

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2022р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої** **освіти**

на тему

**“ Дослідження ефективності систем керування сонячною
електростанцією за максимумом генеруючої потужності**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Євгеній МИРЧЕНКО

« ____ » _____ 2022р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2022 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мирченка Євгенія Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження ефективності систем керування сонячною
електростанцією за максимумом генеруючої потужності

Study of the effectiveness of solar power plant control systems at maximum
generating capacity

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.12.2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Метою роботи є підвищення генеруючої потужності сонячної
електростанції, виконати аналіз використання сонячних електростанцій в
Україні розробити систему оптимального керування сонячною
електростанцією, провести дослідження ефективності роботи системи
керування положенням панелей.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	4.10.22	
2	<i>Аналіз використання сонячних електростанцій в Україні</i>	11.10.22	
3	<i>Роблення системи оптимального керування сонячною електростанцією</i>	14.10.22	
4	<i>Дослідження ефективності роботи системи керування положенням панелей</i>	22.10.22	
5	<i>Техніко-економічні розрахунки з урахуванням екологічної складової</i>	28.10.22	
6	<i>Охорона праці</i>	5.11.22	
7	<i>Висновки</i>	15.11.22	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	25.11.22	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Мирченко Є.О. Дослідження ефективності систем керування сонячною електростанцією за максимумом генеруючої потужності

Study of the effectiveness of solar power plant control systems at maximum generating capacity.

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2022 р.

В роботі досліджено ефективність роботи сонячної електростанції. Проведено аналіз трекерних систем регулюванням положенням сонячних панелей.

Виконано аналіз методів керування положенням сонячних панелей. Для розв'язання задачі підвищення енергоефективності роботи сонячною електростанцією використовується система керування на базі плати керування Arduino UNO,

Метою кваліфікаційної роботи є пошук шляхів підвищення генеруючої потужності сонячної електростанції. На базі запропонованого метода управління положенням фоторезисторів розроблена автоматизована система керування положенням панелей відносно Сонця. Проведені експериментальні дослідження які підтверджують достовірність та адекватність прийнятих рішень. Галузь застосування – «розумні мережі», електроенергетика, промисловість.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ, СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ

.

ABSTRACT

Myrchenko E. Study of the effectiveness of solar power plant control systems at maximum generating capacity.

Дослідження ефективності систем керування сонячною електростанцією за максимумом генеруючої потужності

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP "Electrical systems of power consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2022

In the qualification work, the efficiency of the solar power plant was investigated. The analysis of tracker systems by adjusting the position of solar panels was carried out.

The analysis of methods of controlling the position of solar panels was performed. To solve the problem of improving the energy efficiency of the solar power plant, a control system based on the Arduino UNO control board is used.

The purpose of the qualification work is to find ways to increase the generating capacity of the solar power plant. Based on the proposed method of controlling the position of photoresistors, an automated system for controlling the position of panels relative to the Sun has been developed. Experimental studies have been conducted that confirm the reliability and adequacy of the decisions made.

ALTERNATIVE ENERGY SOURCES, CONTROL METHODS,
CONTROL SYSTEMS, SOLAR POWER PLANT

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ.....	12
1.1 Теоретичні дослідження режимів роботи сонячних електростанцій	12
1.2 Аналіз використання відновлювальних джерел сонячної енергії....	17
1.3 Теоретичне дослідження кута сонячного випромінювання	19
1.4 Аналіз методів контролю положення Сонця.....	23
Висновки до розділу 1.....	25
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ	26
2.1 Обґрунтування вибору системи керування рухом трекерної системи	26
2.2 Аналіз технічних характеристик елементів трекерної системи.	30
Висновки до розділу 2.....	33
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ПАНЕЛЕЙ	34
3.1. Розрахунок річної генерації ФЕС з пасивним керування	34
3.2. Розрахунок річних втрат в трекерній системі	42
3.3. Розрахунок річних втрат енергії на орієнтацію фотодавачів	47
Висновки до розділу 3.....	50
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ	51
4.1. Екологічна складова оцінки ефективності проектів.....	51
4.2. Методика розрахунку екологічної складової приведених витрат...	52

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54
ДОДАТКИ.....	56
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
ДОДАТОК Б. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КУТА НАХИЛУ ТА ПЛОЩІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ.....	61
ДОДАТОК В. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ СОНЯЧНОЇ ПОЗИЦІЇ (SPA) ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СОНЯЧНОГО ЗЕНІТУ ТА КУТА АЗИМУТУ.....	71
ДОДАТОК Г. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ БЕЗ ТРЕКЕРА.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АКБ - акумуляторна батарея;
- ВДЕ - відновлювана енергетика
- ВАХ - вольт-амперна характеристика;
- САК - система автоматичного керування;
- СЕС - сонячна електрична станція;
- СЕ - сонячний елемент;
- СМ - сонячний модуль;
- ТГМП - точка генерації максимальної потужності;
- ФЕП - фотоелектрична панель;
- GPS - (англ. Global Positioning System) система глобального позиціонування.
- RTC - (англ. Real Time Clock) годинник реального часу

ВСТУП

Українська промисловість є найбільш енергоємною серед економічно розвинутих країн Європи, енергоємність виробництва в нашій країні в 5 більша ніж показники інших країн, тому імпорт природних енергоносіїв негативно впливає на розвиток промисловості і техніки .

Широке впровадження альтернативних джерел відновлювальної енергетики є одним із головних напрямків енергетичної політики України з 2010 року. Збільшення частки генерації від альтернативних джерел відновлювальної енергетики до 30 % в енергетичній системі України сприятиме перерозподілу потоків джерел енергії, зменшить видатки на теплоенергетику, викиди вуглецю до атмосфери, сприятиме енергетичної незалежності.

Сонячна енергія відносить до невичерпних джерел енергії. Запаси традиційних викопних ресурсів обмежені і частка їх відновлення не встигає за їх видобутком. Ефективне використання енергії сонячного випромінювання дозволить з`економити значні природні ресурси для промислового виробництва, ліквідувати дефіцит енергетичних ресурсів.

Використання сонячної енергії відноситься до відносно чистих енергетичних ресурсів і практично не шкодить навколишньому середовищу у порівнянні з використанням традиційних корисних копалин.

Основою проблемою сьогодення при виробництві електричної енергії від альтернативних джерел відновлювальної енергетики є низький коефіцієнт корисної дії фотоелектричних батарей. Географічне положення нашої країни має максимальний потенціал сонячного випромінювання до 1500 кВт·год/м², хоча використання сонячних установок є ефективним

лише протягом п'яти-семи місяців в залежності від географічного положення СЕС.

Для підвищення продуктивності сонячних панелей використовують спеціальні технології та способи, направлені на збільшення значення їх питомої генерації.

В першому випадку необхідно відслідковувати умовну точку максимальної потужності на небосхилі, а в іншому випадку виконувати корекцію кута нахилу сонячних панелей протягом світового дня для всіх кліматичних сезонів. Для пошуку точки максимальної потужності (ПТМП) (на англ. maximum power point tracking, MPPT) здійснюються з підтримкою специфічних контролерів, які входять до складу сучасних сонячних інверторів.

Знаходження оптимального режиму роботи з найбільшою генерацією електроенергії буде відповідати найбільший рівень освітленості сонячного випромінювання виконується контролером. Найбільший рівень генерації електроенергії відпадає максимуму вольт-амперну характеристику (ВАХ) сонячної батареї.

Для відслідковування положення Сонця використовують пристрої корекції кута нахилу сонячної панелі, які називаються трекерами. Для максимальної генерації електроенергії площа фотоелектричної панелі рухається відповідно до положення сонця на небосхилі.

Таким чином оптимізація систем керування положенням сонячних панелей для підвищення їх енергоефективності є актуальною задачею.

В роботі проведено дослідження роботи систем керування сонячними панелями для визначення максимальної генерації.

Об'єктом дослідження є система керування кутом нахилу сонячної панелі.

Предметом дослідження – фотоелектрична електростанція.

Мета роботи – дослідження оптиманого керування сонячної електростанції за максимумом генеруючої потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) виконати аналіз проблеми сьогодення при роботі сонячних електростанцій;
- 2) дослідити ефективності роботи трекерних систем;
- 3) визначення оптимального алгоритму керування трекером;
- 4) провести експериментальні дослідження імітаційної комп'ютерної моделі сонячної електростанції.

Структура та обсяг дослідження. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний обсяг роботи – 55 сторінок, робота містить 12 таблиць, 16 рисунків, 1 додаток, 18 джерел інформації.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ

1.1 Теоретичні дослідження режимів роботи сонячних електростанцій

Площа сонячних фотоелектричних станцій в Україні станом на 2018 рік становила більше 168 тис. квадратних метрів. Кліматичні умови України, особливо південні регіони мають сприятливі умови для використання сонячних фотоелектричних станцій.

