



Рисунок 1.2 Стандартна монокристалічна панель

Полікристалічні панелі складаються з численних кристалів кремнію. Процес виробництва полягає в плавленні кремнію, а потім його охолодженні в прямокутних формах.[2]

Це дешевше, але призводить до утворення багатьох кристалів з різною орієнтацією. Межі між кристалами викликають розсіювання електронів, що знижує ефективність у порівнянні з монокристалами.[2]

Це також надає панелям певного "плямистого" вигляду. Хоча це може бути менш ефективним, ніж монокристали, полікристалічні панелі менш схильні до перегріву.[3]

Вони мають температурний коефіцієнт потужності близько $-0,39$ до $-0,43\%/^{\circ}\text{C}$ і підходять для теплих кліматів. Вони добре працюють при

розсіяному сонячному світлі (наприклад, у похмуру погоду), оскільки їхні фотоелементи чутливі до ширшого спектру сонячного випромінювання.[6]

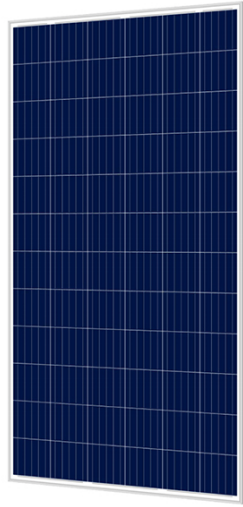


Рисунок 1.3 Полікристалічна сонячна панель

Тонкоплівкові панелі. Замість кремнієвих пластин, панелі використовують шари матеріалів, які мають товщину лише кілька мікрометрів. Вони можуть складатися з аморфного кремнію (a-Si), кадмій телуриду (CdTe) або мідь-індій-галій-селеніду (CIGS).[5]

Нанесення тонкого шару на підкладку (скло, метал або гнучкий полімер) вимагає значно менше енергії, ніж вирощування кремнієвих кристалів. Вони мають найнижчу ефективність, але працюють краще за інші типи в умовах низького освітлення та високих температур.[5]

Вони мають найнижчий температурний коефіцієнт, тому можуть підтримувати продуктивність у спеку. Завдяки гнучкості дизайну та легкості (у випадку полімерної підкладки), панелі можуть легко бути інтегровані в будівельні матеріали (BIPV), такі як покрівля, фасади, мобільні.[4]

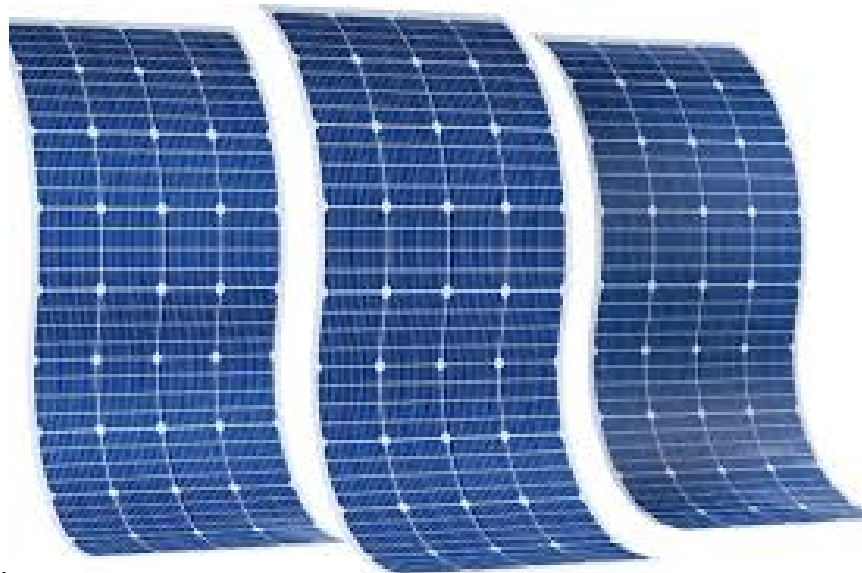


Рисунок 1.4 Тонкоплівкові сонячні панелі

Для підсумування отриманої інформації з даного підрозділу, внесемо основні дані до таблиці 1:

Таблиця 1.1 – Характеристика сонячних панелей

Характеристика	Монокристалічні	Полікристалічні	Тонкоплівкові
Ефективність	18-24% (найвища)	15-20% (середня)	6-12% (найнижча)
Вартість	Найвища	Доступніша	Найнижча
Коефіцієнт потужності від температури	Висока чутливість до нагріву	Менш чутливі до нагріву, працюють краще у спекотних регіонах	Працюють краще при високих температурах
Термін служби	25-30 років	20-25 років	10-15 років
Вигляд	Однорідний темно-синій або чорний колір	Плямистий синій колір, оскільки складаються з багатьох кристалів	Гнучкі та тонкі, можуть бути різних кольорів
Використання	Невеликі дахи, обмежений простір	Великі пласкі дахи, регіони з високими температурами	Поверхні складної форми, фасади будівель
Екологічність	Виробництво енергоємне, але менше панелей потрібно для тієї ж потужності	Менш енергоємне виробництво	Потребують більшої площі, що впливає на екологічний слід

Підсумовуючи, вибір сонячних панелей зводиться до балансу між вартістю та ефективністю та специфікою застосування. Кожен тип має свої сильні та слабкі сторони, і правильний вибір залежить від наших потреб, бюджету та умов, у яких панелі будуть працювати.[3]

1.3 Системи акумулювання електричної енергії

Акумуляторні батареї є хімічними джерелами енергії, які можуть перетворювати та зберігати електричну енергію в хімічній формі. Ця енергія постачається з різних джерел, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни та зарядні пристрої, і може бути використана за потреби.[5]

У випадку паралельної роботи системи безперебійного живлення з мережею, акумуляторні батареї можуть заряджатися від мережі за допомогою зарядного пристрою, а у разі відключення електроенергії вони можуть забезпечити заряд для потреб власника.[5]

Існує кілька типів батарей, і вибір конкретної залежить від системи, в якій вони будуть використовуватися. Сьогодні найбільш поширеними є гелеві AGM батареї та літій-іонні батареї. Гелеві батареї (гелеві свинцево-кислотні батареї) є свинцево-кислотними батареями, які мають густий гелеподібний електроліт.

Ці батареї не потребують обслуговування і мають високий ресурс циклів заряд-розряд, низький саморозряд і можуть працювати при низьких температурах. Недоліками є велика вага, висока вартість і можливе падіння напруги при високих струмах.[5]

AGM батареї (Absorbent Glass Mat) є типом свинцево-кислотних батарей, в яких рідкий електроліт поглинається в спеціально розроблених скловолоконних сепараторах, розташованих між пластинами. Вони не потребують обслуговування, можуть працювати в будь-якому положенні (крім догори дном), є герметичними і мають високу безпеку. Недоліками є велика вага і чутливість до перенапруги.[5]

Свинцево-кислотні батареї VRLA складаються з різних батарей (гелевих і AGM). Вони повністю обслуговуються без необхідності доливання води

протягом усього терміну служби і мають герметичну конструкцію, яку можна встановлювати всередині приміщень без потреби в спеціальній вентиляції.[5]

Літій-іонні LiFePO_4 (літій-фосфатні) батареї стають широко використовуваними, забезпечуючи довгий термін служби і не піддаючись впливу різних інших факторів, які впливають на інші типи батарей. Серед них літій-іонні батареї Victron Energy можуть служити до 20 років, витримувати понад 2500 циклів заряд-розряд, не піддаються глибоким розрядам і можуть бути встановлені в будь-якому положенні.[6]

1.4 Огляд трекера для сонячних електростанцій

На ринку сьогодні доступні різні конструкції для монтажу фотоелектричних модулів (ФЕМ). Загалом, серед них розрізняють дві основні системи – динамічні та статичні.[7]

Статичні системи – це ті, що використовують статичний монтаж для ФЕМ. Необхідно правильно розрахувати їх розміщення та врахувати потребу змінювати кут нахилу ФЕМ відповідно до сезону при встановленні таких систем.[8]

Динамічні системи базуються на трекерах, які автоматично визначають положення Сонця і розміщують ФЕМ у найбільш ефективному положенні. Конструкція, алгоритм роботи та характеристики ефективності динамічних систем дуже різноманітні. Існують одноосьові та двоосьові трекери, які класифікуються за розміщенням осей обертання.[8]



Рисунок 1.5 Класифікація сонячних трекерів

Актуатор — це електричний привід з двигуном, керованим пристроєм управління. Актуатор може використовувати двигуни постійного струму, асинхронні двигуни або крокові двигуни.[9]

На борту Raspberry Pi системного контролера можливий набір функцій може включати: метеостанцію для збору та аналізу даних про погоду; системи віддаленого доступу для моніторингу стану електростанцій та зміни параметрів для задоволення потреб.[10]

Площа панелей сонячного трекера, також відома як площа сонячних панелей, зазвичай велика, тому ефект вітрила посилюється. Цей параметр слід враховувати при створенні трекера, тому при виборі компонентів потрібно враховувати його міцність і стабільність.[9]

У системі сонячного трекера, що розробляється, потрібно розрахувати положення сонця - знайти азимут і зенітний кут сонця та опитати датчики, встановлені на рухомій платформі трекера.[10]

Контролер трекера визначає положення рухомої частини в просторі за даними датчиків. Положення рухомої частини трекера коригується на основі

відносної орієнтації, порівнюючи положення трекера та положення Сонця.

Зміна положення викликана обертанням сервоприводу та актуатора на платформі. Користувач також записує дані про стан сонячного трекера на свій локальний веб-сервер.[10]

Трекер також оснащений системою захисту від перевантаження для протидії сильним вітрам. Контролер запитує встановлення додаткових датчиків метеостанції на конструкції сонячного трекера для досягнення цієї мети. Структуру пристрою умовно можна розділити на різні блоки для будівництва.

Блок збору даних складається з датчиків положення структури та датчиків метеостанції. Блок введення даних користувача – інтерфейс користувача на веб-сервері, що визначає системи та пристрої введення.

Вихідний блок, що включає надання інформації на веб-сервер або дисплей. 4. Пристрій обробки даних - основний вузол пристрою, який виконує опитування датчиків, обчислення, управління двигуном та введення-виведення користувача. Блок управління двигуном – пристрої двигунів – драйвери двигунів.[10]



Рисунок 1.6 Складові компоненти двовісної ФЕС



Рисунок 1.7 Складові конструкції двовісного сонячного трекера

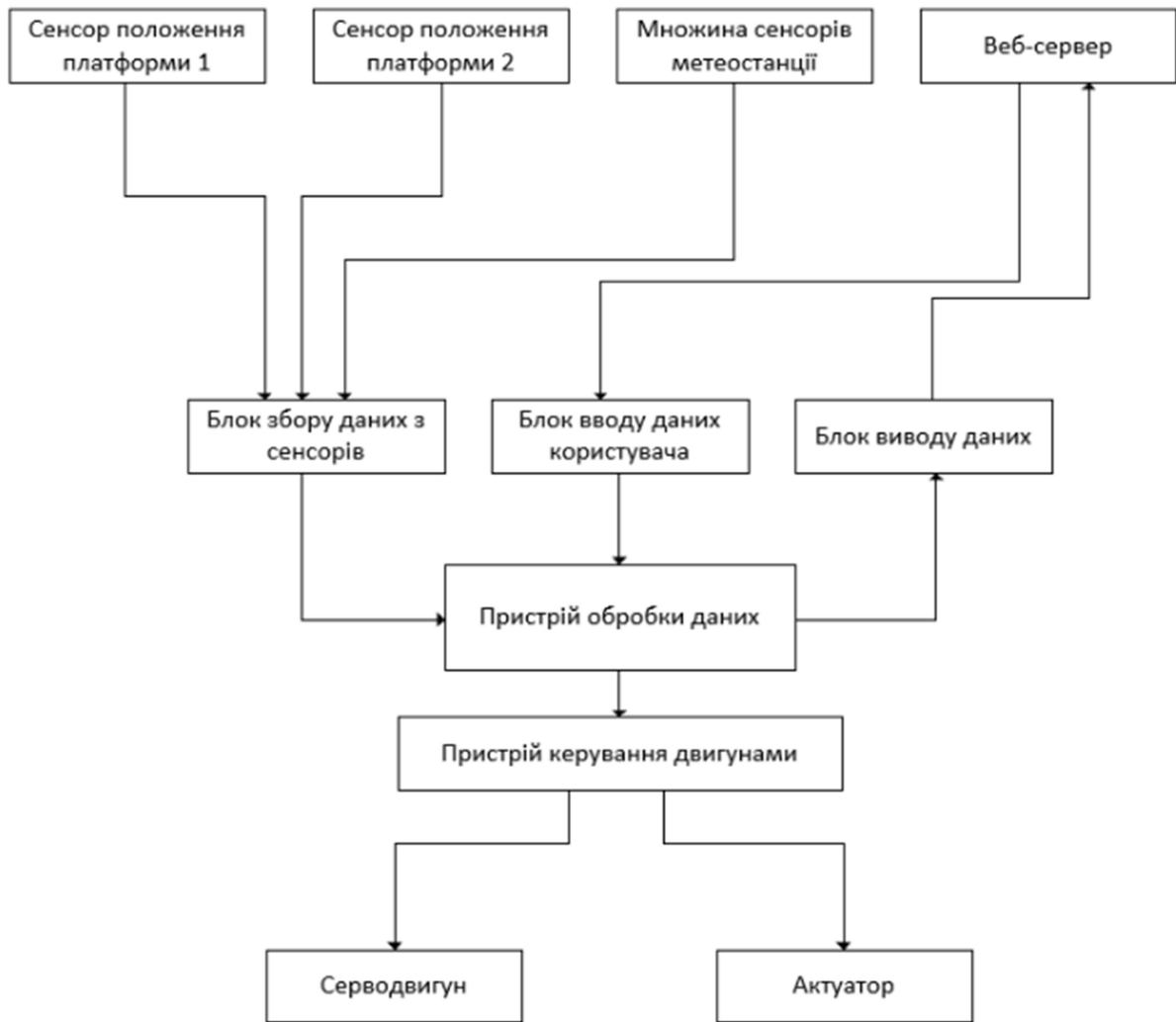


Рисунок 1.8 Структурна схема трекера для сонячних електростанцій

Для перевірки ефективності використання сонячних трекерів дослідимо кількість та ефективність сонячної енергії, що падає на сонячні панелі протягом дня. Експеримент проводимо для Полтавської області. Для розрахунку кількості енергії, що Апотрапляє на панелі, використовуємо формулу:

$$E_{\text{п}} = E_c * \cos(\theta) / \cos(\varepsilon), \quad (1.1)$$

Де E_c – інсоляція регіону, кут θ – кут між падаючими променями та нормаллю до поверхні панелі, кут ε – кут сонячного азимута, що утворюється між горизонтальною лінією, спрямованою на південь, і проекцією падіння сонячних променів на горизонтальну площину.[12]

де t – місцева година.

Визначивши кількість сонячної енергії, що отримуватимуть панелі протягом дня, та обрахувавши вихідну потужність стаціонарних і динамічних систем сонячних панелей, можемо порівняти ефективність їх використання на Рисунку 1.10

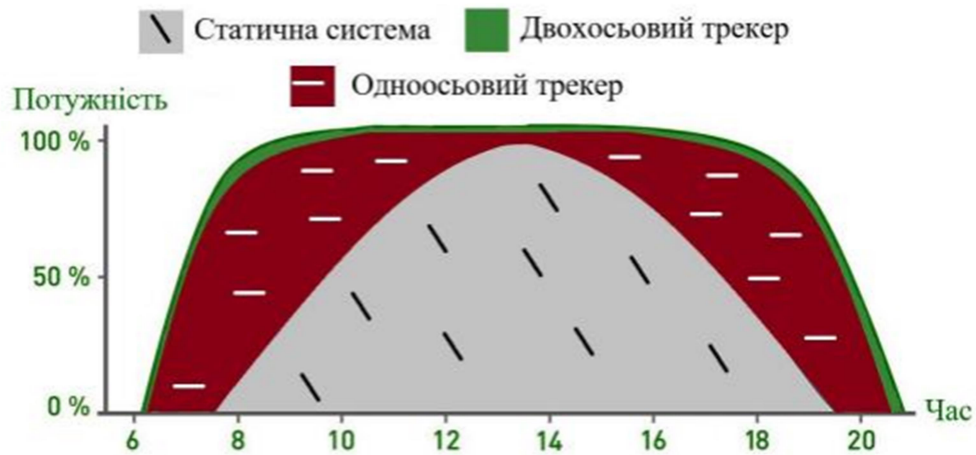


Рисунок 1.10 Порівняння ефективності різних типів трекерів протягом доби

При розрахунках отримуваної середньомісячної енергії протягом року отримуємо такі дані:

Таблиця 1.2 Середньомісячна генерація енергії сонячної енергії

Місяць	Статична ФЕС (кВт\год)	Одновісна ФЕС (кВт\год)	Двовісна ФЕС (кВт\год)
січень	37	44,4	50,32
лютий	48	58,56	65,28
березень	85	105,4	115,6
квітень	117	147,42	159,12
травень	131	167,68	178,16
червень	134	174,2	182,24
липень	142	184,6	193,12
серпень	135	175,5	183,6
вересень	111	142,08	150,96
жовтень	82	103,32	111,52
листопад	41	50,84	55,76
грудень	33	39,6	44,88
Всього	1096	1393,6	1490,56