Річний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні еквівалентний 6,2 млн. т у. п., за умови його використання зменшило потребу країни природньому газі орієнтовно на 4,95 млрд. кубічних метрів.

Річне усереднене значення сонячної радіації, що потрапляє на 1 м² поверхні, на території України знаходиться в межах від 1030 кВт·год/м² в її північній частині до 1510 кВт·год/м² і вище на півдні України.

З 2010 року прийняті законодавчі акти відкрили шляхи використання сонячної енергетики в Україні. За статистичними даними ріст потужностей сонячних електростанцій збільшувався з кожним роком у 2018 році досяг 359,4 МВт.

Але незважаючи на складне економічне і політичне становище, країна починає поступово нарощувати потужності альтернативних джерел відновлювальної енергетики.

В 2016 році в місті Підгороднє Дніпропетровської області підключили сонячну електростанцію з системою трекерного керування

потужністю 2,56 МВт, а загальна потужність станції (включаючи статичні системи) становить 4,21МВт.

Географічне розташування України має високі можливості для впровадження проектів сонячної генерації. За ступенем інсоляції Україна має можливості перевершити в сонячної генерації Німеччину, що є лідером використання даних систем.

В країні виконується підтримка проектам генерації сонячної енергії на основі ВДЕ. Практична реалізація проектів вимагає врахування державних підактів та постанов, через які виникаються серйозні обмеження і та виникають додаткові ризики ефективності інвестицій.

Структура введення в експлуатацію нових відновлювальних потужностей у I кварталі 2018 року зображено на рисунку 1.1 [3].

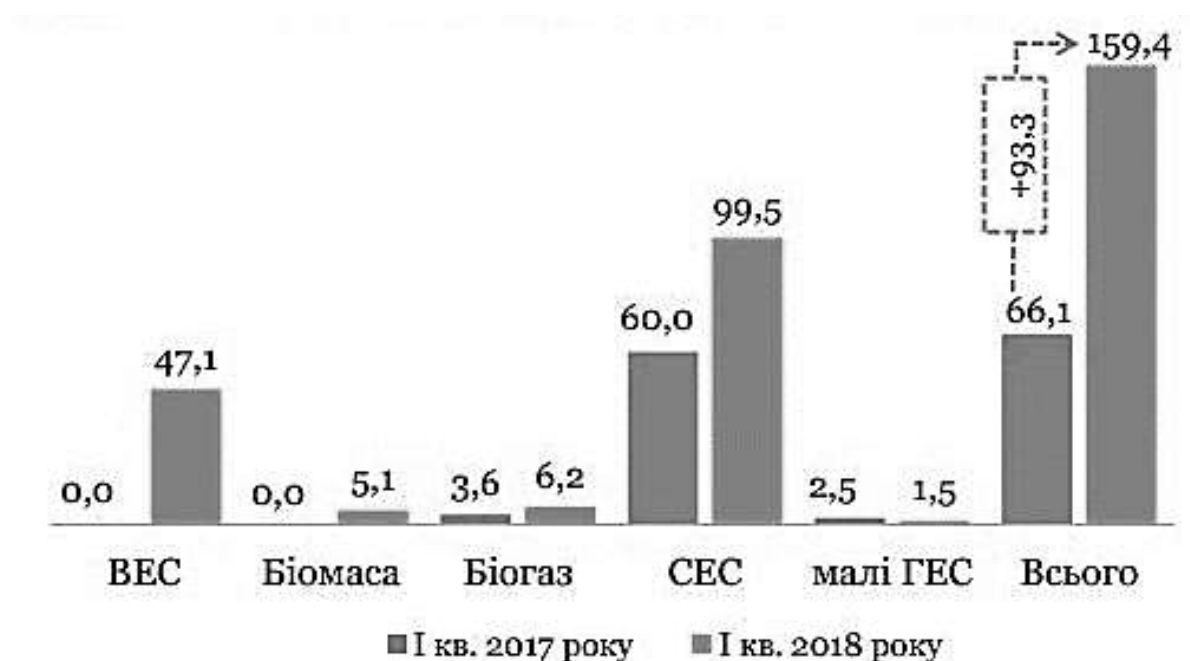


Рисунок 1.1 – Структура потужностей відновлювальних джерел енергії, МВт.

Встановлена потужність об'єктів альтернативних джерел відновлювальної енергетики за I квартал 2018 року зображена на рисунку

1.2. Лідером із введенням в експлуатацію об'єктів ВДЕ виступає Херсонська область, що має найбільший потенціал в сонячній генерації.

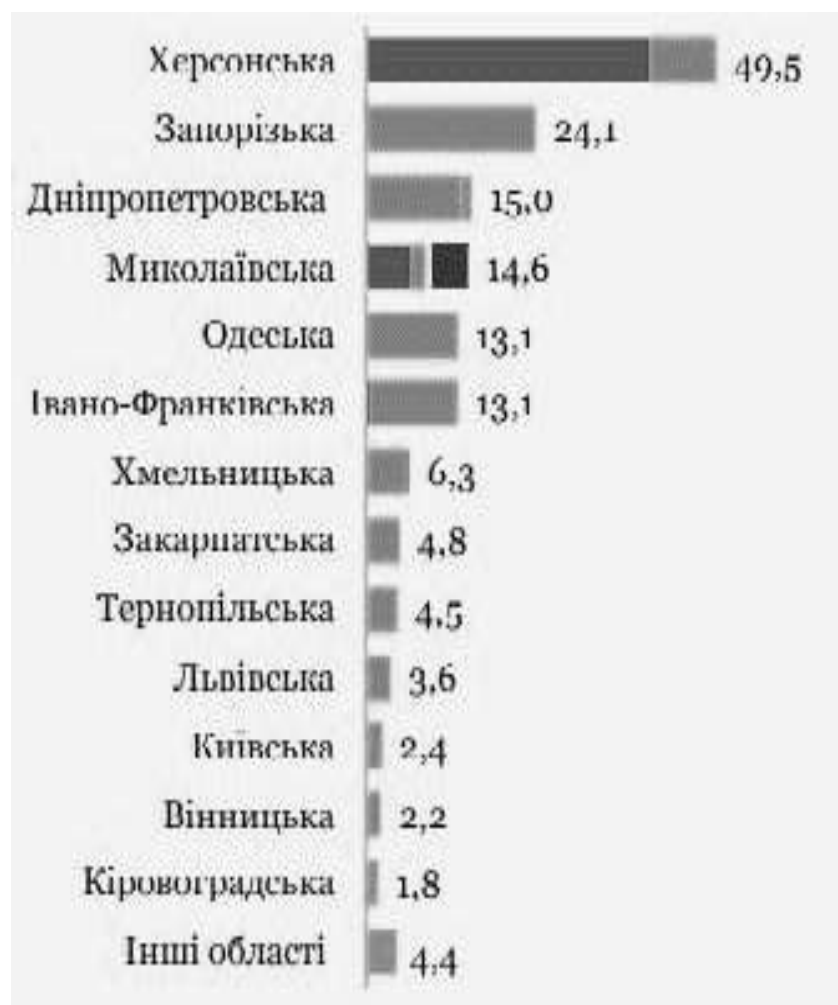


Рисунок 1.2 – Встановлена потужність ВДЕ в Україні, МВт.

Інвестори будівництва СЕС розраховують, що уряд послідовно виконуватиме положення «Енергетичної стратегії України до 2035 року», згідно з якою частка енергетики відновлюваних джерел до 2035 року - 20%.

Превагами сонячних електростанцій у порівнянні з традиційними системами електропостачання її мобільність, вона швидко демонтується і може бути використана у іншому місці [4].

Загальна встановлена потужність альтернативних джерел відновлювальної енергетики в Україні зображена на рисунку 1.3.

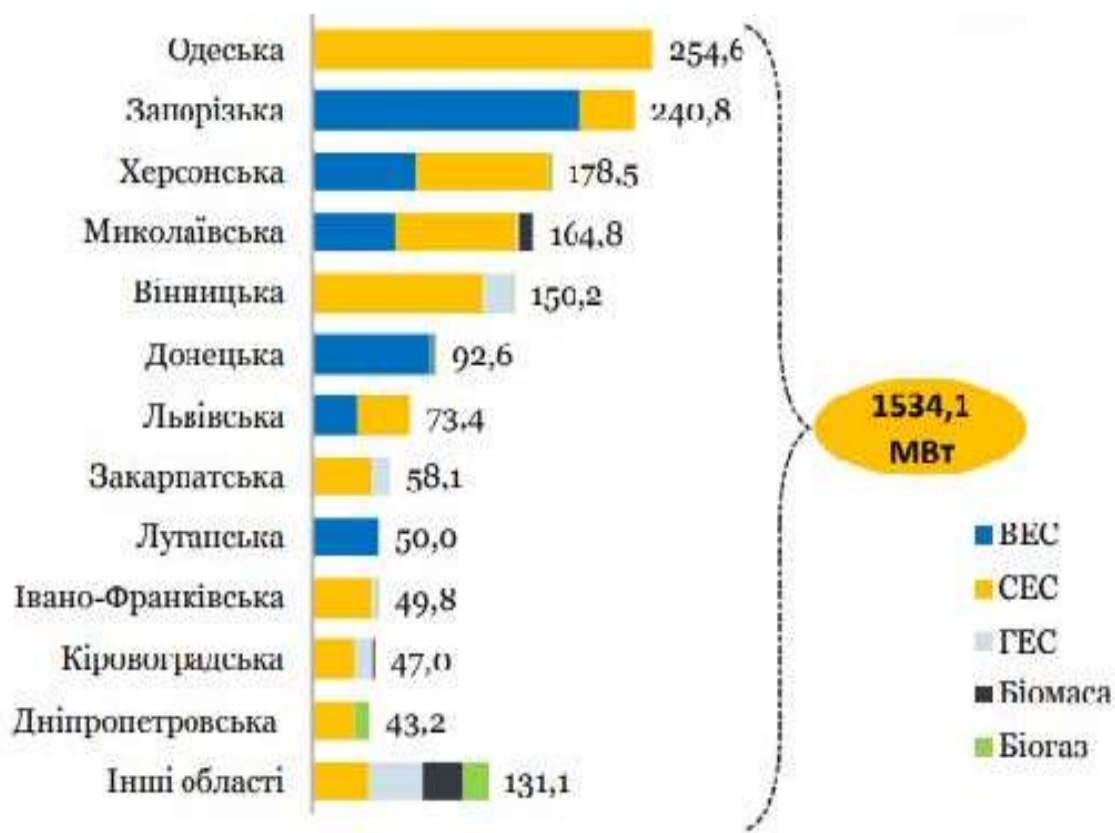


Рисунок 1.3 – Загальна встановлена потужність об'єктів ВДЕ в Україні, МВт.

В Україні проводиться політика розширення застосовування ВДЕ та альтернативних видів палива для підвищення енергетичної незалежності країни від традиційних видів палива. Потенціал нашої країни при поступовому впровадженні положень енергетичної стратегії до 2030 року дозволить збільшити використання відновлюваної енергії на 500% та скоротити споживання природного газу на 15%.

Відомо, що клімат та географічне положення країни сприяють розвитку сонячної енергетики і будівництва СЕС в усіх регіонах України, а потенціал даного напрямку, кращий ніж в більшості європейських регіонів.

В Україні інвестори знайшли сприятливі умови для впровадження джерел альтернативної енергетики:

- 1) непогана ефективність інвестування
- 2) наявність земельних ділянок,
- 3) пільговий тариф,
- 4) державна підтримка
- 5) міждержавна енергетична стратегія.

Хоча частка генерації від ВДЕ має незначне значення в балансі енергосистеми України. З 2014 року спостерігається значне зростання генеруючих потужностей (рисунок 1.4).

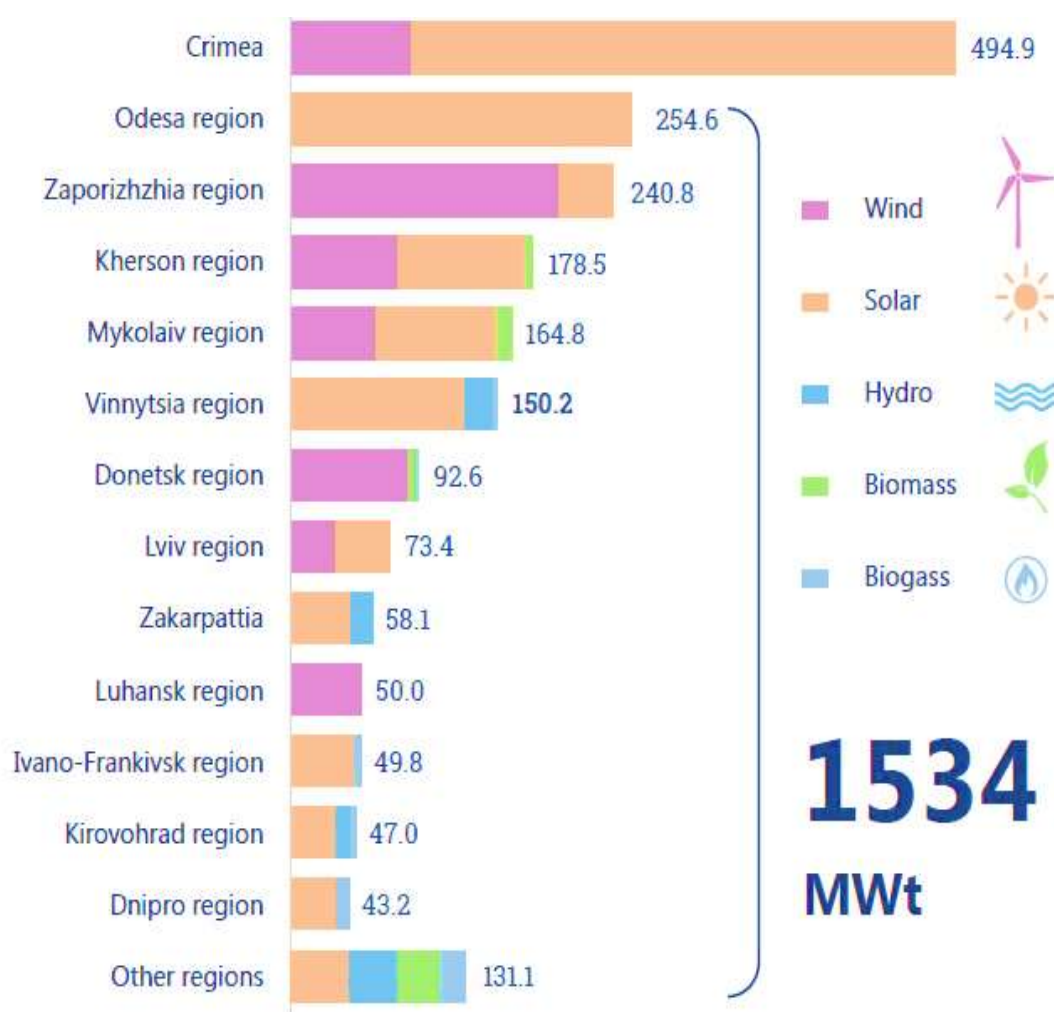


Рисунок 1.4 – Виробництво ВДЕ в Україні в першій чверті 2018 року.

Перспективи розвитку альтернативних джерел, що використовуються енергію сонця заключаються не тільки в генерації електричної енергії.

Розвиток автомобільного електротранспорту вимагає вирішення проблеми електричних автозаправок. Державна політика в розвинених країнах сприяє встановленню джерел сонячної енергетики на всіх доступних поверхнях. В нашій країні існують проблеми встановлення автозаправок з державними та наглядовими організаціями через відсутність відповідних підзаконодавчих актів.

Крім того необхідно враховувати, що потенціал сонячних фотоелектричних в якості джерел гарячого водопостачання погано розвивається в нашій країні через високу вартість та відсутність державної підтримки.

1.2 Аналіз використання відновлювальних джерел сонячної енергії

Відомо, що сонячні фотоелектричні станції призначені для нагрівання теплоносія, а сонячні батареї служать для генерації електричної енергії безпосереднь до електричних мереж або забезпечення навантаження споживачів.

Зрозуміло, що отриману теплову енергію шляхом перетворень можна використати для генерації електричної енергії, в такому випадку коефіцієнт ефективності сонячних колекторів буде ще меншим через втрати при перетворені теплової енергії до електричної. Найбільш доцільним є використання сонячних колекторів у комплексі з тепловими насосами.

Теплові насоси дозволяють ефективно перетворювати теплову та електричну енергію. Асортимент сонячних панелей дуже великий: вони

використовуються, як для мікрогенерації та і для живлення об'єктів в декілька сотень кВт.

Ефективність використання сонячних батарей формують зацікавленість споживачів у широкому їх впровадженню, що на даному етапі стримується зменшенням зацікавленості інвесторів через події в країні та відсутністю державної підтримки.

Ефективність процесів перетворення залежить від електрофізичних параметрів напівпровідникової структури і оптичних параметрів фотогальванічного елементу. Необхідно приділити увагу поняттю фотопровідність, що визначається процесами внутрішнього фотоефекту в напівпровідниках під дією сонячного випромінювання.