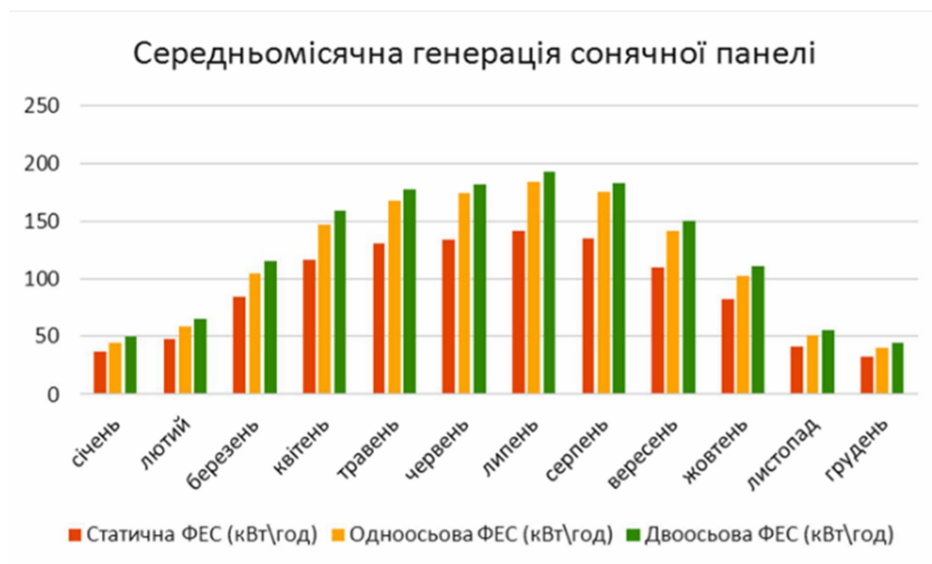


Рисунок 1.11 Графік середньомісячної генерації енергії сонячної ФЕС

Згідно з даними (Таблиця 1.2 та Рис. 1.11), фотоелектрична станція (ФЕС) з динамічною монтажною структурою є більш ефективною, ніж статична ФЕС. Зокрема, протягом року одноосна ФЕС забезпечує на 20-30% більше енергії, а двоосна ФЕС виробляє на 36% більше енергії, ніж ФЕС без трекера.[12]

Нестабільність, викликана зміною положення сонця протягом року, зменшить вихід енергії з одноосної ФЕС, тому якщо кут нахилу панелей не буде відрегульовано, її продуктивність зменшиться взимку.[12]

1.5. Методи підвищення ефективності двовісної сонячної електростанції

Двовісна система слідування за сонцем (Dual-Axis Tracking System, DATS) забезпечує орієнтацію сонячних панелей як за азимутом (схід–захід), так і по висоті (нахилу) сонця над горизонтом.[13]

Такий підхід дозволяє утримувати панелі максимально перпендикулярно до напрямку падіння сонячного випромінювання впродовж усього світлового дня, що суттєво збільшує ефективність фотоелектричної генерації.[13]

У порівнянні з фіксованими установками, двовісні трекери здатні підвищувати добову та річну генерацію електроенергії на 20–40 % (залежно від географічної широти, кліматичних умов, сезонних факторів).[13]

Разом із перевагами, такі системи мають і певні технічні та економічні виклики, серед яких: вартість привідних механізмів, складність систем керування, потреба в обслуговуванні та підвищене енергоспоживання.[13]

У цьому розділі систематизовано сучасні методи підвищення ефективності двовісних сонячних електростанцій, що охоплюють шість основних напрямів.[13]

Ключовий напрям оптимізації DATS є вдосконалення механізмів орієнтації панелей. Висока точність наведення дозволяє зменшити втрати енергії через похибки в орієнтації.[14]

Застосування високоточних алгоритмів (наприклад, на основі GPS, розрахунку сонячної траєкторії) дозволяє знизити похибку наведення до $\sim 0,09^\circ$ при витратах енергії на приводи $< 1\%$ від виробленої.

В Україні продемонстровано зростання ефективності на понад 25% у сонячний день завдяки точному контролю положення панелей.

Проте така точність вимагає якісного контролера, надійної механіки і адаптованих до погодних умов конструкцій.[14]

Конструктивні рішення і геометричні параметри також суттєво впливають на загальну ефективність:

Вибір оптимального кута початкового нахилу та уникнення тіней між рядами дозволяє зменшити втрати.[14]

Застосування біфасціальних модулів (із подвійною поверхнею збору) в поєднанні з алебдо-відбиванням суттєво збільшує енергетичний вихід.

Інноваційні 3D-структури з комбінованими абсорберами і рефлекторами демонструють вищу щільність генерації ($\text{kВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$), хоча і потребують більших витрат на матеріали.[15]

Встановлення дзеркал або рефлекторів позаду панелей у поєднанні з DATS може додатково збільшити генерацію.

Перегрів сонячних модулів у спекотні дні є однією з причин зниження їх ефективності. Для мінімізації цього ефекту застосовують різні методи охолодження:

Активне охолодження (розбризування води, вентилятори, рідинні системи) дозволяє знизити температуру з 50 °C до ~34 °C, підвищивши ефективність з 12 % до 15 %.[15]

Випарне охолодження показало ще кращі результати — зниження температури з 61 °C до 45 °C, підвищення потужності на ~32,7 % [15].

Пасивні методи (PCM, радіатори, мікрофінтюби) менш затратні в експлуатації, але мають меншу ефективність охолодження.[15]

Новітні фотогальванічні елементи дозволяють значно підвищити продуктивність без зміни геометрії чи механіки:

Сучасні високоефективні технології (TOPCon, HJT, PERC, перовськіти) забезпечують ККД понад 20 % навіть при підвищених температурах.

Антивідбивні покриття, матеріали, текстуровані поверхні та наноструктури знижують оптичні втрати.[15]

Дослідження вказують на доцільність комбінування матеріальних інновацій з охолодженням та рефлекторами для досягнення синергетичного ефекту.[16]

Оптимальне керування та адаптація до змінних умов є важливим чинником стабільної роботи DATS:

Алгоритми прогнозу положення сонця, fuzzy logic, машинне навчання дозволяють адаптувати поведінку трекара в реальному часі.

Використання сенсорів освітлення, температури, струму і напруги, а також погодних даних дає змогу будувати комплексну систему моніторингу.

Приклад: GPS-базована система дала приріст у порівнянні з фіксованими системами до 10 % у різні дні.[16]

Підвищення енергоефективності повинно бути збалансованим з економічною доцільністю:

Розрахунок LCOE (levelized cost of electricity), аналіз терміну окупності, капітальних та експлуатаційних витрат є необхідними на етапі 28ирота28йніст.

Захист від вітру, граду, пилу, снігу, корозії та зношування приводів має бути передбачений ще на етапі технічного проектування.[16]

У деяких випадках ефективнішими можуть бути простіші рішення: одновісні системи, фіксовані з сезонним коригуванням нахилу, або більш ефективні модулі без трекера.[16]

1.6 Методи відстеження сонця

Сонячний трекер - це електромеханічна система, яка використовується для орієнтації сонячної фотоелектричної панелі в напрямку сонця. Він використовується в багатьох додатках, таких як транспортна сигналізація, маяки, телефони швидкої допомоги, встановлені на автомагістралях і т. Д. Його основна мета - знайти максимальне сонячне випромінювання, щоб отримати максимальний заряд батарей.[18]

Електрика може бути вироблено від сонця декількома способами. Фотогальваніка (PV) була розроблена в основному для малих і середніх додатків, від калькулятора, що живиться від одного сонячного елемента, до фотоелектричної електростанції. Для великомасштабного виробництва концентрують сонячні теплові електростанції були більш поширені, однак недавно були побудовані нові мульти-мегаватні фотоелектричні установки.[18]

Фотоелемент (фотоелемент) являє собою спеціалізований напівпровідник, який перетворює видиме світло в постійний струм (DC). Деякі фотоелементи можуть виробляти електрику постійного струму від інфрачервоного (IR) або ультрафіолетового (UV) випромінювання. Фотоелектричні елементи є невід'ємною частиною сонячно-електричних енергетичних систем, які стають все більш важливими в якості альтернативних джерел енергетичної корисності.[18]

Сонячні елементи генерують електрику постійного струму від світла, який, в свою чергу, може використовуватися в багатьох додатках, таких як: зарядка батарей, харчування обладнання і т.д. Вони генерують струми, поки світить світло, як показано на рисунку 1.12.[18]

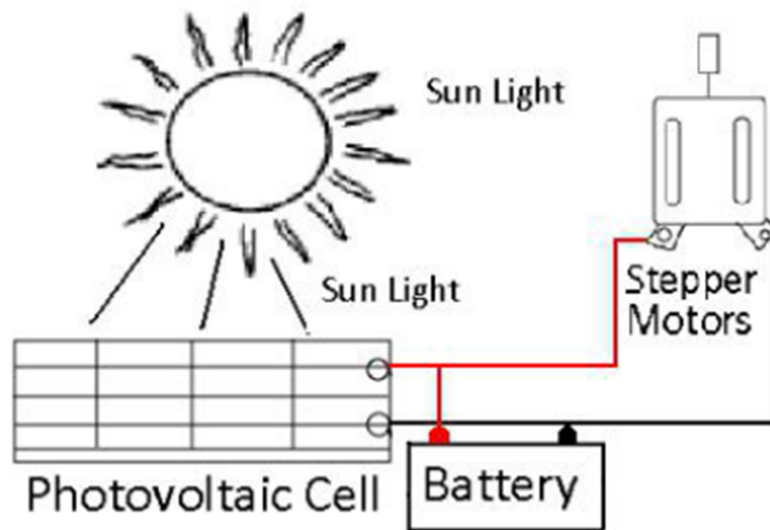


Рисунок 1.12 Структурна схема сонячної енергетичної системи

Сонячний трекер - це електромеханічний пристрій для орієнтації сонячної фотоелектричної панелі в сторону сонячних трекерів, особливо в застосуваннях сонячних батарей; вимагають високого ступеня точності, щоб гарантувати, що концентрований сонячне світло спрямований точно на пристрій з живленням.[18]

Сонячні трекери можуть бути активними або пасивними і можуть бути одноосьовими або двухосними. Одноосьові трекери зазвичай використовують полярне кріплення для максимальної сонячної ефективності і використовують ручне регулювання кута нахилу (осі нахилу) на другий осі, яку можна регулярно регулювати протягом року. Було підраховано, що вихід від сонячних батарей може бути збільшений на 30-60 % за рахунок використання системи стеження замість стаціонарного масиву.[18]

Трекери можуть бути відносно недорогими для фотовольтаїки. Це робить їх особливо ефективними для фотоелектричних систем з використанням високоефективних панелей. Сонячні трекери зазвичай потребують огляду і мастила на регулярній основі.[18]

Активні трекери, які використовують двигуни та зубчасті передачі, управляються електронною схемою, що реагує на сонячне напрямком.

У цій магістерській роботі реалізований сонячний трекер для виявлення максимальної потужності від сонячного світла. Позначки максимального полум'я виявлення зберігається в пам'яті.[18]

Збережені дані можуть бути застосовні для багатьох застосувань, таких як великі фотоелектричні панелі можуть відслідковувати сонце протягом всього денного світла і тим самим дають більше 95% ефективності у виробництві електроенергії; сонячні обігрівачі також стежитимуть за сонцем протягом усього дня, і тим самим буде потрібно менше панелей при первісної вартості; в той час як в системах домашньої автоматизації ця система також необхідна для включення і виключення світла, а також для відкривання і закривання штор.[19]

Виявлення положення сонця проходить кілька етапів. Цифрова система використовується для розрахунку максимальної сонячної радіації. Він підключений до крокової двигуна і до фоторезистора для пере направлення панелі на сонці. Він відправляє отримані дані (положення сонця) на крокові двигуни, щоб розташувати їх до сонця. Заплутані положення зберігаються в регістрах цифрового процесора, такого як мікроконтролер, і можуть відображатися на РК-дисплеї або передаватися для управління віддаленої системою. Рисунок 1.13 ілюструє системну блок-схему.[19]

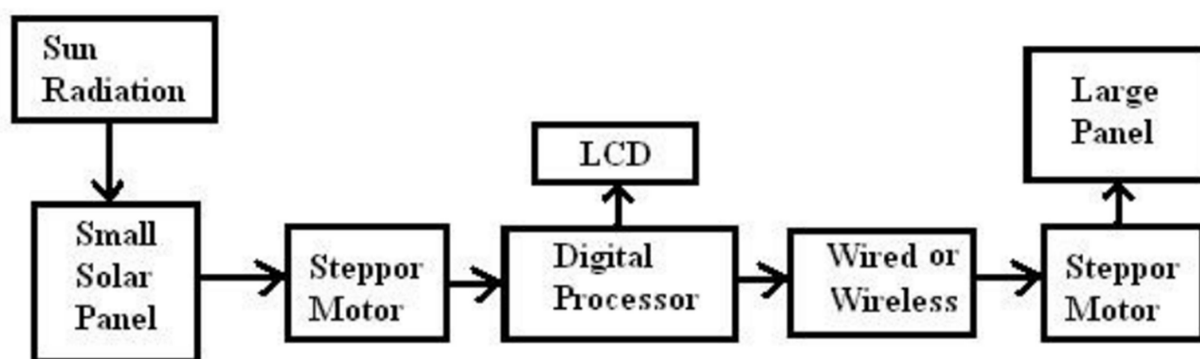


Рисунок 1.13 Структурна схема сонцезахисту

Сонячне стеження може бути реалізовано за допомогою одноосьових, а для більш високої точності - двохосьових систем сонячного стеження. Для двохосьової системи відстеження сонця відомі два типи: полярне

(екваторіальна) відстеження та відстеження по азимуту / висоті (висота-азимут).[20]

Сонячний трекер, пристрій, який утримує фотоелектричні або фототермічні панелі в оптимальному положенні, перпендикулярному сонячного випромінювання в денний час, збільшує зібрану енергію. Перший трекер, представлений Фінстером в 1962 році, був повністю механічним.[20]

Рік по тому Saavedra представила механізм з автоматичним електронним управлінням, який був використаний для орієнтації піргеліометра Епплі.

Трекери не повинні вказувати прямо на сонце, щоб бути ефективними. Якщо мета вимкнена на 108, вихід і раніше становить 98,5% від максимуму повного стеження. У самих хмарних і найнебезпечніших місцях приріст річного випуску трекерів може бути в діапазоні 20%. В цілому, в хорошому районі, щорічний приріст становить від 30 до 40%. Приріст в будь-який день може варіюватися від майже нуля до майже 100%.[20]

Збережені дані можуть бути застосовні для багатьох застосувань, таких як великі фотоелектричні панелі можуть відслідковувати сонце протягом всього денного світла і тим самим дають більше 95% ефективності у виробництві електроенергії; сонячні обігрівачі також стежитимуть за сонцем протягом усього дня, і тим самим буде потрібно менше панелей при первісної вартості; в той час як в системах домашньої автоматизації ця система також необхідна для включення і виключення світла, а також для відкривання і закривання штор.[19]

У деяких випадках ефективнішими можуть бути простіші рішення: одновісні системи, фіксовані з сезонним коригуванням нахилу, або більш ефективні модулі без трекера.[16]

РОЗДІЛ 2

2.1 Вибір та обґрунтування конструктивної схеми системи

Двовісна система відстеження Сонця

Двовісна сонячна система відстеження (двовісний трекер) є найефективнішим рішенням для генерації сонячної енергії, оскільки забезпечує постійну перпендикулярну орієнтацію фотоелектричних (ФЕ) панелей до сонячних променів, незалежно від часу доби та пори року.[6]

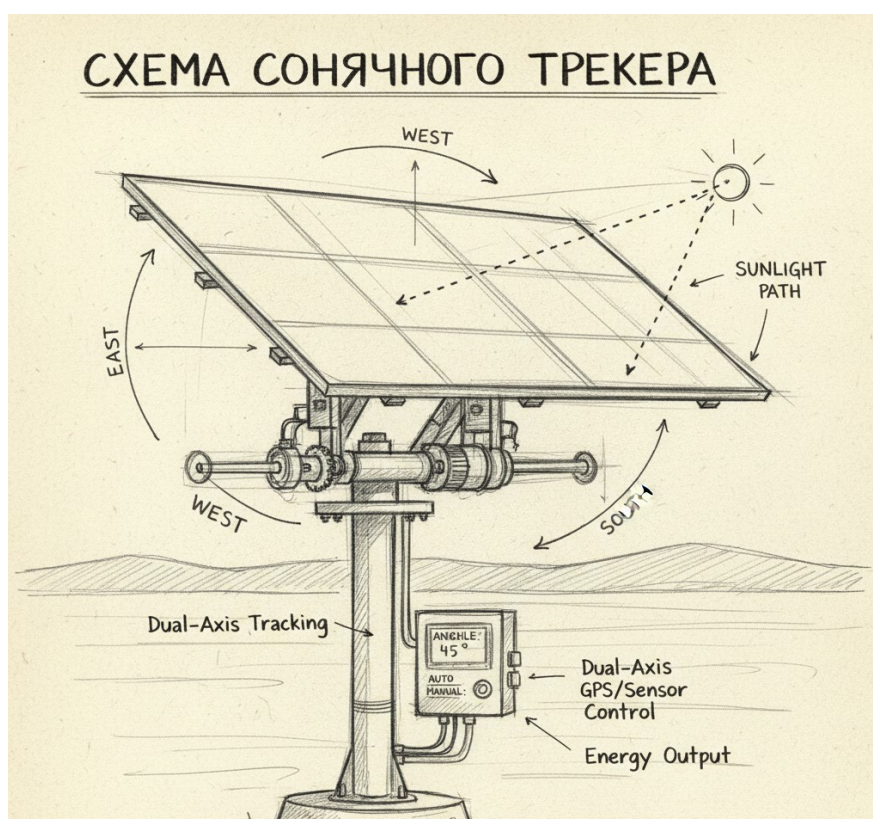


Рисунок 2.1 – Ескіз двовісної сонячної системи

Вибір двовісної конструктивної схеми обумовлений прагненням до максимального річного виробітку енергії (енергетичний ККД) та найкращої інтеграції з передовими технологіями, такими як двосторонні панелі.[6]