На сьогодні відомі декілька способів використання сонячної енергії: фотоелектричний і фототермічний. Фототермічний спосіб перетворення енергії реалізується у сонячному колекторі і використовується для систем гарячого водопостачання та опалення приміщень. Фотоелектричний спосіб виконує перетворення сонячного випромінювання в електричний струм.

Сонячні панелі виконуються на основі кристалів кремнію з певними домішками рідкоземельних металів. Від потреби використання сонячні панелі відрізняються конструктивними рішеннями та вихідною потужністю.

Сонячні панелі за організацією своєї внутрішньої структури класифікуються на:

- 1) Монокристалічні;
- 2) Полікристалічні;
- 3) Аморфні.

Монокристалічні батареї висувають підвищені вимоги до чистоти кристалу кремнію у виробництві напівпровідників. Монокристал отримується з кремнієвого розплаву. Батареї, з монокристалів кремнію,

найбільш енергоефективні і користуються популярністю. ККД монокристалічних батарей лежить в межах 14-17%.

В полікристалічних сонячних панелях процес виробництва полікристалу менш енергоємний та дешевший. Полікристалічні сонячні панелі відрізняються синім забарвленням. ККД полікристалічних панелей лежить в межах 10-12%.

Панелей з аморфного кремнію, що називаються тонкоплівковими мають найпростіший і дешевий метод виготовлення і можуть встановлюватися на будь яку поверхню. Технологія виготовлення панелей з аморфного кремнію впливає на їх ефективність та тривалість служби.

1.3 Теоретичне дослідження кута сонячного випромінювання

Рух Землі навколо Сонця потім відображується очевидним рухом Сонця в еліптичній траєкторії, яка нахилена на 23.45° відносно небесного екватора. Кут між лінією, що з'єднує центри Сонця і Землі, і її проекцією на екваторіальну площину називається кутом схилення Сонця (d). Цей кут дорівнює нулю в позиціях весни (20/21 березня) і осені (22/23 вересня).

Часовий кут дорівнює нулю в сонячний полудень і збільшується на схід. Для спостерігачів з розташуванням на географічній широті w , ця координата визначається вертикальною лінією на ділянці, що перерізує небесну сферу в точках: зеніту і умовної бісектриси, що утворюють кут w з полярною віссю (рисунок 1.5).

Широта (w) точки нашого місцезнаходження - це кут утворений лінією, що по'єднує місце розташування, з центром землі та з проекцією лінії на екваторіальну площину. Земна вісь обертання перетинає земну

поверхню на широті 90° і на широті -90° . Тому наше місцезнаходження на поверхні землі визначається перетином кута довготи і кута широти.

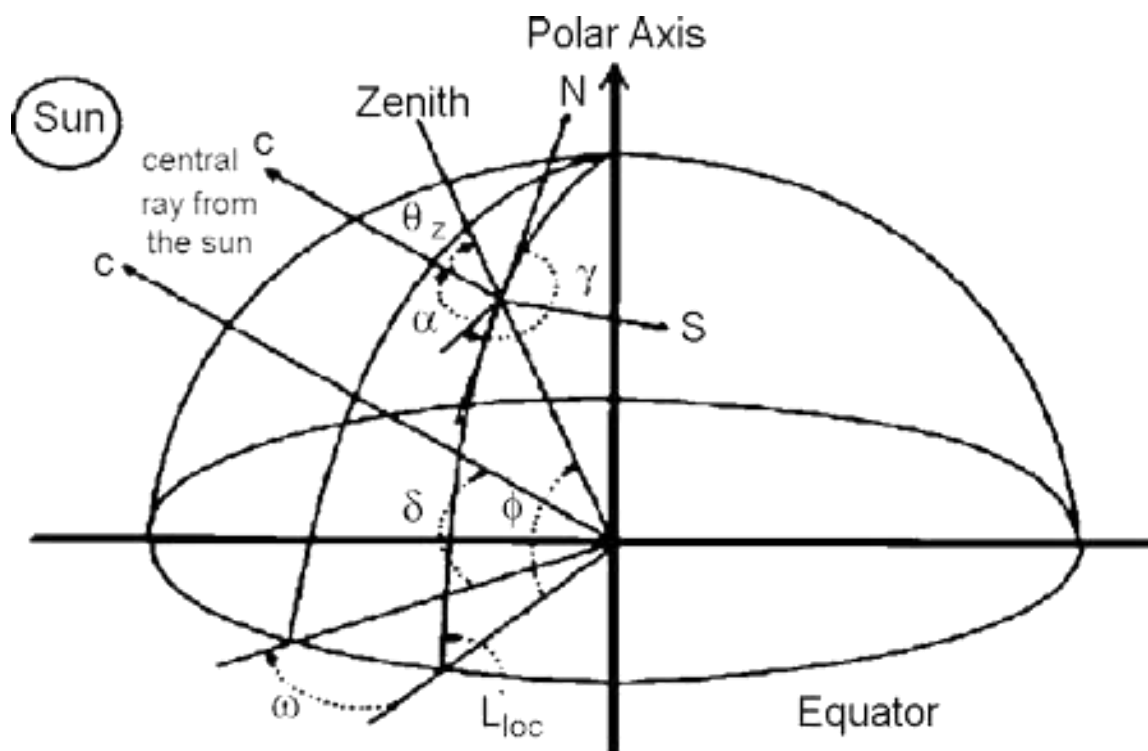


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення сонячних кутів [7].

Дані сонячного випромінювання сформовані для горизонтальних площин, а фотоелектричні панелі розташовують під кутом до горизонтальної площини; тому розрахунок енергії, що надходить до фотоелектричної системи визначається за методикою:

- 1) Використовуються дані дифузного і променевого компонентів опромінення в горизонтальній площині.
- 2) Після аналітичних перетворень дифузного опромінення визначають розсіяне і променеве опромінення в горизонтальній площині.
- 3) Визначають рівень дифузного і променевого опромінення на похилій поверхні сонячної панелі.

Враховуючи відбивну здатність в зоні встановлення панелей визначають - альбедо. Загальне значення добового опромінення для похилої поверхні визначається, як сума трьох складових.

При використанні нерухомих сонячних панелей проекція площі колектора на площину визначається за функцією $\cos$ кута падіння (рисунок 1.6).

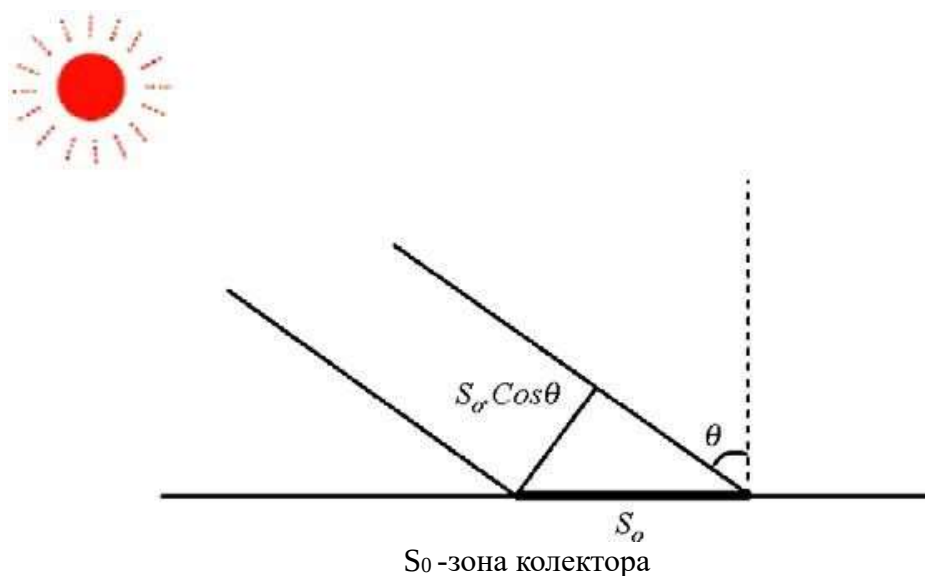


Рисунок 1.6 – Кут падіння сонячного випромінювання [7].

Чим вище кут падіння θ , тим менше генеруюча потужність пенелей.

Для зафіксованого колектора площа проекції в зоні, що орієнтована перпендикулярно до напрямку випромінювання, дорівнює:

$$S = S_0 \times \cos\theta$$

де θ змінюється в інтервалі $(-180^\circ, 180^\circ/2)$ впродовж всього світового дня. Кутова швидкість сонця, дорівнює:

$$\omega = 2\pi / T = 7.27 \times 10^{-5} \text{ рад/с.}; \quad (1.1)$$

звідки диференціал падаючої енергії дорівнює:

$$dW = IS dt. \quad (1.2)$$

Нехтуючи відбивною здатністю атмосфери, згенерована енергія з одного метру квадратного за весь світловий день визначається:

$$W = \int_{-21.6}^{+21.6} I \cdot S_0 \cdot \cos \omega t dt = IS \left[\frac{\sin \omega t}{\omega} \right]_{-21.6}^{+21.6} = \frac{2 \cdot I \cdot S}{\omega} = \quad (1.3)$$

$$= 3.07 \times 10^7 \text{ Вт} \times \text{с} / \text{м}^2 \text{ на добу} = 8,43 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^2 \text{ на добу}.$$

Для колектора з трекерною системою, нехтуючи відбивною здатністю атмосфери, згенерована енергія на одиницю площі панелі протягом світлового дня:

$$W = I \times S_0 \times t = 4,75 \times 10^7 \text{ Вт} \times \text{с} = 13,3 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^2 \text{ в день}$$

Аналіз виконаних розрахунків доводить переваги використання сонячних панелей з трекерною системою, тому що кількість згенерованої енергії в такому випадку на 57% більше ніж в статичних панелях. Дані значення це максимальні теоретичні величини, що можуть бути отримані сонячними панелями для певної широти без врахування впливу атмосфери. Реальна інсоляція на поверхні панелей буде меншою.

На рисунку 1.7 наведена залежність втрати енергії в статичній системі панелей в порівнянні динамічною системою панелей.

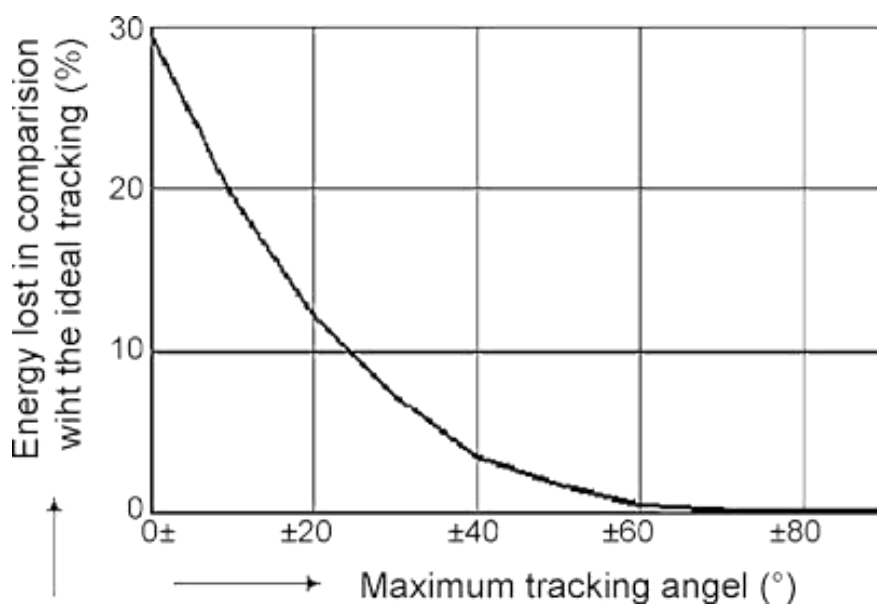


Рисунок 1.7 – Втрати енергії в залежності від усталеного кута відстеження в порівнянні з оптимальним кутом з відстеженням [7].

На рисунку 1.7 показана залежність втрати енергії від усталеного кута відстеження в порівнянні з оптимальним кутом з відстеженням. З рисунку 1.7 видно, що при кутах стеження не менше $\pm 60^\circ$ зростання генерації енергії будуть мінімальні.

1.4 Аналіз методів контролю положення Сонця

За допомогою трекерної системи можна керувати положенням та кутом нахилу сонячних панелей. Регулювання кута нахилу панелей відносно від положення Сонця збільшує їх продуктивність. Підвищення генерації електроенергії в ФЕС, за рахунок трекерних систем значно підвищує капітальні витрати проекту вартість та надійність установки.

Системи відстежування складаються з наступних модулів:

- двигуни трекової системи;
- світлочутливий пристрій;
- лінія резервного електропостачання;

За принципом керування вони поділяються на:

- плавний або ступінчастий переміщення;
- період відстежування.

Системи стеження поділяються на пасивні та активні трекери. Активні трекери системи спостереження для забезпечення найвищої продуктивності повинні враховувати азимутне та широтне переміщення Сонця.

Висновки до розділу 1

Аналіз теоритичних досліджень виявив, що на цей момент існує досить значна кількість способів стеження за положенням сонця та керування кута фотоелектричної батареї. Проте, ще не повністю вирішенні задачі трекерних систем позиціонування.

В роботі розглянуті основні способи позиціонування від точок спостереження для збільшення генерації електроенергії фотоелектричними модулями.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

2.1 Обґрунтування вибору системи керування рухом трекерної системи

Сучасні системи відстежування руху сонячного світила складаються з таких основних модулів:

- 1) двигуни контролю положення сонячних панелей;
- 2) система керування з фоточутливий давачем;
- 3) пристрій аварійного або резервного живлення;

За принципом керування вони поділяються на системи з плавним або ступінчастий переміщення. За принципом контролю вони діляться на системи сезонного та річного відстежування.

В системах пасивних трекерів не потрібне додаткове підведення електричної енергії, тому зміна інтенсивності сонячного випромінювання відбувається природнім шляхом, відповідно електроспоживання трекером буде відсутнє.

Для роботи активних трекерних системи, необхідне підключення для живлення електроприводу і руху опорної рамки. Від положення площини сонячної панелі відносно Сонця залежить її енергоефективність, тому керування її положення потребує пошуку оптимального методу управління.

Для встановлення зв'язків та закономірностей роботи сонячної електростанції з трекерною системою необхідно провести дослідження принципу управління трекеру від фотоелектричних датчиків для гібридної системи керування. При дослідженні буде використаний оптимальний метод керування опорною рамкою панелі для визначення вихідних параметрів і

розрахунку витрат енергії на пересування у порівнянні із нерухомою сонячною панеллю. Для отримання інформації від активної трекерної системи з управлінням за допомогою фотоелектричних датчиків розглянемо її принцип роботи.

Від фотоелектричних датчиків на вхід мікроконтроллера поступає інформація про рівень освітленості, після обробки якої мікроконтролер формує сигнал про необхідне переміщення електродвигуну(ам) трекерної системи, що пов'язані з редукторами. Принцип роботи системи стеження, з фотоелектричними давачами зображений на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Принцип роботи системи стеження з фотоелектричних давачами.

Для коректної роботи трекерної системи за даними показів фотоелектричних датчиків необхідно визначитися з місцем установки фотодавачів та розробити програмудля мікроконтролеру з коректними ваговими коефіцієнтами. Крім того алгоритм програми має забезпечувати високу точність зчитування даних позиціонування.

Правильний вибір місце встановлення фотодавачів має визначати необхідну різницю даних від пар фотоелектричних сенсорів.

В практиці використовується три варіанти встановлення фотоелектричних датчиків. Схема установки фотодавачів наведена на рис. 2.2.

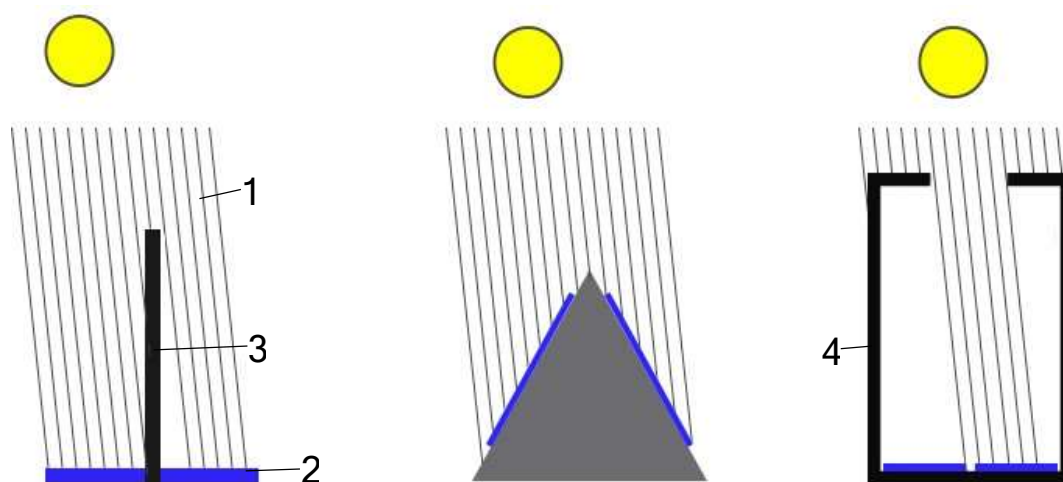
У першому варіанті розташування двох датчиків на одній площині розмежовується затінюючим пристроєм, у випадку виявлення різниці між рівнями освітленості фотодатчиків буде поданий сигнал на корекцію положення фотоелектричної панелі. Коли рівень освітленості фотоелектричних датчиків по обидві сторони від затінюючого пристрою вирівнюється буде поданий сигнал на відключення трекеру.