Серед основних переваг можна зазначити максимальну ефективність, двовісні трекери можуть досягати до 99.5% від теоретично можливого рівня захоплення сонячної енергії.[6]

Гнучкість системи забезпечує як добове (схід-захід), так і сезонне(зміна висоти Сонця) відстеження. Оптимізація площі, дозволяє більш ефективно використовувати площу ділянки, оскільки високі опорні конструкції можуть

зменшувати необхідну відстань між рядами трекерів, але ця ідея потребує ретельного моделювання.[6]

На даний момент сучасні системи мають можливість автоматично переходити у горизонтальне положення для запобігання пошкодженню від сильного вітру або скидання снігу.[6]



Рисунок 2.2 Трекінгова система в реальному часі

Вибір сенсорів, виконавчих механізмів і контролера

Вибір сенсорів, виконавчих механізмів та контролера є критично важливим для забезпечення високої ефективності та надійності двовісного трекера, але перш ніж перейти до даних компонентів, розглянемо обрані для цього проекту фото електричні панелі: Trina 710 Вт 132 комірок N – типу TOPCon двостороння з подвійним склом, яка славиться високою ефективністю модуля – панель забезпечує вихідну потужність до 710 Вт з ККД 23,2% на платформі 210 мм, що забезпечує кращу генерацію енергії порівняно зі звичайними модулями.[11]

Підвищена надійність грає не менш важливу роль. Інноваційне неруйнівне різання та упаковка зменшують ризики мікротріщин та перегріву, забезпечуючи

стабільну роботу навіть у складних умовах. Також можна згадати , що даний тип панелі вирізняється стабільною тепловою продуктивністю та відмінним виходом енергії.[11]

Завдяки низькому температурному коефіцієнту, це модуль підтримує високу ефективність при нагріванні, мінімізуючи втрати енергії та покращуючи довгострокову продуктивність.[11]

Модуль може досягати вищої двосторонності, забезпечуючи додатковий приріст потужності на задній стороні на 10-20%, а також перевірену продуктивність за умов слабкого освітлення для максимальної річної продуктивності[11]

На рисунку 2.3 зображено стандартний вигляд обговорюваної панелі

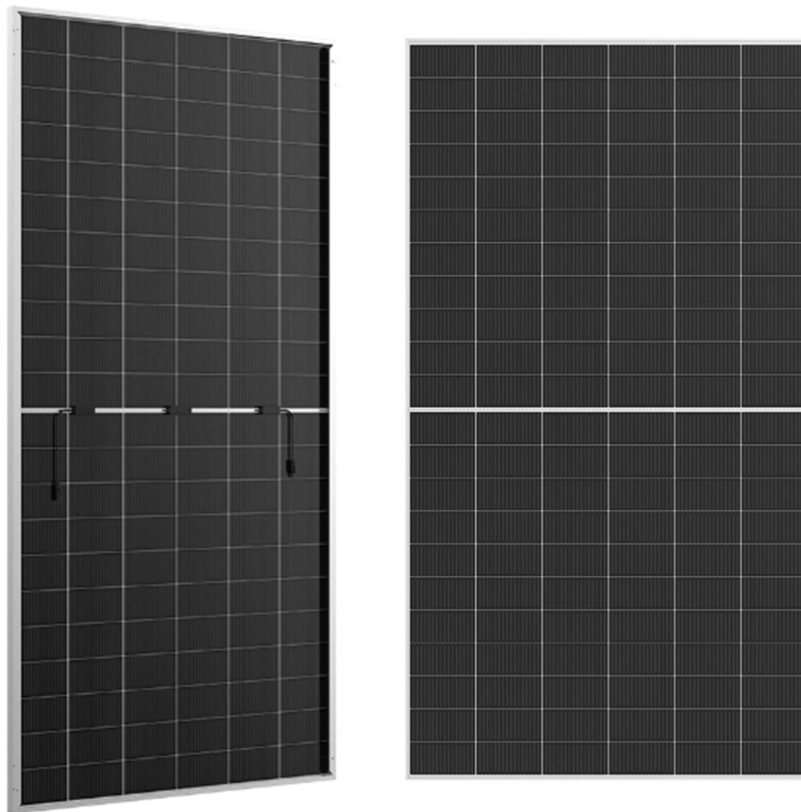


Рисунок 2.3 ФЕП типу N-Type TOPCon Bifacial Dual-Glass

Таблиця 2.1 Механічні параметри ФЕП

Сонячні елементи	Монокристалічний TOPCon N – типу
Кількість комірок	132 (6*22)
Розміри	2384*1303*33 мм
Переднє скло	2,0 мм (0,08 дюйма), термозміцнень скло з AR – покриттям
Заднє скло	2,0 мм (0,08 дюйма) анодований алюмінієвий сплав
Вага	38.3 кг
Вихідні кабелі	Кабель фотоелектричної технології 4,0 мм ² (0,006дюйма ²) Портретна орієнтація: 370/230 мм (14.57/9,06 дюйма) Довжина може бути налаштована

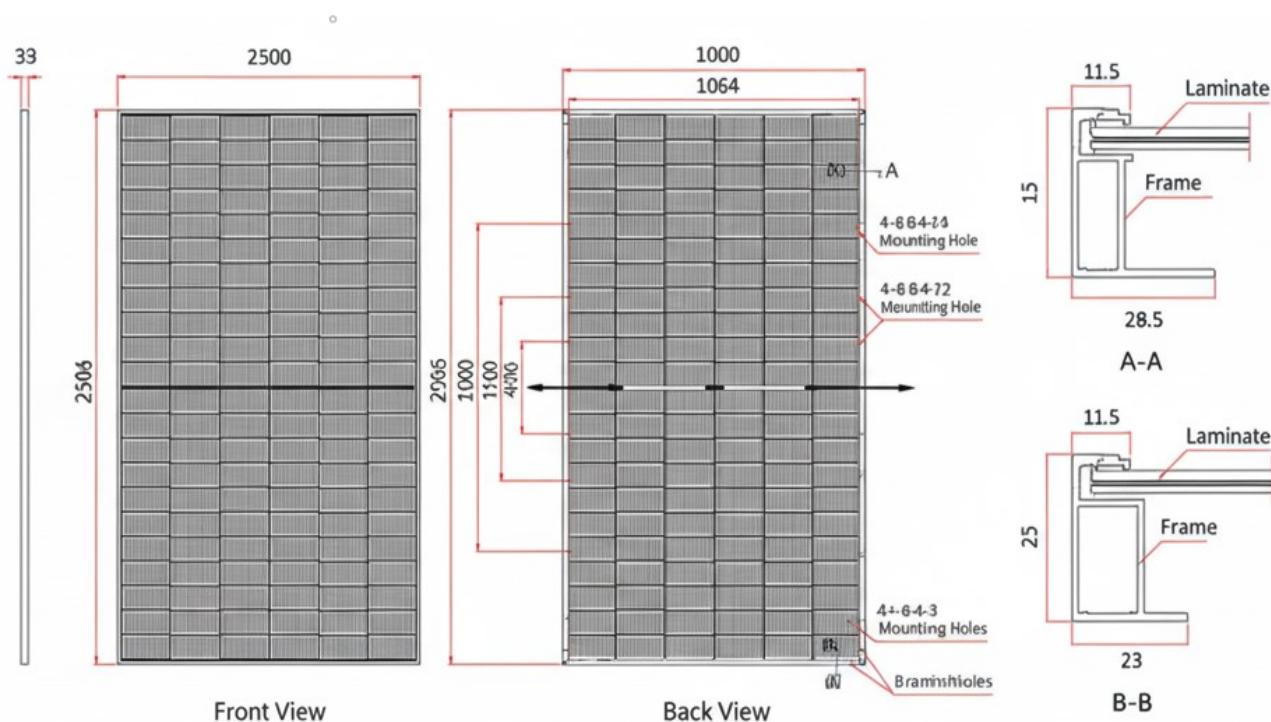


Рисунок 2.4 Розташування монтажних отворів сонячної панелі

Ця схема демонструє розташування монтажних отворів моно- та двосторонньої сонячної панелі потужністю 710 Вт розміром 2384*1303*33 мм, що забезпечує точне посилення для стелажного та конструкційного проектування.[11]

Таблиця 2.2 Електричні параметри сонячної панелі

Тип модуля: TSM-NEG21C.20	710
Максимальна потужність (P_{max} /Вт)	710
Напруга холостого ходу (V_{OC}/V)	49.0
Струм короткого замикання(I_{sc}/A)	18.40
Напруга при максимальній потужності (V_{mpp}/V)	40.9
Струм при максимальній потужності ($I_{мп}/A$)	17.36
Ефективність модуля (%)	22.9

Модуль базується на новітній 210 – мм платформі з технологією TOPCon N –типу, гарантує значно вищу генерацію. Завдяки 132 напіврозрізаним елементам, він забезпечує ефективність 23.2% та пікову потужність 720 Вт. Це означає, що ви отримуєте на 35 Вт більше енергії з кожного модуля порівняно зі стандартними аналогами, оптимізуючи загальну щільність потужності вашої системи.[11]

Конструктивне рішення, що передбачає двосторонній (bifacial) дизайн з подвійним склом, забезпечує додаткове посилення, що варіюється в межах 10-20% за рахунок захоплення сонячного випромінювання тильною стороною модуля.[11]

Фактичне посилення потужності (Albedo Gain) залежить від коефіцієнта альbedo поверхні під модулем. Крім того, підтверджені високі експлуатаційні характеристики при низькій освітленості гарантують стабільне виробництво електричної енергії в умовах дифузного сонячного світла, характерних для хмарної погоди або періодів низького кута стояння Сонця (світанок/сутінки).[11]

Експлуатаційна надійність модуля підтверджується мінімальним темпом деградації потужності: спостерігається не більше 1% зниження продуктивності протягом першого року експлуатації та подальша річна деградація, що становить лише 0,4%.[11]

Ці показники підкріплені 12-річною гарантією на продукцію та 30-річною гарантією живлення, яка гарантує збереження не менше 87,4% від номінальної потужності на кінець гарантійного терміну.[11]

Така гарантійна політика забезпечує високу довгострокову прибутковість інвестиційних та приватних домогосподарств.

Ключові зміни:

- Замінено «деградація» на більш формальні «темп деградації потужності» та «зниження продуктивності».
- «Гарантія живлення» формалізована як «30-річна гарантія живлення, яка гарантує збереження...».
- «Довгострокова прибутковість проектів та будинків» перефразовано як «висока довгострокова прибутковість інвестиційних 38вирота38й та приватних домогосподарств».

Конструкція модуля вирізняється підвищеною надійністю завдяки використанню подвійного термозміцненого скла товщиною 2,0 мм з покриттям (AR, Anti-Reflective), інтегрованого у 33-міліметрову раму з анодованого алюмінію.[12]

Ця конфігурація забезпечує виняткову механічну стійкість, дозволяючи витримувати статичні навантаження до 5400 Па (наприклад, снігове або вітрове) та протистояти ударам граду діаметром до 25 мм.[12]

Крім того, модуль сертифіковано для експлуатації в суворих кліматичних умовах та має підтверджену стійкість до таких чинників, як сольовий туман, аміак, абразивний вплив піску, а також ефектів PID (Potential Induced Degradation), LID (Light Induced Degradation) та LeTID (Light and Elevated Temperature Induced Degradation).[12]

Застосування напруги системи постійного струму 1500 В замість традиційної 1000 В дозволяє знизити загальні витрати на баланс системи (BOS, Balance of System).[12]

Підвищення напруги призводить до скорочення кількості обладнання, зменшується необхідна кількість інверторів та довжина кабельної мережі, що прямо впливає на економію 2-6% для великомасштабних проектів.[12]

Зменшується переріз кабелів, вища напруга при однаковій потужності обумовлює менший струм, що дозволяє використовувати кабелі меншого перерізу, знижуючи витрати на мідь та монтаж.[12]

Крім того, стандартизовані габаритні розміри модуля сприяють покращенню використання простору контейнерів під час транспортування. Це безпосередньо призводить до зниження логістичних витрат та витрат на перевезення, підвищуючи загальну економічну ефективність реалізації сонячних електростанцій.[13]

Модуль спроектований для забезпечення високої гнучкості та сумісності з інфраструктурою, що вже існує. Він підтримує стандартизовані електричні роз'єми MC4 EVO2 та TS4 Plus, а також сумісний з кабелями різної довжини, що значно спрощує інтеграцію.[1]

Крім того, він має сумісність з основними стелажними системами (кріпленнями), представленими на ринку.

З точки зору безпеки та довговічності, впровадження технології Half-cut (напіврозрізаних елементів) відіграє ключову роль. Ця технологія забезпечує зменшення ризиків виникнення точок перегріву (hot spots) за рахунок зниження робочого струму в кожній половині модуля.[1]

Це гарантує безпроблемне та надійне встановлення як для великомасштабних комерційних, так і для систем, розміщених на дахах житлових будинків.[1]

2.1.2 Вибір сенсорів, виконавчих механізмів і контролера

Критично важливим для забезпечення високої ефективності та надійності двовісного трека є вибір сенсорів, контролера та виконавчих механізмів. Для Азимутально-Висотної схеми, де потрібно незалежне обертання навколо вертикальної та горизонтальної осі, використано наступні компоненти.[2]

Почнемо з основного сенсора(Позиціонування) – GPS/GNSS Модуль. Призначення цього сенсора полягає у визначенні істинного положення сонця(азимут і висота) у будь-який момент часу та місці. Це основа точності. Система керується астрономічним алгоритмом (Open-Loop Control), який є незалежним від погодних умов (хмарності, туману, пилу) та забруднення поверхні панелей.[2]

Це гарантує, що панель завжди орієнтована на ідеальне положення, навіть коли сонце не видно.

На рисунку 2.5 зображено типовий GPS/GNSS модуль:

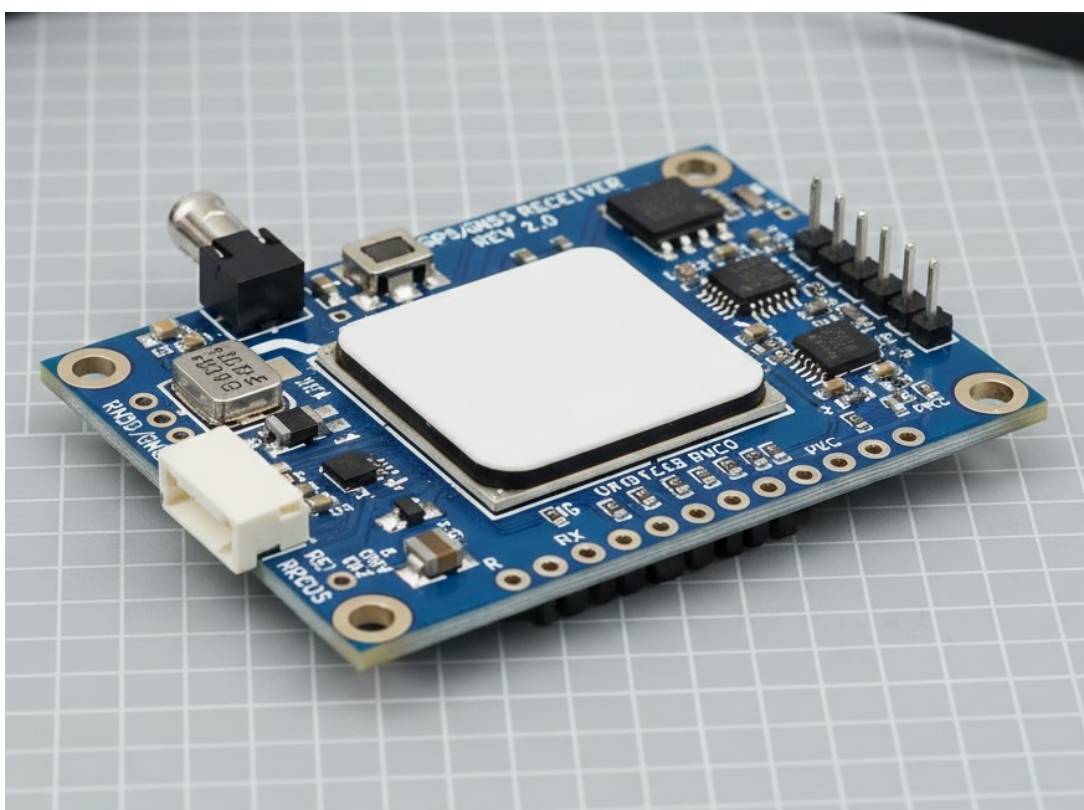


Рисунок 2.5 Типовий GPS/GNSS модуль

U-blox NEO-7M – це компактний та енергоефективний GPS/GNSS приймач, виготовлений швейцарською компанією U-blox, яка є лідером у технологіях супутникової навігації.[21]

Модулі серії NEO-7 є надійним вибором для аматорських та професійних проектів завдяки своїй чутливості та стабільності.

Таблиця 2.3 Технічні характеристики GPS/GNSS модуля

Чіпсет	u-blox 7-го покоління
Підтримка GNSS	GPS, ГЛОНАСС, QZSS та SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS). Він може відстежувати до 50 супутників одночасно.
Чутливість	Висока чутливість (до -161 dBm для відстеження), що дозволяє приймати сигнали навіть у складних умовах (наприклад, у містах).
Протокол	Використовує стандартний протокол NMEA 0183 (текстові рядки) для передачі навігаційних даних та бінарний протокол UBX для конфігурації.
Інтерфейс	Основний інтерфейс зв'язку — UART (послідовний порт).
Точність позиціонування	Горизонтальна точність зазвичай становить близько 2.5 метри.
Час оновлення	Типова частота оновлення позиції — 1 Гц (один раз на секунду).
PPS (Pulse Per Second)	Має вихід для надточного імпульсу часу (1 імпульс на секунду), синхронізованого з атомним годинником супутника.

Модуль складається з наступних компонентів:

- Основний чіп NEO-7M;
- Керамічна патч-антена або роз'єм для зовнішньої антени;
- EEPROM: Мікросхема пам'яті для зберігання конфігурації (наприклад, швидкості обміну даними, налаштувань протоколу) між вимкненнями живлення;
- Суперконденсатор/Резервна батарея: Забезпечує живлення для збереження «гарячих» навігаційних даних (ефемерид), що значно прискорює «теплий старт» (час першого визначення місцезнаходження);
- Конвертер напруги (LDO): Забезпечує роботу модуля від 5V живлення Arduino, перетворюючи його на внутрішні 3.3V.

Для двовісної сонячної електростанції використання GPS/GNSS модуля, як от NEO-7M, дозволяє перейти від методу світлочутливих сенсорів(LDR) до більш точнішого методу астрономічних розрахунків(Solar Ephemeris).[4]

Щоб точно знати, куди має бути спрямована панель, система має знати, де вона знаходиться на Землі. NEO-7M надає фіксовану широту (L_{at}) та довготу (L_{ng}) установки.[4]

Ці координати є вхідними параметрами для складного алгоритму, який обчислює точні кути сонця (азимут та висоту) у будь-який момент часу.

Система вводиться в експлуатацію один раз, а координати зберігаються в пам'яті мікроконтролера.[4]

Найбільш критичний параметр для сонячного трекінгу – абсолютно точний час та дата. Модуль отримує час безпосередньо від атомних годинників на супутниках.[4]

Точний час у форматі UTC(Всесвітній координований час) необхідний для розрахунку кута сонця, який змінюється залежно від години, хвилини та секунди. Навіть найменша похибка в часі призведе до похибки у куті, що знизить ефективність панелі. Система завжди знає, який зараз час UTC, і може точно обчислити місцевий час та уникнути помилок, пов'язаних із переходом на літній час (DST).[4]

Хоча годинник реального часу (RTC, наприклад, DS3231) може забезпечувати час, він схильний до збоїв і втрачає точність з часом.

NEO-7M, навпаки, постійно самокоригується за допомогою супутникового сигналу, забезпечуючи ідеальну часову базу.[5]

Наступним етапом є вибір оптичних датчиків. Оптичні датчики – це пристрої, які перетворюють світлові сигнали на електричні. Вони виявляють фізичні величини, пов'язані зі світлом (інтенсивність, довжина хвилі, відсутність/наявність).[5]

Для цієї роботи був вибраний найбільш підходящий фоторезистор на мою думку. Для двовісного сонячного трекінгу LDR-сенсори(фоторезистори) є найпопулярнішим вибором завдяки їхній простоті та ефективності у здійсненні диференціального відстеження, тобто порівняння яскравості з різних сторін.[5]

Проте у професійних та високоточних системах для досягнення кращої надійності та точності вимірювань надають перевагу більш досконалим оптичним компонентам, таким як фотодіоди або цифрові датчики освітленості(люксметри). Мій вибір впав на фоторезистор (LDR) GL5528. На рисунку 2.6 зображення зовнішній вигляд даного пристрою.[5]



Рисунок 2.6 Фоторезистор LDR GL 5528

Це компонент, виготовлений із сульфїду кадмію (CdS). Його електричний опір зменшується в міру того, як зростає інтенсивність світла, що падає на його світлочутливу поверхню.[8]

Фоторезистор має характерну зигзагоподібну або спіральну форму (як на зображенні), що максимізує площу контакту між електродами та світлочутливим матеріалом.[8]

Опір при яскравому освітленні (10-100 люкс) зазвичай становить кілька кОм (к Ω), а в повній темряві — кілька мОм (М Ω). Завдяки простоті та низькій вартості, вони ідеально підходять для створення масиву з 4-х сенсорів для диференціального відстеження Сонця.[8]

На рисунку 2.7 зображено схему підключення фоторезистора LDR до плати ESP32:

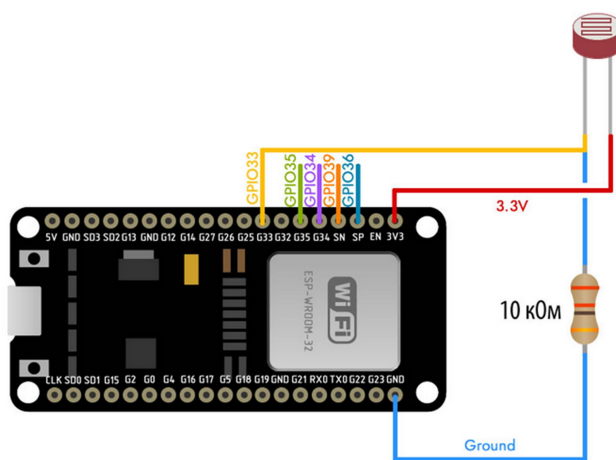


Рисунок 2.7 Схема підключення фоторезистора

Для двовісної сонячної станції системи, незалежно від кількості ФЕП, нам знадобиться один комплект оптичних датчиків, який складається з чотирьох фото резисторів, які розміщуються в центрі конструкції. Для керування двома осями одночасно вам потрібні дві пари сенсорів для диференціального порівняння.

Таблиця 2.4

Вісь керування	Пара LDR	Функція
Вісь 1 (Азимут)	LDR 1(Схід) LDR 2 (Захід)	Керує рухом зі Сходу на Захід (горизонтально)
Вісь 2 (Висота)	LDR 3(Північ) LDR 4(Південь)	Керує рухом з Півдня на Північ (вертикально)

Мікроконтролер (наприклад Arduino) порівнює напругу, що надходить від кожної пари. Рух припиняється, коли напруга на обох сенсорах у парі стає рівною. Було прийнято рішення до конструкції додати LDR 5.[8]

Цей п'ятий сенсор розташовується в центрі і використовується для вимірювання загальної інтенсивності світла. Він допомагає системі визначити, коли настала ніч (інтенсивність світла надто низька) або коли почався ранок, щоб запустити процес відстеження, тим самим запобігаючи постійному пошуку Сонця в темряві та економлячи енергію.[8]



Рисунок 2.8 Типове розташування фоторезистора

Фоторезистори (LDR), розміщені по сторонах і на додаток прикриті. Це має дуже важливе значення в контексті сонячного трекінгу, а саме створення спрямованої тіні для точного визначення напрямку сонця. [9]

Необхідність полягає в тому, що якщо LDR просто лежить відкрито, він вимірює загальне розсіяне світло, що ускладнює визначення, з якого саме боку йде найбільш інтенсивне світло. Коли LDR прикритий трубкою або козирком, він може фіксувати світло лише з вузького кута огляду.[8]

Без прикриття, LDR можуть реагувати на розсіяне світло від хмар, відблисків або навіть світлового забруднення вночі. Це може призвести до

неточностей або помилкового спрацьовування. Прикриття допомагає датчику фокусуватися на прямому сонячному світлі.[9]

Чим чіткіша різниця в освітленні, яку фіксують LDR, тим точніше мікроконтролер може керувати двигунами для центрування панелі на Сонці.[7]

Наступним по списку йде інклінометр. Інклінометри відіграють ключову роль у двовісних сонячних трекерах (системах стеження) як датчики, що забезпечують точне позиціонування сонячних панелей відповідно до положення Сонця.[8]

У контексті даного двовісного сонячного трекера даний прилад потрібен для вимірювання поточної орієнтації. Інклінометр встановлюється на платформі сонячних панелей і постійно вимірює її фактичні кути нахилу: вісь Азимуту (горизонтальне відстеження сонця протягом дня), та вісь Висоти/Нахилу (вертикальне відстеження сонця в залежності від пори року).[13]

По-друге, це передача даних. Отримані дані про кути нахилу (наприклад через інтерфейси RS232 або RS485) надходять до контролера системи стеження.[13]

Також контролер використовує алгоритм положення сонця (SPA), який на основі географічних координат та часу обчислює ідеальні кути, під якими панелі мають бути розташовані для максимального поглинання сонячної енергії.[13]

Контролер порівнює фактичні кути, отримані від інклінометра з цільовими кутами. Якщо є розбіжність, контролер надсилає команди серво- або кроковим двигунам трекера. Двигуни приводять у рух механізми трекера, змінюючи орієнтацію панелей доти, поки фактичні кути, виміряні інклінометром, не співпадуть або не будуть максимально близькі до цільових.[13]

Інклінометри в більшості випадків використовуються для вирішення двох основних завдань. Це точне позиціонування та корекція та забезпечення безпеки та обслуговування.[14]

По-перше, це компенсація нерівностей. Вони допомагають системі врахувати початковий нахил трекера, якщо він встановлений на неідеально рівній поверхні. Це дозволяє контролеру працювати з нульовою точкою відліку, що відповідає реальному горизонтальному положенню, незалежно від похибки монтажу.[14]

По-друге, контроль орієнтації. У системах, які використовують супутниковий компас (GPS/RTC) разом з інклінометром, датчик нахилу гарантує, що кути тангажу та крену відповідають обчисленому положенню Сонця, навіть при переміщенні системи.[14]

Також, інклінометри можуть використовуватися для моніторингу стану трекера та захисту його від пошкоджень. Якщо через сильний вітер або механічний збій кут нахилу трекера виходить за допустимі межі, інклінометр швидко фіксує це, дозволяючи контролеру перевести панелі у захисне (горизонтальне) положення.[14]

Під час обслуговування або калібрування інклінометр допомагає точно встановити трекер у відоме положення. Для нашої системи потрібно підібрати модель, яка б відповідала ключовим вимогам, а саме: висока точність, двовісне вимірювання, надійність у зовнішніх умовах та цифровий інтерфейс.[14]

В даному контексті було розглянуто інклінометри на базі технології MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) із цифровим виходом, наприклад, моделі серії, що пропонуються такими виробниками, як Althen Sensors.[15]

Особливості інклінометрів від Althen Sensors, особливо тих, що призначені для двовісних сонячних трекерів, полягають у поєднанні високої точності з промисловою надійністю та інтелектуальною компенсацією.[15]

Цифрова температурна компенсація (Digital Temperature Compensation) – це критично важлива особливість для зовнішніх систем. Температура може сильно впливати на точність MEMS-датчиків. Althen (на прикладі цифрової серії JDI) використовує вбудований температурний сенсор та складні алгоритми, щоб автоматично коригувати виміряний кут. Трекер забезпечує

стабільну та високу точність позиціонування протягом усього року, незалежно від того, чи працює трекер у мороз чи спеку.[15]

Сонячні трекири працюють в екстремальних умовах на відкритому повітрі. Інклінометри обладнані міцним, герметичним корпусом, що відповідає стандартам IP67 (тобто, захист від пилу та короткочасного занурення).[15]

Датчик захищений від проникнення вологи типу дощу, снігу чи роси, що забезпечує його довговічність і безперебійну роботу без необхідності частого обслуговування.[15]

Моделі пропонуються з різними діапазонами, з високою роздільною здатністю. Надзвичайно висока точність гарантує, що сонячна панель завжди буде повернена до сонця під оптимальним кутом, що максимізує вихідну потужність системи.[15]

На наступному рисунку 2.8 зображено стандартний цифровий інклінометр.



Рисунок 2.9 Інклінометр моделі Althen Sensors

2.1.3 Розрахунок кутів орієнтації фотоелектричних панелей

Як екологічно чистий та майже невичерпний енергоресурс, сонячна енергія, без сумніву, є обнадійливим рішенням проблеми дефіциту енергії та засобом досягнення сталого розвитку.[13]

Сонячні фотоелектричні та сонячні теплові системи широко використовуються для енергозабезпечення будівель. Щоб максимізувати кількість енергії, що збирається сонячними системами, відстеження сонця часто використовується, як приваблива технологія для сонячних трекерів. Тим не менш, системи відстеження мають недоліки: висока вартість, енергоємність та непридатність для малих сонячних панелей.[5]

Окрім цього, для сонячних трекерів без системи відстеження сонця, кути їх нахилу відносно горизонтальної площини та орієнтації суттєво впливають на сонячну енергію випромінювання, що отримується поверхнею панелі.[5]

Результати моделювання показують, що порівняно із сонячними фотоелектричними панелями, закріпленими під поточними кутами нахилу дахів, річний приріст енергії, отриманий шляхом встановлення панелей під річним, сезонним та щомісячним оптимальним кутом нахилу, збільшується відповідно у 5,98%, 13,55% та 15,42%.[8]

Річний приріст енергії може бути збільшений приблизно на 30%, коли кут нахилу сонячних панелей змінюється від фіксованого значення до оптимального.[9]

Протягом багатьох років докладалося значних зусиль для визначення оптимального кута нахилу та орієнтації шляхом максимізації загальної сонячної радіації на поверхні панелі протягом певного дня або періоду в різних місцях.[9]

Різниця температур нормалізації досліджуваної системи в момент часу h розраховується відповідно до зібраних параметрів, таких як температура зовнішнього повітря за сухим термометром, інтенсивність зовнішнього сонячного випромінювання. Коли розрахована різниця температур нормалізації нижча за критичну різницю температур, системи сонячного трекера працюють нормально.[13]

За заданого кута нахилу та орієнтації установки, пряме сонячне випромінювання, дифузне сонячне випромінювання та відбите випромінювання на похилій поверхності розраховується з використанням погодинного прямого

сонячного випромінювання та дифузного сонячного випромінювання на горизонтальній поверхності з метеорологічної бази даних, а потім отримують загальне сонячне випромінювання на похилій поверхні.[13]

Рух сонця по небу відбувається по траєкторії від сходу до заходу, під час руху положення сонця описується двома координатами: Азимутом і Зенітом (рисунок 2.9):

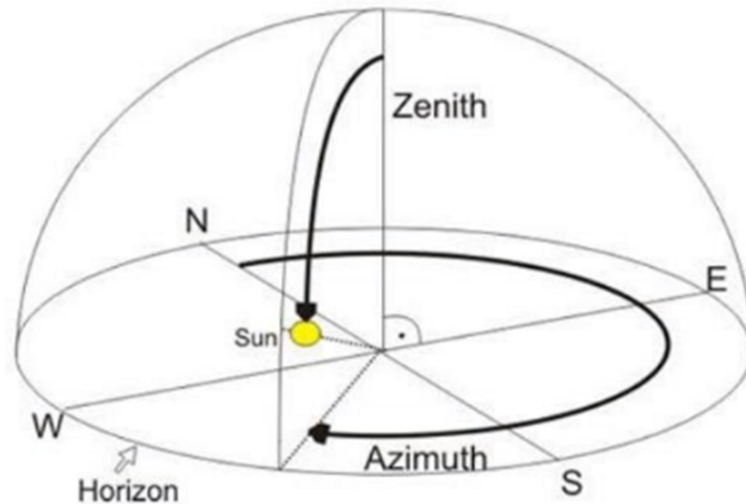


Рисунок 2.10 Розташування сонця за Азимутом та Зенітом

Для розрахунку положення сонця в будь-якій точці Полтавської області візьмемо такі координати. Географічна широта (ϕ): 49.5° (Північна широта), Географічна довгота: 34.5° (Східна довгота).[13]

По-перше, схилення сонця – це кут між лінією сонце-земля та площиною екватора.

$$\delta \approx 23.45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right) \quad (2.1)$$

Де $N = 339$

$$\delta \approx 23.45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(284 + 339)\right)$$

$$\delta \approx 23.45^\circ \sin(61.47^\circ) \approx -22.3^\circ$$

Фактичне значення схилення 5 грудня 2025 року близьке до $-22,3^\circ$, оскільки це близько до зимового сонцестояння.

Не зайвим буде прорахувати також Годинний Кут (ω), який пов'язаний зі справжнім сонячним часом(SST):

$$\omega = (SST - 12) * 15^\circ \quad (2.2)$$

Для $SST \approx 11.386$ годин:

$$\omega = (11,386 - 12) * 15^\circ \approx -0,614 * 15^\circ \approx -9,21^\circ$$

Даний показник означає, що сонце ще не досягло свого найвищого положення.

Зенітний кут θ_z – це кут між вертикаллю до поверхні та сонячними променями.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\omega) \quad (2.3)$$

Підставляємо $\varphi = 49.5^\circ, \delta = -22.3^\circ, \omega = -9.21^\circ$:

$$\cos(\theta_z) = \sin(49.5^\circ) \sin(-22.3^\circ) + \cos(49.5^\circ) \cos(-22.3^\circ) \cos(-9.21^\circ)$$

$$\cos(\theta_z) \approx (0.760 * (-0.379)) + (0.650 * 0.925 * 0.987)$$

$$\cos(\theta_z) \approx -0.288 + 0.593 \approx 0.305$$

$$\theta_z = \arccos(0.305) \approx 72.25^\circ$$

Сонячний кут Азимута – це кут сонця, виміряний у горизонтальній площині (від Півдня, зі знаком мінус на схід).

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\theta_z)} \quad (2.4)$$

$$\sin(\gamma_s) = \frac{0.925 * \sin(-9.21^\circ)}{\sin(72.25^\circ)} \approx \frac{0.925 * (-0.160)}{0.952} \approx -0.155$$

$$\gamma_s = \arcsin(-0.155) \approx -8.9^\circ$$

Варто зазначити, що для ідеального двовісного трекера, який максимально використовує сонячну енергію, його кути повинні повторювати положення сонця.