В Другий варіант установки різниця рівня освітленості забезпечується давачами на двох гранях трикутної призми або чотирьох для піраміди з квадратом в основі.

Третій варіант установки характеризується найбільшою точністю вимірювання освітленості. Але, вимагає використання досить високоточних давачів та потребує використання коліматорної трубки.

«Коліматорна трубка - цей пристрій, який має в центрі вузький проріз, який обмежує попадання на датчики відбитих і заломлених сонячних променів і пропускає тільки прямі сонячні промені» [14].

Визначення положення Сонця таким чином застосовується рідко, тому що вимагає додаткових витрат на системц контролю.



1 - сонячні промені; 2 - фотоелектричні датчики; 3 - затінюючий пристрій;
4 - коліаторна трубка.

Рисунок 2.2 – Схема розташування фотоелектричних датчиків на ФЕС:

Аналіз принципів роботи фотоелектричних станцій з трекерною системою контролю положення панелей показав, що даний підход має певні і переваги у порівнянні з пасивними системами.

Орієнтація робочої площини панелі за Сонцем дозволяє отримати максимальний рівень генерації електричної енергії за умови сонячної погоди.

В Україні третина днів у рік бувають мінливими або похмурими та хмарними. За таких умов фотодавачі трекерної системи будуть мати значну похибку вимірювання рівня освітленості, тому що будуть вимірювати відбиту та розсіяну освітленість. За мінливої погоди під час постійного руху хмар фотодавачі будуть часто проводити корекцію панелей в залежності від затінення ними Сонця, що також буде приводити до помилки при вимірюванні рівня освітленості та перевитрат електричної енергії в трекерній системі

2.2 Аналіз технічних характеристик елементів трекерної системи.

Аналіз методів керуванням положенням сонячних панелей виконаємо вибір елементів для системи керування.

Аналіз значень керуючих впливів дає можливість обрати плату керування для реалізації нашого методу стеження з мікроконтролером.

Промисловістю випускається багато варіантів плат керування, а саме Arduino Nano, Mega, UNO , DUE. Для практичної реалізації нашого методу використано Arduino UNO.

Зовнішній вид плати керування приведено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Плата керування в модифікації UNO

Після вибору контролеру необхідно обрати інші компоненти системи сонячного трекера.

Для руху рами в горизонтальній і вертикальній площинах приймаємо сервоприводи, від потужності світла, що падає на фотодавач змінюється положення куту повороту.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд сервопривод

Для відстеження рівня сонячного випромінювання використовуємо 4 фоторезистора типу LDS 30K.

На рисунку 2.5. зображена макет схеми для підключення системи керування.

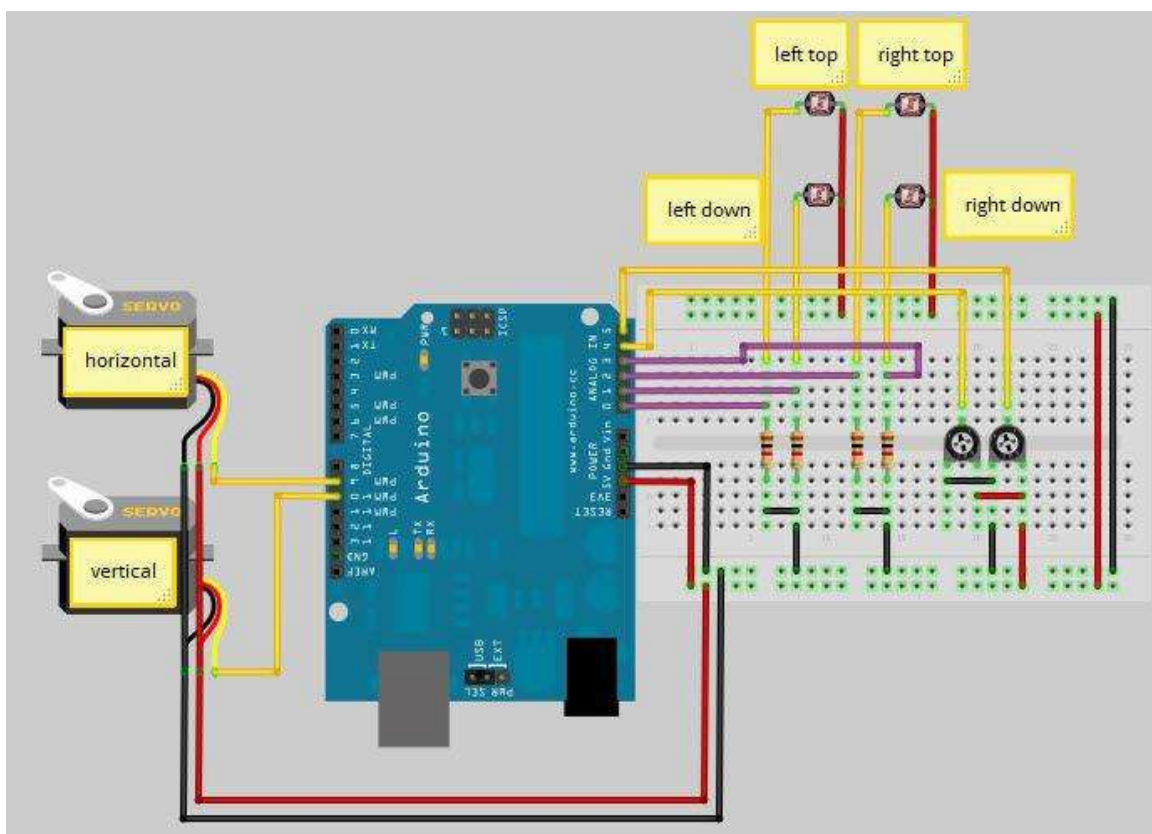


Рисунок 2.5. Схема макету підключення компонентів системи керування

Для обраної схеми підключення компонентів системи керування, обираємо модуль живлення типу AMS-47-0501000FV для постійного струму. Принципова схема підключення логіки елементів наведено на рисунку 2.6.

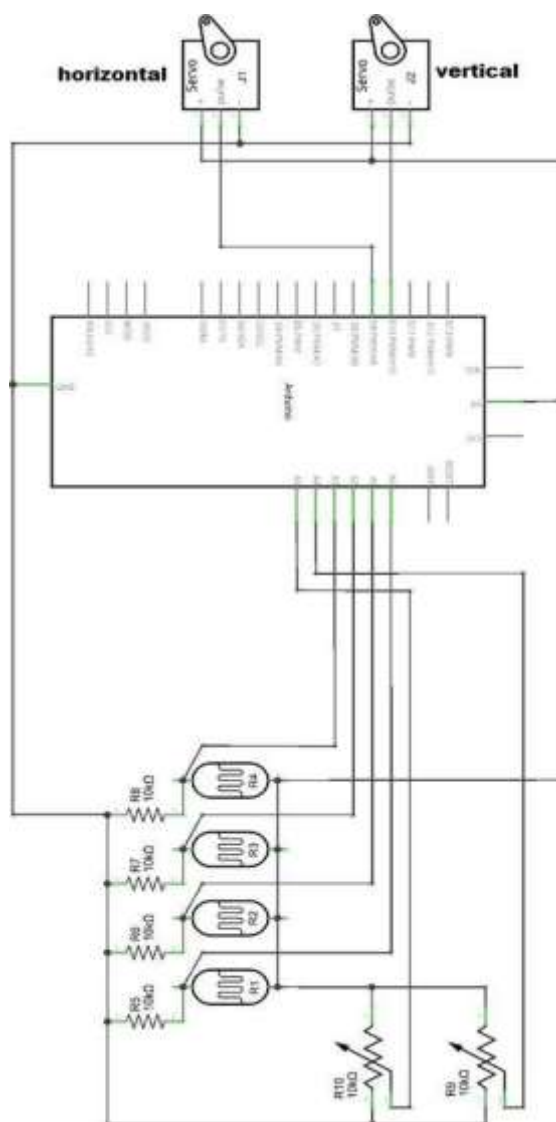


Рисунок 2.6 – Принципова схема підключення логіки елементів

На наступному етапі виконується монтаж всіх компмонентів.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі були розглянуті різновиди трекерних системи та вимоги до них. Запроновані алгоритми керування потужністю ФЕС за допомогою трекерних систем з гібридним регулюванням.