Кут нахилу трекера відносно горизонталі дорівнює куту висоти сонця($90^\circ - \theta_z$)

$$\beta_{opt} = 90^\circ - 72.25^\circ \approx 17.75^\circ$$

Кут повороту трекера у горизонтальній площині дорівнює сонячному куту азимута:

$$\gamma_{t,opt} = \gamma_s \approx -8.9^\circ \quad (2.5)$$

Орієнтуючись на показники бачимо, що оскільки це близько до полудня та зими, панель має бути майже горизонтально орієнтована (17.75°) та трохи на схід (8.9°).[13]

Дивлячись на інформацію зазначену вище можна сформувати основні характеристики системи трекінгу.

Система керування буде двовісною, оскільки при наявності сонячних панелей у 4 шт., немає потреб дотримуватись певної довжини зайнятого простору. Також дана система буде стійкою до погодних умов.[13]

2.2 Огляд існуючої конструкції

Сонячні панелі на початковій сонячній установці закріплені по схемі горизонтально розташованих панелей з кутом нахилу 45° . Металоконструкція складається з кількох кронштейнів, з'єднаних між собою гайковими з'єднаннями (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 Система кріплення у зборі без фотомодулів

Використовуються сонячні модулі Longi Solar lr6 60 290. Характеристики модулів наведені в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 Технічні характеристики сонячного модуля Longi Solar lr6-60 290

Назва	Величина
Максимальна потужність, Вт	290
Напруга при максимальній потужності, В	31,7
Струм при максимальній потужності, А	9,15
ККД, %	не менш 17,7
Межі робочої температури, С°	-40 – 85
Маса, кг	18,2
Розміри, мм	1650x991x40
Тип модулів	монокристал

2.3 Опис конструкції трекера

Для проектування доцільно використати двовісний трекер. Двовісні трекири найчастіше реалізуються у вигляді одноопорної конструкції, оскільки це забезпечує більшу свободу руху в двох площинах без обмежень.[4]

Несуча опорна конструкція або Стоп/Фундамент – вся система включаючи панелі, встановлюється на одній міцній опорній конструкції, яка вмонтована у фундаменті (рисунок 2.11):

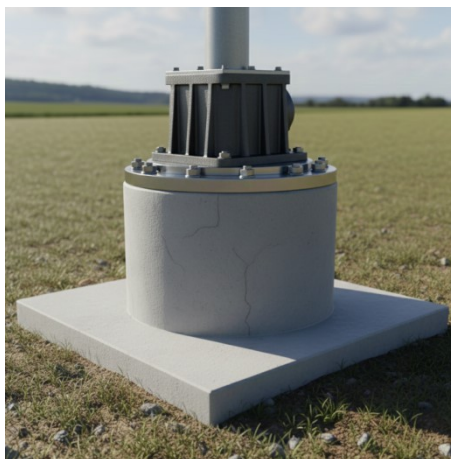


Рисунок 2.12 Одноопорна конструкція

Трекер має дві незалежні осі обертання, які працюють разом: первинна вісь(зазвичай вертикальна вісь, яка забезпечує горизонтальне обертання – від Сходу до Заходу) та вторинна вісь (горизонтальна вісь, закріплена на первинній, яка забезпечує вертикальне обертання для слідування за висотою сонця).[16]

На рухомій частині вторинної осі розташована кріпильна рама, на якій жорстко кріпляться фотоелектричні модулі. Панелі кріпляться до цієї рами за допомогою стандартних притискних клем.[16]

Запропонований монтаж відрізняється своєю конфігурацією та використанням простору. Площа встановлених ФЕМ на трекер зазвичай досить велика, що значно збільшує парусність конструкції.[16]

Тому всі складові мають бути міцними та стійкими, щоб витримати вітер та сніг під час руху.

Панелі можуть бути розташовані на кріпильній рамі як портретно(вертикально), так і альбомно (горизонтально), залежно від загальної конфігурації трекера та розміру рами.[16]

Конструкція трекекра зазвичай розробляється так, щоб забезпечити максимальне освітлення панелей, включаючи задню сторону. Для таких модулів важливо, щоб висота від краю панелі до землі була більшою ніж 1.2 м для захоплення відбитого випромінювання.[16]

Для початкового положення панелей потрібно розрахувати стандартний кут нахилу панелей. Найдоцільніше розрахувати кут нахилу для літнього сезону, оскільки в цей сезон більше безхмарних днів. Для Полтавської області широта дорівнює 48° .[13]

Конструкція системи двовісного сонячного трекера базується на міцній опорній платформі, що забезпечує незалежне обертання фотоелектричної (ФЕ) рами по двох осях: азимутальній (горизонтальній) та зенітній (вертикальній).[16]

2.4 Розрахунок приводного двигуна

Для вибору приводного двигуна потрібно розрахувати масо-габаритні характеристики двигуна. Проведемо розрахунок очікуваної ваги всієї конструкції та привести її до валу двигуна.[21]

Для розрахунку ваги використаємо такі дані: вага 1 панелі – 17, вага валу довжиною 4 м, становить 146 кг, вага рами кріплення панелей – 90 кг. Сумарна вага дорівнює:

$$m = (m_n * 8) + m_K + m_B \quad (2.6)$$
$$m = (17 * 8) + 90 + 146 = 372(\text{кг})$$

Наведену сумарну вагу можна використати для визначення приведенного моменту до валу двигуна та розрахункову потужність двигуна. Для цього потрібно розрахувати силу тертя та силу вітрового навантаження.[21]

Сила тертя:

$$F_T = m * 9.8 * k_T \quad (2.7)$$

де m – маса всієї конструкції;

k_T – коефіцієнт тертя (0.015)

$$F_T = 372 * 9.8 * 0.015 = 54.6(H)$$

Вітрове навантаження:

$$F_v = S * p, \quad (2.8)$$

де S – площа конструкції;

p – вітровий тиск ($p=60$ Па):

$$F_v = 10.7 * 60 = 639.6(H) \quad (2.9)$$

Приведений момент до валу двигуна:

$$M_c = \frac{(F_t + F_v) * d}{n * i} \quad (2.10)$$

де d – діаметр валу;

n – ККД редуктора (0.7)

i – передаточне число редуктора ($i=80$):

$$M_C = \frac{(54.6+640)*0.2}{0.7*80} = 2.48(\text{Н * м}) \quad (2.11)$$

Потужність приводного двигуна:

$$P_C = \frac{k*M_C*n*0.1047}{1000} \quad (2.12)$$

$$P_C = \frac{1.2*2.48+1400*0.1047}{1000} = 0.14(\text{кВт}) \quad (2.13)$$

Згідно розрахунків, для приведення в дію сонячних модулів необхідний мотор-редуктор з крутним моментом не менше 2.5Нм та потужністю не менш 0.5 кВт. Для стандартної двовісної системи, незалежно від кількості, зазвичай потрібно 2 мотор-редуктори. Перший мотор-редуктор відповідає за повертання всієї конструкції зі Сходу на Захід. Оскільки 4 панелі мають чималу вагу та велику площу вітрильності, тут зазвичай використовують потужний поворотно-привідний механізм (slewing drive). Це закритий редуктор, який здатний витримувати величезні осьові навантаження. Другий мотор-редуктор відповідає за нахил панелей вгору та вниз.[21]

2.5 Вибір двигуна електропривода поворотного механізму

При виборі системи керування електроприводом, для керування сонячним трекером, потрібно розуміти, як відбувається процес керування.

Так, для повороту сонячних панелей, за допомогою електроприводу, потрібно застосувати 2-4 фоторезистори, як зазначалося раніше, та інше апаратне забезпечення.[6]

Блоком керування при цьому, буде мікроконтролер, який буде обробляти сигнали , і по них же керувати напрямком руху сонячних панелей.

Тому, при виборі системи керування електроприводом, потрібно розуміти, що мова йде про асинхронний двигун, адже він більш дієвий в таких ситуаціях ніж двигун постійного струму.[6]

Відповідно до результатів проведених розрахунків електропривода та техніко-економічного обґрунтування в якості двигуна візьмемо двигун з КЗ

ротором. АД з КЗ ротором має такі властивості як простота конструкції і використання, а також відносно невисоку ціну серед інших двигунів.[22]

Недоліком електро-двигунів з КЗ ротором є великий пусковий струм. З розвитком силової схемотехніки для керування роботи почали використовувати перетворювачі частоти, які значно покращили його характеристики роботи і зробили найбільш популярним в електроприводі серед всіх існуючих двигунів.

Повертаючись до особливості роботи трекера, час за який Сонце проходить свою траєкторію впродовж дня є досить тривалим, тому необхідність у великих швидкостях повороту панелей відпадає.[22]

Натомість необхідно забезпечити деякий момент для повороту конструкції. Взявши до уваги цю особливість роботи трекера з'являється необхідність у використанні та виборі редуктора. Тому рекомендується взяти і замінити двигун з КЗ ротором на мотор-редуктор. Простота його конструкції і монтажу дозволяє витратити мінімум коштів і часу на вибір і встановлення редуктора окремо від двигуна.[22]



Рисунок 2.13 Мотор-редуктор

Виділяють три основні типи використовувальної передачі: планетарні, циліндричні, черв'ячні.

Планетарні – відрізняються надійністю і довгим терміном служби. Мають найвищий показник ККД.[22]

Циліндричні – мають високий ККД і можливість змінювати передаточне число, можливість передачі великої потужності.

Черв'ячні – низький показник ККД відносно інших передач. Безшумні на великих швидкостях, мають властивість самогальмування.[22]

Великою перевагою черв'ячної передачі є неможливість передачі обертового руху від черв'ячного колеса до черв'яка. Дана властивість дозволяє вирішити проблему прокручування конструкції під впливом вітрового навантаження.[22]

Ми обрали NMRV 150 з черв'ячним типом редуктора та двигуном КЗ ротором. Двигун типу АІР112М4 з потужністю 5,5 кВт та номінальною швидкістю 1300 об/хв виконує умову. Характеристики обраного мотор-редуктора наведені в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 Характеристики мотор-редуктора NMRV 150

Назва	Величина
Тип двигуна	АІР112
Номінальна потужність $P_{дв.н}$ кВт	5.5
Номінальна кутова швидкість $n_{дв.н}$, об/хв.	1300
Співвідношення моментів $\frac{M_{п}}{M_{н}}$	1.8
Співвідношення моментів $M_{max}/M_{н}$	2
Тип редуктора	Черв'ячний
Номінальна кутова швидкість на виході валу $n_{р.н}$ об/хв	24
Номінальний момент на виході валу M , Н*м	221
Маса мотор-редуктора m , кг	22

2.6 Вибір частотного перетворювача

Частотний перетворювач — це пристрій, який перетворює вхідну синусоїдальну напругу з фіксованими амплітудою і частотою на вихідну змінну напругу з варіативними параметрами. Зазвичай він застосовується для живлення трифазних асинхронних двигунів, а також для регулювання їх роботи.[23]

Основна роль частотного перетворювача в системах ПЧ-АД полягає в контролі швидкості обертання двигунів. Окрім цього, пристрій забезпечує плавний старт і зупинку двигуна, можливість його реверсування, а також різноманітні функції захисту.[23]

У сучасних моделях частотних перетворювачів вихідна напруга генерується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), застосовуючи випрямлену напругу в інверторі. При цьому інвертор не лише змінює частоту вихідної напруги, але й регулює її середнє значення, що дозволяє відмовитись від складних керованих випрямлячів на користь простих некерованих діодних випрямлячів.[23]

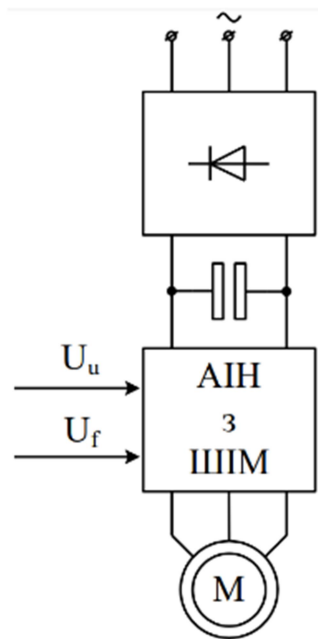


Рисунок 2.14 Блок схема перетворювача частоти

Принцип роботи інвертора з ШІМ зображено на рисунку 2.6. Період синусоїдального сигналу розбивається на інтервали часу тривалістю Δt (не менше як на 24 інтервали). На кожному інтервалі створюються два різнополярних імпульси тривалістю Δt_1 та Δt_2 .[23]

Якщо тривалість позитивного і негативного імпульсів однакова, то середнє значення напруги на інтервалі Δt дорівнює нулю. В іншому випадку

отримують позитивну або негативну вихідну напругу, пропорційну модулю різниці тривалостей цих імпульсів. Якщо один з імпульсів має нульову тривалість, отримують максимальну середню напругу, яка дорівнює U_d . [23]

Для вибору перетворювача частоти потрібно щоб виконувалася наступна умова:

$$\begin{cases} P_{ПЧ} \leq P_{дв.сп} \\ I_{ПЧ} \geq I_{дв.н} \end{cases} \quad (2.14)$$

де $P_{дв.сп}$ – споживана приводним двигуном потужність в номінальному режимі, кВт;

$I_{дв.н}$ – номінальний струм приводного двигуна, А

$$P_{дв.сп} = \frac{k * P_{дв.н}}{\eta_{дв.н}} \quad (2.15)$$

де k – коефіцієнт спотворення струму на вході перетворювача ($k=0.95$).

$$P_{дв.сп} = \frac{0.95 * 750}{0.7} = 1018 \text{ (Вт)}$$

Струм ПЧ повинен бути більшим за номінальний струм приводного двигуна. Струм нашого двигуна становить 2.43 А тому беремо довільний перетворювач, струм якого більший за дане значення. [23]

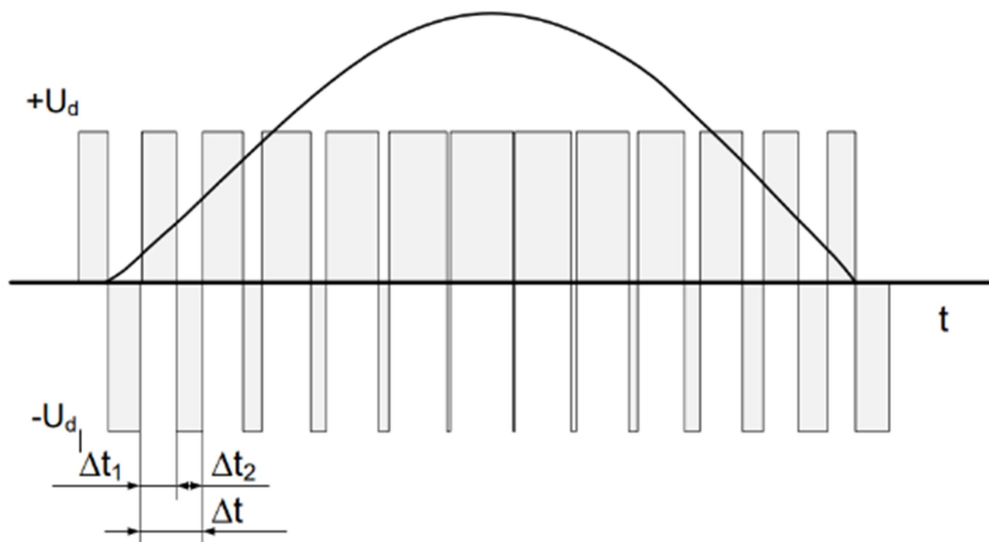


Рисунок 2.15 Вихідна напруга з інвертора з ШІМ

Обираємо перетворювач частоти VLT 2800 1.1 кВт 3-ф/380. Технічні характеристики перетворювача частоти наведені в таблиці 2.7

Таблиця 2.7 Характеристики перетворювача частоти

Тип перетворювача частоти	VLT 2800 1.1кВт 3-ф/380
Номінальна потужність $P_{ПЧ}$, кВт	1.1
Пусковий струм $I_{ПЧ.пуск}$, А	4.8
Вихідний струм $I_{ПЧ}$, А	3
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0.98
Номінальний коефіцієнт корисної дії	90
Напруга мережі, В	3 АС 380÷480 ± 10%
Частота мережі, Гц	47÷63
Максимальна частота на виході, Гц	1000
Кількість/Тип аналогових входів	2(1:1-10V; 1:0(4)-20mA)
Кількість дискретних входів	6
Кількість релейних виходів	1
Перевантажувальна здатність ЛПЧ	1.5

Обраний нами перетворювач зображений на рисунку 2.12 Окрім параметрів наведених в таблиці (2.7) має ще ряд деяких особливостей: скалярний та векторний (без енкодера) режим управління, лінійний закон керування U/f , квадратній закон керування U/f^2 , базова панель програмування LCP 2, наявність ЕМС фільтра та гальмівного модуля.

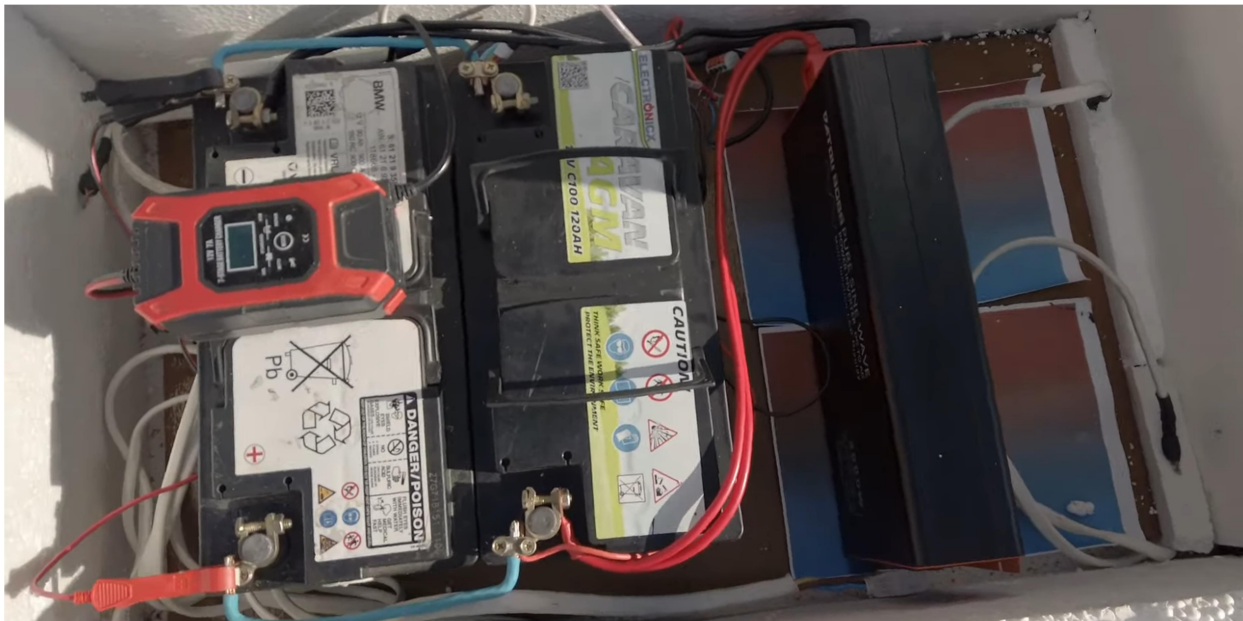


Рисунок 2.16 Частотний перетворювач VLT 2800

2.7 Комп'ютерне моделювання системи

Процес розробки структурної схеми двовісного сонячного трека полягає у визначенні ключових функціональних елементів системи та встановленні взаємозв'язків між ними. Завдяки двовісній конструкції, трекер може рухати сонячні панелі в двох площинах: горизонтальній (азимут) та вертикальній (зеніт). Це забезпечує максимально ефективне поглинання сонячної енергії протягом дня. [15]

Структуру системи можна поділити на чотири основні блоки: інформаційний, керуючий, виконавчий і блок живлення. Інформаційний блок складається з датчиків, що відповідають за збір даних про навколишнє

середовище та положення трекера. Керуючий блок (мікроконтролер, наприклад, Arduino, STM32 або ESP32) є "мозком" системи, який відповідає за опитування датчиків, обчислення вектора руху (через алгоритм порівняння сигналів від фоторезисторів або астрономічний розрахунок за допомогою GPS), а також генерує керуючі сигнали для двигунів. Виконавчий блок відповідає за фізичне переміщення конструкції. Драйвери двигунів підсилюють сигнали від контролера для керування потужними електродвигунами. В системі передбачено два електроприводи: один для азимуту, який обертає конструкцію за сонцем протягом дня, і другий — для зеніту, який регулює кут нахилу панелі відповідно до висоти сонця (з урахуванням сезонних та добових змін). [16]

Процес починається з того, що мікроконтролер опитує фоторезистори та GPS-модуль. Інформація про положення сонця в небі залежно від часу та сезону зберігається в пам'яті мікроконтролера. Зібрані дані порівнюються з базою даних, і на основі цього мікроконтролер надсилає сигнал на двигуни для зміни кута панелей. Алгоритм роботи системи виглядає наступним чином: збір даних — контролер зчитує покази з фоторезисторів, потім аналізує їх. [14]

Якщо ліві датчики освітлені сильніше за праві, включається двигун азимута для повороту вліво. Аналогічно, якщо верхні датчики зчитують більше світла, ніж нижні, вмикається двигун зеніта для підйому панелі. Після досягнення рівномірного освітлення датчиків, система припиняє рух. [15]

Перевагою такого алгоритму є можливість програмного налаштування кількості включень електропривода, необхідних для повного обертання трекера за день. За допомогою фоторезисторів можна точно відстежувати сезонні зміни в русі сонця. Залежно від сезону, на основі даних RTC, система буде коригувати час світлових днів, час сходу та заходу сонця. [15]

Для оптимізації роботи необхідно задати кількість включень для кожного місяця. Це дозволить частково змінювати кількість активацій двигунів в залежності від місяця. Після налаштування режиму роботи трекера, мікроконтролер через певні інтервали часу буде вмикати двигуни для

коригування положення панелей. Коли цикл рухів завершиться, система поверне трекер в початкову позицію. На наступний день процес збору та аналізу даних відновиться.[16]

Алгоритм роботи сонячного трекера зображений на рисунку 2.16. Крім того, для 2024 року можна скористатися сонячним календарем, в якому наведені середні значення тривалості сонячного дня, а також часи сходу та заходу сонця для кожного місяця (таблиця 2.8).

Таблиця 2.8 Сонячний календар

	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад
початок	8:51	8:07	7:09	6:04	5:08	4:45	5:04	5:47	6:34	7:21	8:13
кінець	17:32	18:18	19:03	19:51	20:39	21:11	21:03	20:16	19:11	18:05	17:11
тривалість	8:41	10:11	11:53	13:47	15:30	16:25	15:59	14:29	12:36	10:43	08:58

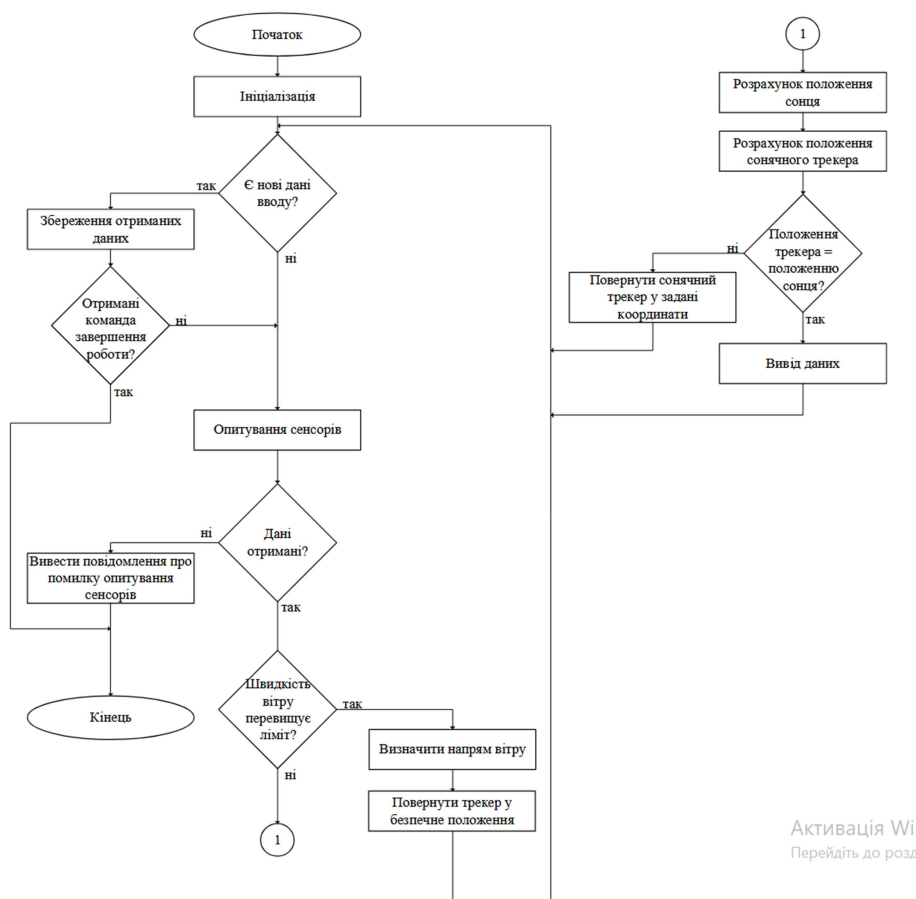


Рисунок 2.16 Блок-схема алгоритму роботи

З таблиці 2.8 можна виділити 2 групи місяців з найменшою різницею в тривалості сонячного дня. Місяці з найбільш довгими сонячними днями: травень, червень, липень. З найбільш короткими сонячними днями: листопад,

грудень, січень. Всі інші місяці мають велику різницю тривалості і використання алгоритму для кожного сезону окремо може призвести до неточності наведення і лишніх витрат енергії. Досить доцільним рішення є розрахунок кількості включень електропривода для кожного місяця.[14]

Для цього необхідно розділити тривалість світлового дня на інтервал часу з яким буде включатися електропривід. Знаючи що впродовж світлового дня за 1 час сонце змінює своє положення на 15° , можна задатися точністю наведення та інтервалом з яким буде працювати електропривід.[14] Розрахуємо кількість включень для точності позиціонування 5° та інтервалу роботи 20 хв для січня місяця:

$$n_{\text{вкл}} = \frac{8 \cdot 60 + 41}{20} = 26 \quad (2.16)$$

Розрахуємо кількість включень для всіх інших місяців та занесемо до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 Кількість включень електропривода для кожного місяця

Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень
26	30	35	43	46	49	48	43

Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
37	32	27	24

Беручи до уваги конструктивне використання трекера, обмеження його кута повороту становить 10° і 170° , де 10° - мінімальне вихідне подожження, а 170° - максимальне кінцеве відносно горизонту.[14]

Повний кут ходу трекера продовж дня становитиме 160° . Маючи цю інформацію, можна розрахувати максимально можливу кількість включень:

$$n_{\text{вкл.макс}} = \frac{160}{5} = 32 \quad (2.17)$$

Із результатів розрахунку бачимо, що трекер не може забезпечити розраховану раніше кількість включень на весняний та літній період. Отже для місяців кількість яких перевищує 32, потрібно встановити часові обмеження для початку та кінця роботи системи, які наведені в таблиці 2.10. Часові обмеження до таблиці 2.8 не повинні бути меншими ніж час сходу та більшими ніж час заходу сонця.

Таблиця 2.10 Часові обмеження трекера

	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
початок	8:51	8:07	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	7:21	8:13	8:53
кінець	17:32	18:18	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	18:05	17:11	16:54
тривалість	8:41	10:11	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:44	8:58	8:01
режим роботи												
20хв 5°	26	30	32	32	32	32	32	32	32	32	27	24

Для місяців листопад, грудень, січень, лютий можна встановити свої значення вихідного та кінцевого положення трекера. Це потрібно для того, щоб забезпечити точне наведення панелей на сонце, бо при виході із вихідного положення 10° трекер почне відставати від сонця. Знаючи необхідну кількість включень та кут який проходить трекер за одне включення можна визначити повний кут ходу дня для:

- Листопаду - 135°
- Грудня – 120°
- Січня - 130°
- Лютого - 150°

Відповідно до цих значень можна записати вихідні та кінцеві кути для цих місяців записавши для цього початок і кінець роботи. Додаючи дані з таблиці 2.10 можна скорегувати режим роботи трекера продовж всього року для режиму роботи – поворот 5° кожні 20 хвилин.[16]

Таблиця 2.11

	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
початок	9:10	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	8:20	7:20	8:20	9:10
кінець	17:30	18:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	18:00	17:00	17:00
тривалість	8:20	9:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	10:40	8:40	7:50
кількість включень	26	30	32	32	32	32	32	32	32	32	27	24
кут повного ходу, °	130	150	160	160	160	160	160	160	160	160	135	120
видіхний кут, °	25	15	10	10	10	10	10	10	10	10	20	30
кінцевий кут, °	155	165	170	170	170	170	170	170	170	170	165	150

На рисунку 2.17 зображено принципову схему живлення приводним двигуном.

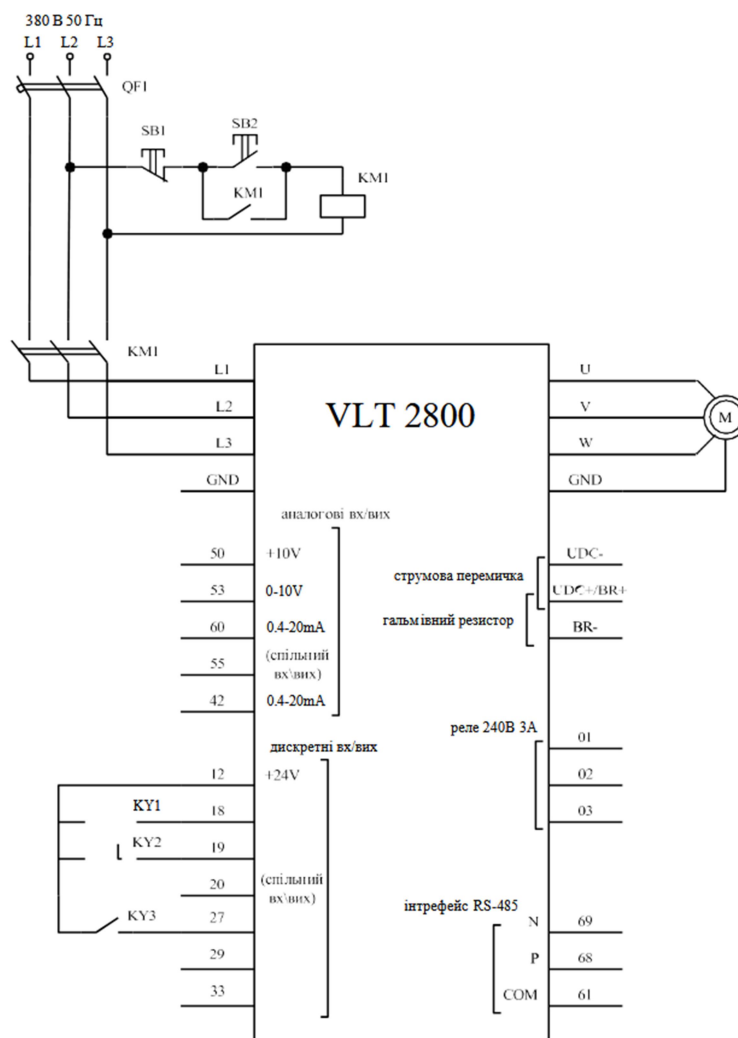


Рисунок 2.17 Принципова схема живлення двигуна

Основний елемент схеми, який забезпечує безпосереднє керування приводного двигуна це частотний перетворювач. Він живиться від трифазної мережі змінного струму промислової частоти через автоматичний вимикач QF1, який забезпечує захист привода від коротких замикань та перевантажень.

Контакти реле KY1-KY3 забезпечують такі режими роботи як пуск, стоп та реверс.[15]

На рисунку 2.18 зображено схему керування трекера ідентичного з нашим, але замість GPS-модуля використовується годинник реального часу DS3231, програмно керує роботою двигуна через реле KY1-KY3. Реле KY1 та KY2 відповідають за пуск та стоп відповідно. Реле KY3 забезпечує реверс двигуна. Кіневік s1 вимикає двигун коли той під час реверсу повернувся у вихідне положення. Кнопки SB2, SB3 дозволяють в ручному режимі змінювати положення трекера. Для живлення використовуються дві мережі – 220В для живлення двигуна та 5В для живлення пристрою керування та датчиків.[15]

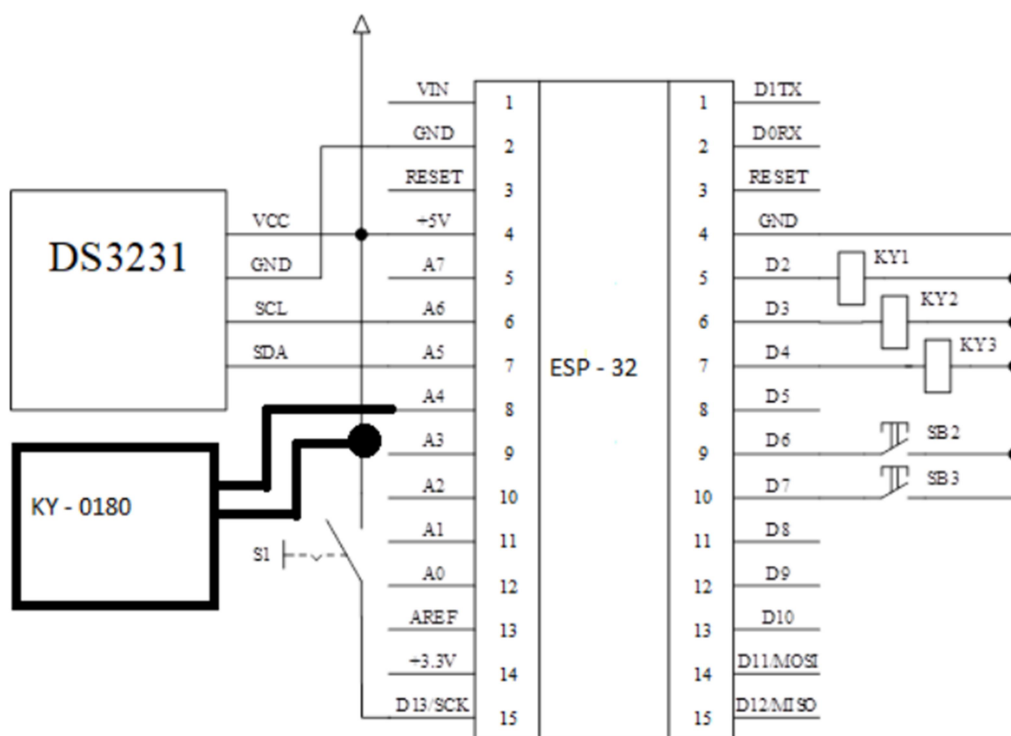


Рисунок 2.18 Схема керування трекером

РОЗДІЛ 3

3.1 Огляд мобільного за стосунку

На кінцевому етапі, було запропоновано під'єднати систему трекінгу до мобільного додатку, для експериментального досвіду.