Проведено аналіз ефективності трекерних систем, що працюють за заданим алгоритмом, який залежить від положення Сонця на небосхилі.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ПАНЕЛЕЙ

3.1. Розрахунок річної генерації ФЕС з пасивним керування

В роботі проведено оцінку ефективності системи стеження за рухом Сонця зрівнюючи кількість вихідної енергії отриманої від активної трекерної системи з кількістю енергії отриманої від пасивної фотоелектричної системи. Окремо контролювалась кількість енергії, спожита системами орієнтації наглядного майданчика.

3.1.1. Опис технічних характеристик елементів ФЕС

Для визначення витрат енергії в фотоелектричній станції з трекером, задамо параметри параметрами трекеру.

Таблиця 3.1 – Параметри трекеру

Максимальна площа установки сонячних панелей	60м ²
Потужність механізмів нахилу панелей типу HFG-L	360Вт
Потужність механізмів нахилу панелей SL95	450Вт
Точність позиціонування	0.3°

Вибираємо сонячні панелі, які керуватися трекерною системою. Для розрахунку роботи ФЕС виберемо сонячні панелі типу JKM250P, технічні параметри яких наведені в таблиці. 3.2

Таблиця 3.2 – Параметри сонячної панелі Jinko Solar JKM250P

Тип кристалу	Монокристал, 156x156мм
Габаритні розміри	1650x992x45мм
ККД	15,27%
Максимальна напруга ланцюга	1000В
Максимальна потужність	250Вт
Максимальний струм в ланцюзі	15А
Напруга при максимальній потужності	30,6В
Напруга холостого ходу	37,6В
Робоча температура	-40°C – +85°C
Струм короткого замикання	8,7А
Струм при максимальній потужності	8,17А
Температурний коефіцієнт потужності	-0,43%/°C

Розрахунок виконується для координат 49°54' північних широти, 36°15' східної довготи (Україна, Кіровоградська область, м. Кропивницький).

3.1.2. Розрахунок річної генерації ФЕС

Визначимо кількість енергії, що отримаємо від сонячної електростанції без регулювання кута положення панелей. Враховуючи втрати сонячного випромінювання через затінення атмосфери визначимо кількість сонячної енергії, від фотоелектричних панелей за один рік. Усереднене річне значення кута нахилу для нашої місцевості, з урахуванням орієнтації роботи системи є кут рівний 38°.

Річна кількість згенерованої фотоелектричною станцією сонячної енергії визначається за формулою:

$$E_{\text{год}} = \sum_1^{365} W_i \cdot S \cdot \eta_{inv}; \quad (3.1)$$

де, W_i – кількість виробленої енергії з 1 м^2 поверхні панелі;

S – загальна площа сонячної станції.

Загальна ефективна площа сонячної станції визначається таким чином:

$$S = N_m \cdot N_c \cdot S_c; \quad (3.2)$$

де, N_m – кількість сонячних панелей; N_c – кількість фотоелектричних кристалів на одному модулі в даному випадку 60; S_c – площа одного фотоелектричного кристалу

$$S_c = 0,156 \cdot 0,156 = 0,024 \text{ (м}^2\text{)}. \quad (3.3)$$

Необхідна кількість панелей на ФЕС визначається із можливості обслуговування площі зайнятої фотоелектричними панелями. Максимальна площа обслуговування трекерною системою становить 60 м^2 .

Площа, що зайнята однією сонячною панеллю:

$$S_{\pi} = 1,65 \cdot 0,992 = 1,64 \text{ (м}^2\text{)}. \quad (3.4)$$

Звідки, кількість сонячних панелей встановлених на ФЕС:

$$N_m = 60/1,64 = 36,58 \approx 36 \text{ модулів}. \quad (3.5)$$

Визначаємо ефективну робочу площу ФЕС, м^2 :

$$S = 36 \cdot 60 \cdot 0,024 = 51,84 \quad (3.6)$$

Згенерована продовж світлового дня енергія з 1 м^2 похилої поверхні, панелі визначається за формулою:

$$W_i = E_i \cdot \eta_m; \quad (3.7)$$

де, E_i – денна кількість сонячної енергії з 1 м^2 панелі; η_m – ККД сонячної панелі.

Сонячна інсоляція на 1 м^2 поверхні панелі визначається за формулою:

$$E_i = \frac{E_{\text{гор}}}{\sin \alpha_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta); \quad (3.8)$$

де, $E_{\text{гор}}$ – денне значення енергії з 1 м^2 горизонтальної поверхні панелі, α_i – кут азимуту Сонця, β – кут нахилу сонячної панелі.

Щоденні значення середньодобової інсоляції за рік сформована за інформацією NASA. Таблиця значень для розрахунку наведена таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Фрагмент бази даних добової інсоляції в січні місяці

Порядковий номер дня	Дата	Сонячна інсоляція, Вт*год
1	01.01.2022	867,81
2	02.01.2022	862,5
3	03.01.2022	866,56
4	04.01.2022	1034,06
5	05.01.2022	864,69
6	06.01.2022	990,31
7	07.01.2022	977,5
8	08.01.2022	883,13
9	09.01.2022	953,13
10	10.01.2022	924,69
11	11.01.2022	1021,56
12	12.01.2022	986,56
13	13.01.2022	1096,56

Продовження таблиці 3.3.

Порядковий номер дня	Дата	Сонячна інсоляція, Вт*год
14	14.01.2022	1090,94
15	15.01.2022	1094,38
16	16.01.2022	999,06
17	17.01.2022	1177,81
18	18.01.2022	1153,75
19	19.01.2022	1118,13
20	20.01.2022	1198,44
21	21.01.2022	1040,31
22	22.01.2022	1240
23	23.01.2022	1176,88
24	24.01.2022	1249,69
25	25.01.2022	1345
26	26.01.2022	1237,19
27	27.01.2022	1320
28	28.01.2022	1382,19
29	29.01.2022	1213,13
30	30.01.2022	1502,5

Результати розрахунку згенерованої сонячної енергії з 1м² панелі під кутом 38° наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результатами розрахунку сонячної енергії з 1м² похилої панелі в січні

Порядковий номер дня	Дата	Сонячна інсоляція, Вт*год
1	01.01.2022	2150,5
2	02.01.2022	2117,76
3	03.01.2022	2108,48
4	04.01.2022	2493,55
5	05.01.2022	2066,7
6	06.01.2022	2346,3
7	07.01.2022	2295,96
8	08.01.2022	2056,6
9	09.01.2022	2200,89
10	10.01.2022	2066,7
11	11.01.2022	2346,3
12	12.01.2022	2295,96

Продовження таблиці 3.3.

Порядковий номер дня	Дата	Сонячна інсоляція, Вт*год
13	13.01.2022	2056,6
14	14.01.2022	2200,89
15	15.01.2022	2117,42
16	16.01.2022	2319,96
17	17.01.2022	2222,2
18	18.01.2022	2450,04
19	19.01.2022	2418,01
20	20.01.2022	2406,46
21	21.01.2022	2179,7
22	22.01.2022	2549,8
23	23.01.2022	2478,58
24	24.01.2022	2383,83
25	25.01.2022	2535,87
26	26.01.2022	2184,91
27	27.01.2022	2585,13
28	28.01.2022	2435,63
29	29.01.2022	2567,64
30	30.01.2022	2743,69
31	31.01.2022	2622,33

Кількість згенерованої електричної енергії з 1м² сонячною панеллю зв світловий день першого січня:

$$W_i = 2150,5 \cdot 0,1527 = 328,38 \text{ (Вт} \cdot \text{год)}; \quad (3.9)$$

В таблиці 3.5 приведені результати розрахунку кількості згенерованої енергії з 1м² сонячної панелі з урахуванням ККД.

Таблиця 3.5 – Кількості згенерованої енергії з 1м² сонячної панелі у січні з врахуванням ККД

Порядковий номер дня	Дата	Електроенергія, Вт*год
1	01.01.2022	328,38
2	02.01.2022	323,38

Продовження таблиці 3.5

Порядковий номер дня	Дата	Електроенергія, Вт*год
3	03.01.2022	321,96
4	04.01.2022	380,77
5	05.01.2022	315,59
6	06.01.2022	358,28
7	07.01.2022	350,59
8	08.01.2022	314,04
9	09.01.2022	336,08
10	10.01.2022	323,33
11	11.01.2022	354,26
12	12.01.2022	339,33
13	13.01.2022	374,12
14	14.01.2022	369,23
15	15.01.2022	367,47
16	16.01.2022	332,84
17	17.01.2022	389,35
18	18.01.2022	378,48
19	19.01.2022	364,01
20	20.01.2022	387,23
21	21.01.2022	333,64
22	22.01.2022	394,75
23	23.01.2022	371,92
24	24.01.2022	392,08
25	25.01.2022	418,96
26	26.01.2022	382,65
27	27.01.2022	405,39
28	28.01.2022	421,53
29	29.01.2022	367,42
30	30.01.2022	451,95
31	31.01.2022	400,43

Визначимо кількість згенерованої енергії усіма панелями на ФЕС:

$$E_d = W_i \cdot S \quad (3.10)$$

$$E_d = 328,38 \cdot 51,84 = 17023,22 \text{ (Вт}\cdot\text{год)} = 17,02 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Для визначення загальної кількості енергії, що генерує ФЕС з урахуванням втрат у провідниках та інверторі проведемо вибір інвертора для ФЕС. Рівень втрат у провідниках приймемо орієнтовно близько 1%.