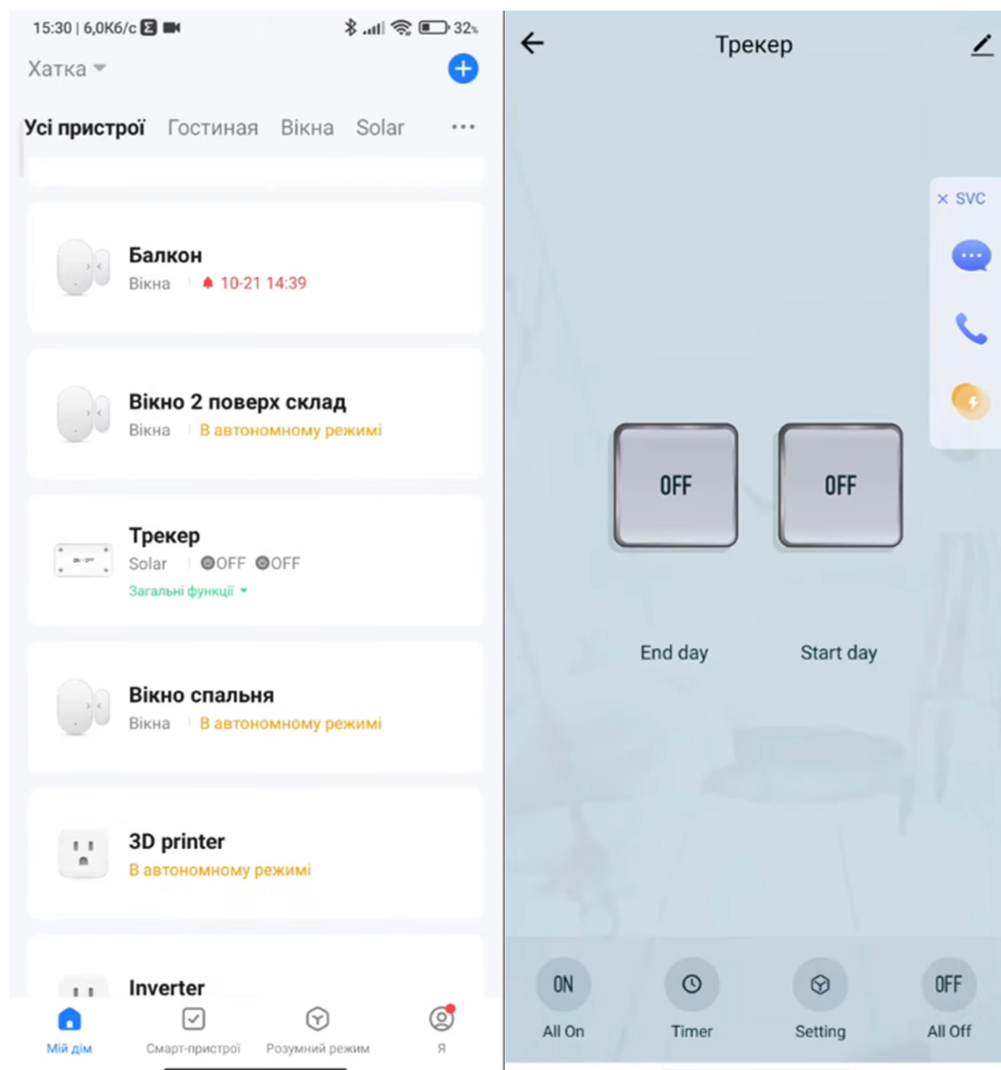


Рисунок 3.1 Додаток для керування системою

Оскільки у приміщенні використовувалась smart-технологія, то трекер було під'єднано до загального мобільного додатку через Wi-Fi мережу. На рисунку 3.1 зображений візуальний вигляд на сам додаток та головне вікно керування.

Алгоритм роботи полягає в наступному: при натисканні кнопки «Start day» ми приводимо систему в режим збору інформацію та коригування поточного положення. При виконанні цієї команди сонячні панелі починають роботу.

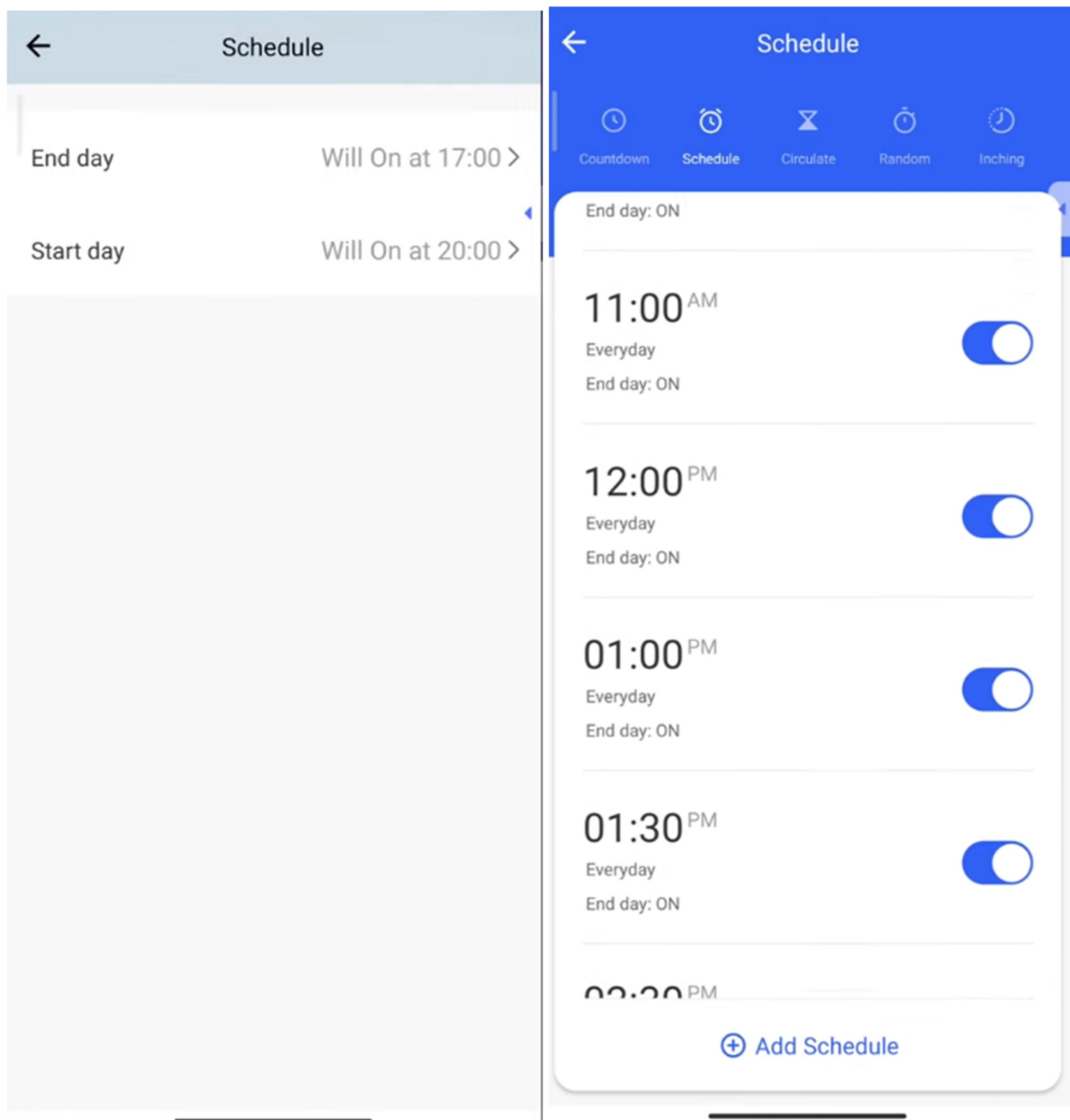


Рисунок 3.2 Налаштування роботи

На рисунку 3.2 зображено, як відбувалося налаштування. У всіх налаштуваннях використовується таймер, початок дня починається о 8:00 і до 20:00 триває робота. По настанню вечора при натисканні кнопки «End day» система переходить у положення «Start day». За для експерименту був виставлений погодинний таймер, згідно якому система вмикається для збору нових даних та приведення трекера у оптимальне положення для максимізації генерації сонячної електроенергії. В свою чергу це суттєво впливає на роботу електропривода, зменшуючи витрати на його роботу.

Великою перевагою цього додатку є наявність функції контролю за погодніми умовами. Так проставивши попередні умови, такі як швидкість вітру більше 10 метрів за секунду подається сигнал, який приводить конструкцію у горизонтальне положення.

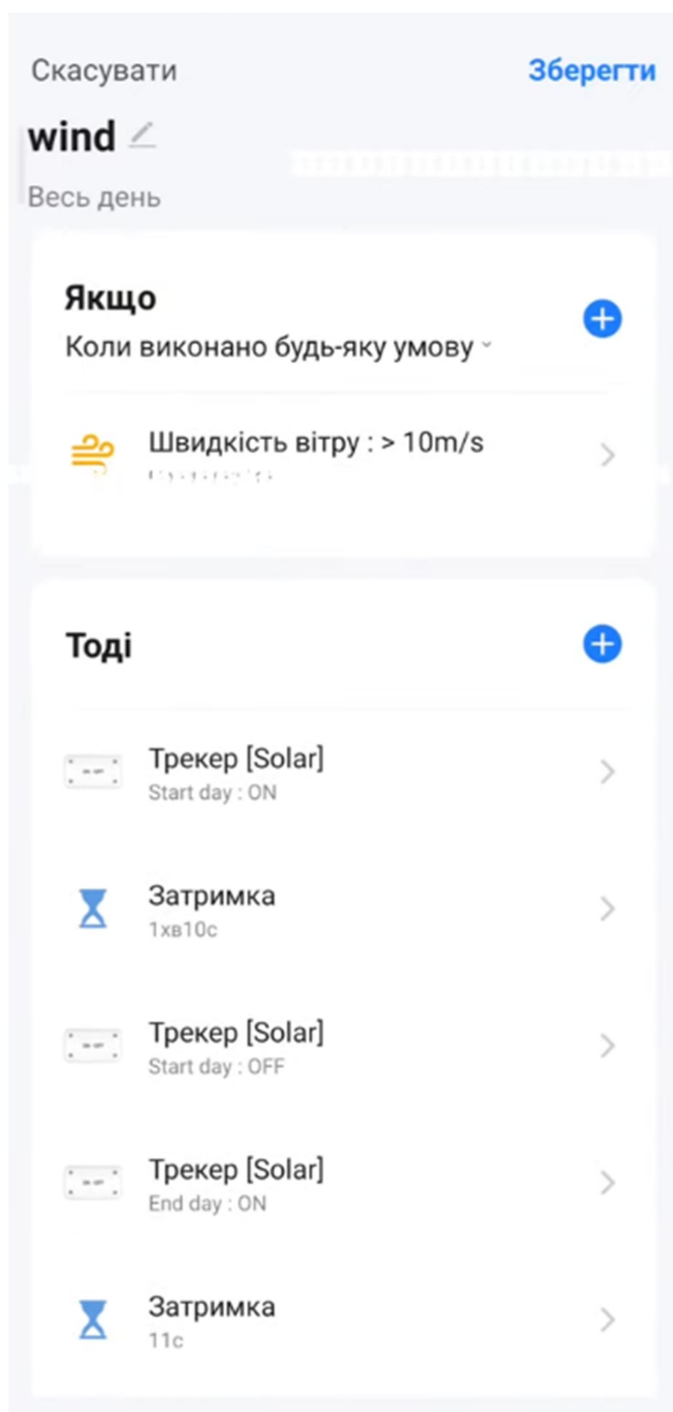


Рисунок 3.3 Контроль вітру

3.2 Порівняння кінцевих показників

Згідно зібраної інформації за 2025 рік стаціонарна станція мала показники наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Виробіток енергії за 2025 рік

Місяць	Генерація	Середньодобовий виробіток(кВт*год/день)	Рівень забезпечення будинку
Січень	65	2.1	Мінімальний
Лютий	105	3.8	Базовий
Березень	225	7.3	Половина
Квітень	330	11.0	Повний
Травень	410	13.2	Надлишковий
Червень	435	14.5	Надлишковий
Липень	450	14.5	Надлишковий
Серпень	415	13.4	Надлишковий
Вересень	310	10.3	Повний
Жовтень	205	6.6	Половина
Листопад	85	2.8	Мінімальний
Грудень	45	1.5	Мінімальний
Загалом	≈ 3080 кВт*год	8.4(середнє значення)	

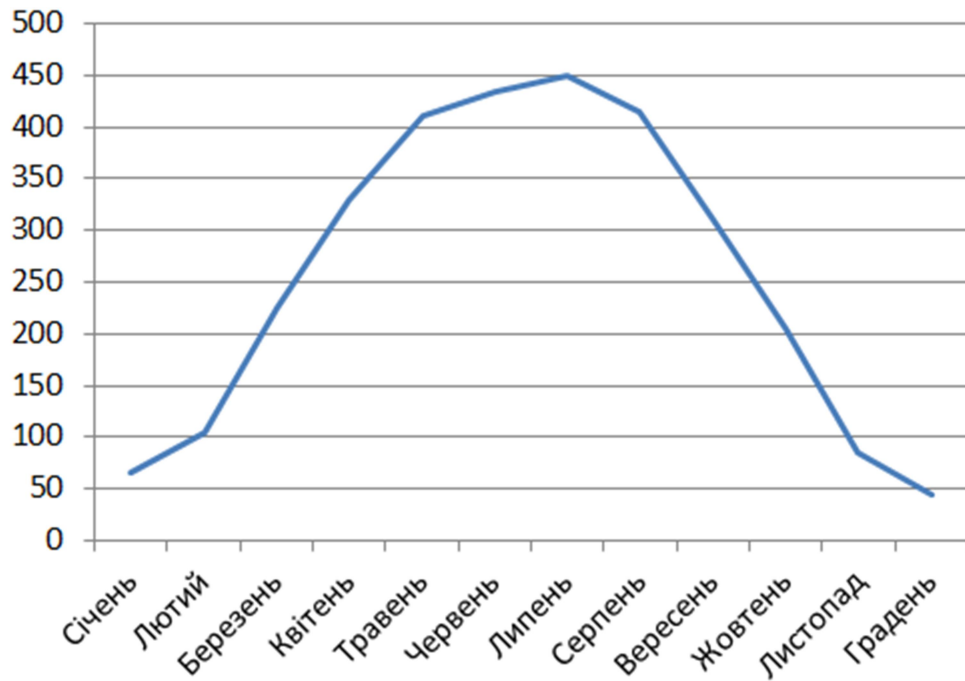


Рисунок 3.4 Графік показників стаціонарної системи

Таблиця 3.2 Прогноз генерації на 2026 рік

Місяць	Виробіток енергії	Приріст від трекера
Січень	85	+25%
Лютий	155	+40%
Березень	340	+45%
Квітень	515	+50%
Травень	660	+55%
Червень	730	+60%
Липень	745	+58%
Серпень	650	+52%
Вересень	470	+45%
Жовтень	290	+35%
Листопад	115	+28%
Грудень	60	+20%
РАЗОМ	4815 кВт*год	+50%(в середньому)

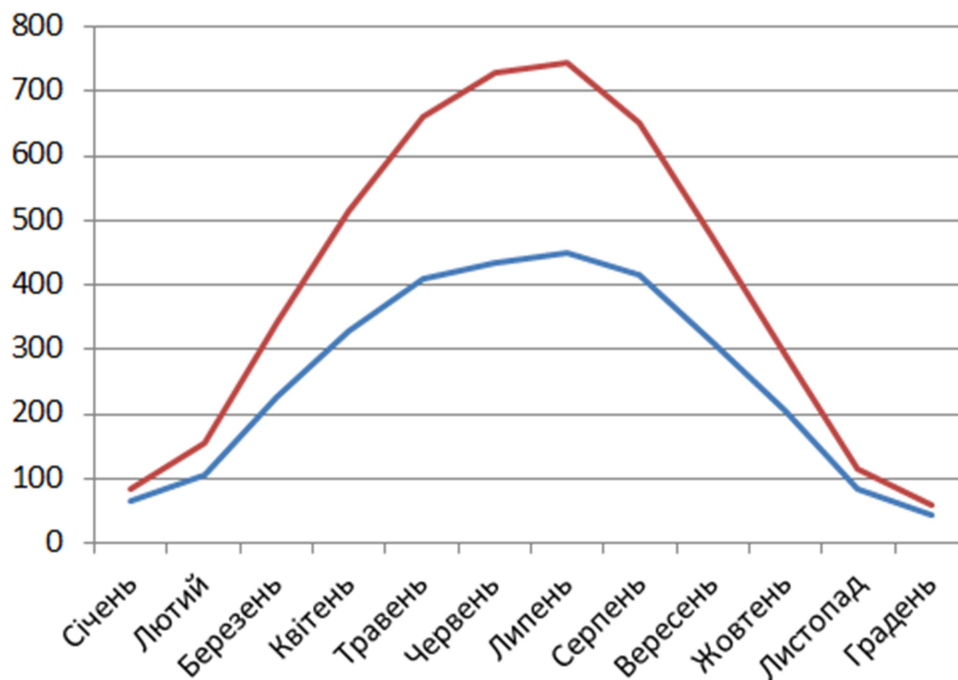


Рисунок 3.5 Динаміка приросту генерації на 2026 рік

Згідно графіку порівняння двох систем, бачимо що використання двовісного сонячного трекера додає близько 35-45% до річного виробітку порівняно зі стаціонарною установкою. Варто пам'ятати, що трекер сам по собі споживає електроенергію на роботу двигунів, але це майже не впливає на результат, по-друге, bifacial – панелі, часто є двосторонніми, і як трекер знаходиться над землею, вони будуть ловити відбите світло від землі, що додає 5-10% до зазначених показників, за умови що під трекером знаходиться гравій або світла трава.

ВИСНОВКИ

Підводячи підсумки роботи, можна сказати що система стеження має як плюси так і мінуси. Головною перевагою є значний приріст генерації сонячної електроенергії. Недоліком варто зазначити вартість окремих комплектуючих та складових проекту, таких як сонячні панелі. Тож пройде певний час як система повністю окупить свою вартість. На мою думку проект виглядає перспективним, як для користувачів у приватному секторі так і у промисловому.

Список використаної літератури

1. Kalogirou, Soteris A. – *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed., Elsevier, 2014
2. Duffie, John A., Beckman, William A. – *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Wiley, 2013
3. Nelson, Jenny – *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, 2003
4. “Performance analysis of single-axis and dual-axis solar tracking systems in different climates”
5. “Design and Implementation of a Dual Axis Solar Tracker”
6. “Development of a low-cost solar tracker with data logging feature for PV systems”
7. Андрієнко В.Ю., Юдін В.Г. – *Основи відновлюваної енергетики*, Київ: НАУ, 2019
8. Іванов С.О., Петренко С.О. – *Сонячна енергетика: навчальний посібник*, Харків: ХНУРЕ, 2020
9. https://www.sunpalsolar.com/category/pv-modules/?source=ad&gad_source=1&gad_campaignid=21541906507
10. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
11. Kurbatova T., Spivakovskyy S., Sotnyk M. and Hurchenko Y. «Solar Energy Advancement in Ukraine’s Households: is the Feed-In Tariff Economically Justified?», 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. 145-165
12. Slabinoha M. O., Kuchirka Y. M., Krinitsky O. S., Yourkiv N. M. «Modeluvanna zalezhnosti zminopotuzhnosti sonachnih paneley vid kuta padinna promeniv», 2018.
13. Golovan M. M., Zdolbitska N. V., Lishchina V. O., Grinuk S. V. «Analiz productivnosity systemy avtomatichnoho posicionuvanna sonachnih paneley», 2020.

14. Xing C., Xi X., He X. and Liu M. «Research on the MPPT Control Simulation of Wind and Photovoltaic Complementary Power Generation System», 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2020.
15. Anuradha A., Yadav S. and Sinha S. «Solar-Wind Based Hybrid Energy System: Modeling and Simulation», 2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), 2021.
16. Mitrofanov S. V., Baykasenov D. K. and Nemaltsev A. U. «Operation of Solar Power Plant with Solar Tracker in Orenburg Region During the Winter», 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019.
17. Mohamadi M., Roshandel E., Gheasaryan S. M. and Khoshkalamyan P. «Stability and power factor improvement in a power system with simultaneous generation of steam and solar power plant», 2016 6th Conference on Thermal Power Plants (CTPP), 2016.
18. Tiwari S., Kewat S. and Singh B. «UPQC Controlled Solar PV-Hydro Battery Microgrid», 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2020
19. Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D (**Journal of Cleaner Production, 2022**)
20. A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic (PV) Technologies (Energies, 2023)
21. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій в локальних системах енергозабезпечення (**2023**).
22. Аналіз досліджень впливу температури на деградацію та ефективність роботи сонячних панелей (**2024**).

Додаток А

Програмування фоторезисторів

```
// Визначаємо піни для фоторезисторів
const int ldrPin1 = 34;
const int ldrPin2 = 35;
const int ldrPin3 = 32;
const int ldrPin4 = 33;

void setup() {
  // Ініціалізуємо серійний порт для виводу даних
  Serial.begin(115200);

  // Налаштовуємо точність АЦП (за замовчуванням 12 біт: 0-4095)
  // Можна не писати, це стандарт, але корисно знати
  analogReadResolution(12);
}

void loop() {
  // Зчитуємо аналогові значення (від 0 до 4095)
  int val1 = analogRead(ldrPin1);
  int val2 = analogRead(ldrPin2);
  int val3 = analogRead(ldrPin3);
  int val4 = analogRead(ldrPin4);
```

```
// Виводимо результати у монітор порту
Serial.print("LDR 1: ");
Serial.print(val1);
Serial.print(" | LDR 2: ");
Serial.print(val2);
Serial.print(" | LDR 3: ");
Serial.print(val3);
Serial.print(" | LDR 4: ");
Serial.println(val4);

// Невелика затримка для зручності читання
delay(500);
}
```

Додаток Б

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Проектування та моделювання системи відстеження Сонця для підвищення ефективності фотоелектричної установки

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:
Студент групи 601-МЕ

Коломісць В.О

Керівник:
доцент, канд. техн. наук

Галай В.М



Актуальність теми полягає у підвищенні енергоефективності та виробництва і зростаючої ролі відновлювальних джерел енергії

Мета роботи полягає у розробці та дослідженні сонячної електростанції, яка повинна збільшити генерацію сонячної електроенергії на 30-45%

Об'єкт дослідження - процеси генерування електричної енергії сонячною установкою з двома осями коригування

Предмет дослідження - система управління двовісною трекінговою сонячною електростанцією

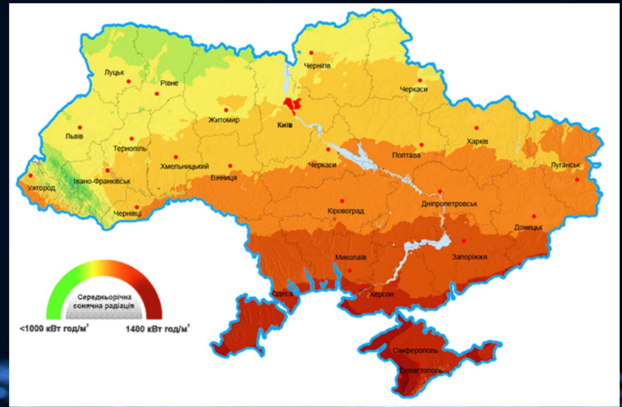


Для першого етапу, необхідно було визначити кут широти, який припадає на Полтавську область для коректного монтажу установки

Для цього було використано наступну формулу:

$$E_{\Pi} = E_c * \cos(\theta) / \cos(\varepsilon)$$

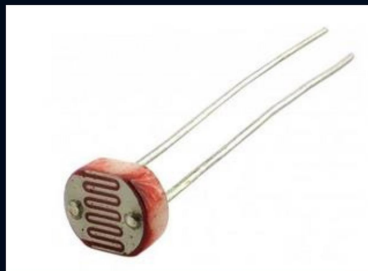
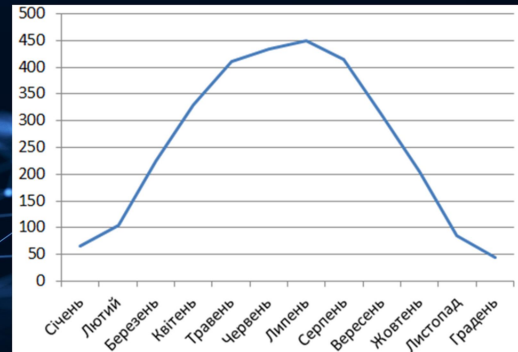
В межах Полтавської області показник варіюється від 48 до 50



Для порівняння було використано стандартну сонячну електростанцію, яка складалася з чотирьох фотоелектричних елементів



Місяць	Генерація	Середньодобовий виробіток(кВт*год/день)
Січень	65	2.1
Лютий	105	3.8
Березень	225	7.3
Квітень	330	11.0
Травень	410	13.2
Червень	435	14.5
Ліпень	450	14.5
Серпень	415	13.4
Вересень	310	10.3
Жовтень	205	6.6
Листопад	85	2.8
Грудень	45	1.5
Загалом	≈ 3080кВт*год	8.4(середнє значення)



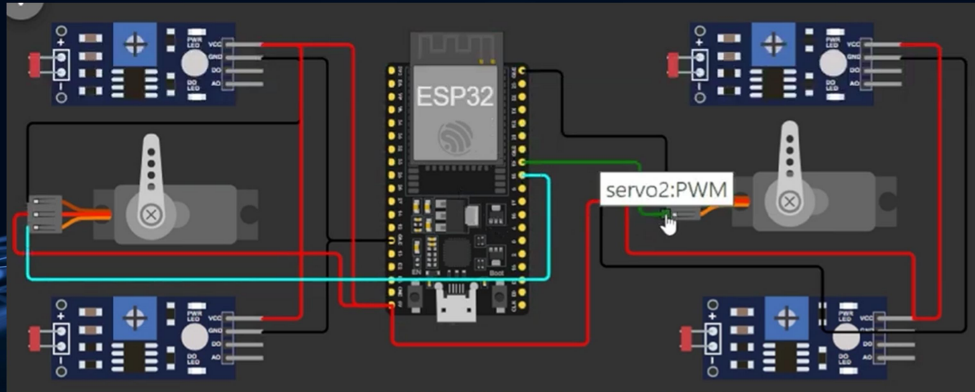
Фоторезистор LDR GL 5528 - відіграє одну з головних ролей у роботі системи. Всього вони були використані у кількості 4 - шт, розташовувались на крайніх кутах кожної з панелей. В даній роботі, вони подають сигнали до контроллера стосовно отримуваної електроенергії. Орієнтуючись на ці дані система робить висновки, у яке положення ставити станцію, щоб отримувати максимальний приріст.



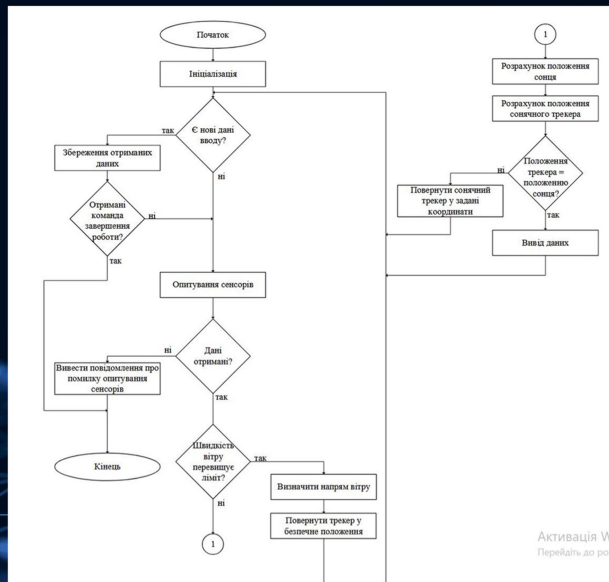
Призначення цього сенсора полягає у визначенні істинного положення сонця(азимут і висота) у будь-який момент часу та місці. Це основа точності. Система керується астрономічним алгоритмом (Open-Loop Control), який є незалежним від погодних умов (хмарності, туману, дощу) та забруднення поверхні панелей.

Схема підключення фоторезисторів (LDR) та сервоприводів до плати ESP 32

32



Покроковий алгоритм роботи двовісної сонячної системи



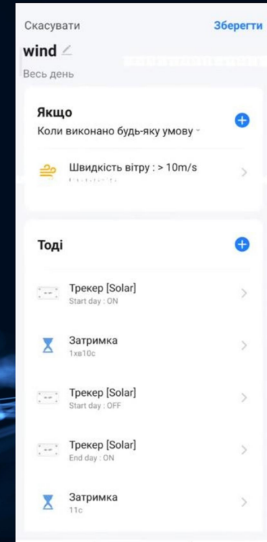
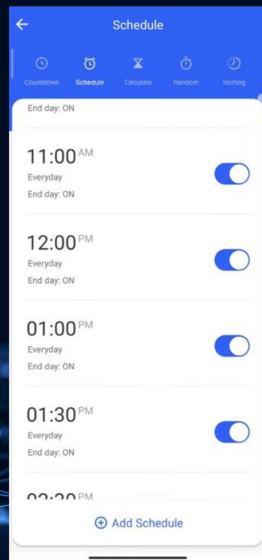
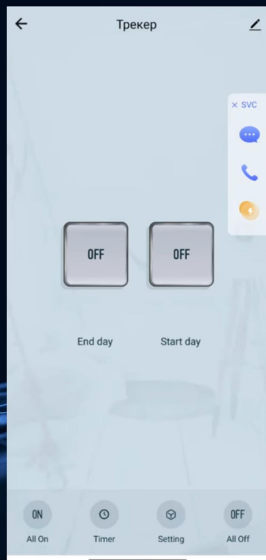
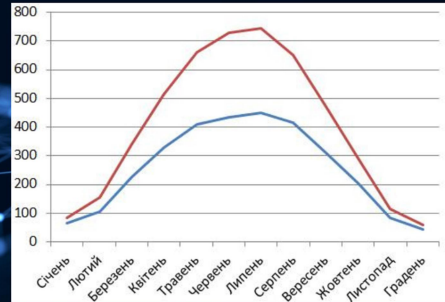
Активация Wi
Перейти до роз



Згідно наявної інформації з проєкту дана система зможе забезпечити генерацію сонячної електроенергії, як для окремо взятого об'єкта так і для підприємницьких господарств. Був сформований прогноз на наступний 2026 рік



Місяць	Виробіток енергії	Приріст від трекера
Січень	85	+25%
Лютий	155	+40%
Березень	340	+45%
Квітень	515	+50%
Травень	660	+55%
Червень	730	+60%
Липень	745	+58%
Серпень	650	+52%
Вересень	470	+45%
Жовтень	290	+35%
Листопад	115	+28%
Грудень	60	+20%
РАЗОМ	4815 кВт*год	+50% (в середньому)



УДК 621.34

В.М. Галай, *д.т.н*

В.О. Коломієць, *магістрант*

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ СОНЦЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

На тлі посилення кліматичних змін та виснаження запасів викопного палива, сонячна енергетика визнана одним із найбільш перспективних і екологічно чистих шляхів забезпечення енергетичної незалежності. Україна, прагне збільшити частку відновлювальних джерел енергії у загальному балансі енергії. Основним завданням є, зниження собівартості електроенергії, виробленої фотоелектричними установками. Системи відстеження сонця (далі. трекери) прямо впливають на даний показник, забезпечуючи суттєвий приріст генерації до 20-45%, порівняно зі стандартними системами. Це скорочує термін окупності інвестування у сонячні електростанції.

Існуючі на даний момент комерційні трекери часто є дорогими або складними у обслуговуванні. Є нагальна потреба в розробці оптимізованих, надійних і економічно доступних рішень, які б ефективно працювали в умовах конкретної географічної широти та змінної погоди. Не треба забувати, що даний процес вимагає точного математичного моделювання взаємодії руху сонця, механіки трекера та електричних характеристик панелі. Це дозволяє ще на етапі розробки мінімізувати втрати потужності та підвищити загальний ККД системи. Розробка власного проекту системи трекінгу дозволить адаптувати її до місцевих інженерних стандартів та зменшити залежність від імпорتنих технологій, що є важливим для енергетичної безпеки країни.

Головна мета полягає у підвищенні річного енерговиробітку окремо взятої фотоелектричної установки шляхом розробки, математичного моделювання та порівняльного аналізу ефективності оптимізованої двохосової системи відстеження сонця, адаптованої для конкретних географічних умов. Для досягнення результатів довелося провести огляд літературних джерел, патентів та існуючих комерційних рішень для класифікації та порівняння різних архітектур трекерів (одноосові, двоосові) та їхніх приводів. Проаналізувати та вибрати найбільш актуальні методи керування (астрономічний алгоритм, сенсорне керування, гібридні підходи) для забезпечення максимальної точності та енергоефективності. Визначити оптимальні конструктивні матеріали та схему приводу, що відповідають вимогам надійності та мінімальної вартості. Важливо сформулювати точну астрономічну математичну модель руху сонця – розрахунок зенітного та азимутального кутів з урахуванням місцевих географічних координат та часових поправок, розробити динамічну модель механічної частини трекера для оцінки необхідної потужності двигунів та стабільності конструкції. Створити

електричну модель фотоелектричного модуля та трекерної системи для розрахунку виробітку енергії.

Аналіз двовісної системи трекінгу показує, що це найбільш ефективно, але й найскладніше технічне рішення для сонячної енергетики. Система дозволяє панелі завжди бути перпендикулярною до сонячних променів, враховуючи як добовий рух сонця, так і сезонну зміну висоти. Приріст генерації сонячної електроенергії припадає на 40% порівняно зі стаціонарними установками.

Що стосується комплектуючих, в даному проекті окрім фоторезисторів, які забезпечують точне наведення сонячних панелей, також використовуються інклінометр – забезпечуючи зворотний зв'язок, щоб система точно знала кут нахилу установки, уникаючи механічних помилок.

Якщо ж пройтись по перевагам та недолікам, то до переваг відноситься: максимально можливий ККД панелі, Стабільний графік видачі енергії протягом дня та можливість автоматичного переходу в горизонтальний режим при сильному вітрі. До недоліків слід віднести високу ціну та довгий період окупності, наявність рухомих частин, що потребують обслуговування, споживання енергії двигунами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kurbatova T., Spivakovskyy S., Sotnyk M. and Hyrchenko Y. «Solar Energy Advancement in Ukraine's Households: is the Feed-In Tariff Economically Justified?», 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. 145-165
2. Slabinoha M. O., Kuchirka Y. M., Krinitsky O. S., Yourkiv N. M. «Modeluvanna zalezhnosti zminypotuzhnosti sonachnih paneley vid kuta padinna promeniv», 2018.
3. Golovan M. M., Zdolbitska N. V., Lishchina V. O., Grinuk S. V. «Analiz productivnosity systemy avtomatichnoho posicionuvanna sonachnih paneley», 2020.
4. Xing C., Xi X., He X. and Liu M. «Research on the MPPT Control Simulation of Wind and Photovoltaic Complementary Power Generation System», 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2020.
5. Anuradha A., Yadav S. and Sinha S. «Solar-Wind Based Hybrid Energy System: Modeling and Simulation», 2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), 2021.

DESIGN AND MODELING OF A SUN TRACKING SYSTEM TO INCREASE THE EFFICIENCY OF PHOTOELECTRIC INSTALLATIONS

V. Galay, candidate of technical sciences

V. Kolomiets, undergraduate

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»