Для ФЕС виберемо інвертор марки SMA9000TLU-208, технічні характеристики якого наведені в таблиці. 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічні параметри інвертора

Параметри	Значення
Номінальна потужність	9000Вт
ККД	98%
Коефіцієнт потужності	1
Максимальна напруга на вході	600В
Максимальний вихідний струм	43,3А
Максимальний струм на вході	31А
Номінальна напруга на виході	183 – 229 В

Денна генерація електричної енергії ФЕС з урахуванням втрат в провідниках та інверторі визначається:

$$E_{\text{день}} = E_{\text{д}} \cdot 0,99 \cdot 0,98 \quad (3.11)$$

для 01.01. 2022:

$$E_{\text{день}} = 17,02 \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 16,51 \text{ кВт год.}$$

Результати розрахунку річної кількості енергії згенерованої ФЕС наведені в таблиці в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Річна генерація від ФЕС

Розрахунковий місяц	Кількість енергії, кВт·год
Січень	570,76
Лютий	781,75
Березень	1090,2
Квітень	1249,3
Травень	1541,2
Червень	1387,2
Липень	1574,9
Серпень	1600,8
Вересень	1265,9
Жовтень	933,64
Листопад	564,54
Грудень	559,87
За рік	13120,19

3.2. Розрахунок річних втрат в трекерній системі

За результатами попереднього моделювання для ФЕС визначено кількість сонячних панелей 36 улаштовані на площі 60 м², встановлених єдиній поворотній платформі забезпечують річну генерацію електричної енергії в обсязі 13,2 МВт·год. Розрахунок генерації енергії фотоелектричною станцією з трекерною системою, за допомогою програми PVsyst. В результаті розрахунку, для аналогічного обладнання отримане значення річної генерації електричної енергії, якн становить 11,47 МВт·год.

Для визначення кількості енергії визначемо кількість включень приводних електродвигунів. Для цього визначимо кількість необхідних включень електроприводу для встановлення правильного кута нахилу панелей для проміжку часу за який Сонце змінює кут висоти на 1°.

Кути до азимуту Сонця над горизонтом для широти 38° наведені таблиці 3.8 [40].

Таблиця 3.8 – Кути висоти Сонця для широти 88° для обраних дат.

Весняне рівнодення	20 березня 2022	79 день	42°
Літнє сонцестояння	21 червня 2022	171 день	$65,5^\circ$
Осіннє рівнодення	22 вересня 2022	264 день	41°
Зимове сонцестояння	21 грудня 2022	355 день	$18,5^\circ$

Розрахуємо значення зміни кута сонця за один день:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_{\text{лс}} - \alpha_{\text{вд}}}{N_{\text{лс}} - N_{\text{вд}}} = \frac{65,5^\circ - 42^\circ}{171 - 79} = 0,25^\circ/\text{день}. \quad (3.13)$$

Звідки, встановили, що кут руху Сонця над горизонтом змінюється на 1° раз за чотири 4 дні.

Визначимо проміжок часу, за який азимутний кут буде змінюватися на 1° . Планета Земля здійснює один оберт навколо своєї вісі за 24 години. Звідки азимутний кут можна визначити за формулою:

$$\Delta\gamma = \frac{360^\circ}{24 \cdot 60\text{мин}} = 0,25^\circ/\text{мин}. \quad (3.14)$$

Визначимо кількість включень електроприводу для визначення кута повороту фотодавачів кожного дня. Максимальної рівня точності орієнтування можна отримати при безперервному стеженні за Сонцем, але це практично недоцільно.

Визначимо потрібне число обертів електроприводу за хвилину:

$$n = \frac{1\text{об.}}{24 \cdot 60\text{мин}} = 0,000694 \text{ об/мин} = 6,94 \cdot 10^{-4} \text{ об/мин}. \quad (3.15)$$

За технічними характеристиками трекерної системи встановимо умови роботи електроприводу трекерної системи. Кут поворотного пристрою обмежений кутами 15° і 345° , то один оборот відповідає $345^\circ - 15^\circ = 330^\circ$.

Мінімальна кутова швидкість за рахунок частотного регулювання становить 0,1 об/хв. Використовуючи обрану трекерну систему неможливо забезпечити безперервне зміну кута, тому для точності позиціонування в 1° електроприводу достатньо вмикатися через кожні чотири хвилини. і Тривалість роботи електроприводу складе:

$$t_{\text{пр}} = \frac{60\text{с}}{330^\circ \cdot 0,1} = 1,8\text{с.} \quad (3.16)$$

Точність переміщення на рівні $< 0,3$ контролюється датчиком Холу.

Довжина світлового дня для обраної місцевості наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Довжина світлового дня в січні.

Розрахункова дата	Схід сонця	Захід сонця	Тривалість дня
01.01.2022	7:32	15:56	8 г. 24 хв.
02.01.2022	7:32	15:57	8 г. 25 хв.
03.01.2022	7:32	15:58	8 г. 26 хв.
04.01.2022	7:32	15:59	8 г. 27 хв.
05.01.2022	7:32	16:00	8 г. 28 хв.
06.01.2022	7:31	16:01	8 г. 30 хв.
07.01.2022	7:31	16:02	8 г. 31 хв.
08.01.2022	7:31	16:03	8 г. 32 хв.
09.01.2022	7:30	16:05	8 г. 35 хв.
10.01.2022	7:30	16:06	8 г. 36 хв.
11.01.2022	7:29	16:07	8 г. 38 хв.
12.01.2022	7:29	16:09	8 г. 40 хв.

Продовження таблиці 3.9

Розрахункова дата	Схід сонця	Захід сонця	Тривалість дня
13.01.2022	7:28	16:10	8 г. 42 хв.
14.01.2022	7:28	16:11	8 г. 43 хв.
15.01.2022	7:27	16:13	8 г. 46 хв.
16.01.2022	7:26	16:14	8 г. 48 хв.
17.01.2022	7:25	16:15	8 г. 50 хв.
18.01.2022	7:25	16:17	8 г. 52 хв.
19.01.2022	7:24	16:18	8 г. 54 хв.
20.01.2022	7:23	16:20	8 г. 57 хв.
21.01.2022	7:22	16:21	8 г. 59 хв.
22.01.2022	7:21	16:23	9 г. 2 хв.
23.01.2022	7:20	16:24	9 г. 4 хв.
24.01.2022	7:19	16:26	9 г. 7 хв.
25.01.2022	7:18	16:28	9 г. 10 хв.
26.01.2022	7:17	16:29	9 г. 12 хв.
27.01.2022	7:16	16:31	9 г. 15 хв.
28.01.2022	7:14	16:32	9 г. 18 хв.
29.01.2022	7:13	16:34	9 г. 21 хв.
30.01.2022	7:12	16:35	9 г. 23 хв.
31.01.2022	7:10	16:37	9 г. 27 хв.

Визначимо кількість включень поворотного приводу 01.01.2022:

$$n_{\text{вкл}} = \frac{8 \cdot 60 + 24}{4} = 126 \text{ включень.} \quad (3.17)$$

Результати розрахунку втрат електроенергії від включень поворотного приводу наведені в таблиці 3.10

Таблиця 3.10 – Розрахунку втрат електроенергії електроприводу поворотного блоку

Розрахункова дата	Кількість включень за день	Витрачено енергії, Вт*год
01.01.2022	126	100,8
02.01.2022	126	100,8
03.01.2022	126	100,8
04.01.2022	126	100,8
05.01.2022	127	101,6
06.01.2022	127	101,6
07.01.2022	127	101,6
08.01.2022	128	102,4
09.01.2022	128	102,4
10.01.2022	129	103,2
11.01.2022	129	103,2
12.01.2022	130	104
13.01.2022	130	104
14.01.2022	130	104
15.01.2022	131	104,8
16.01.2022	132	105,6
17.01.2022	132	105,6
18.01.2022	133	106,4
19.01.2022	133	106,4
20.01.2022	134	107,2
21.01.2022	128	107,4
22.01.2022	128	107,4
23.01.2022	129	108,2
24.01.2022	129	108,2
25.01.2022	130	109
26.01.2022	130	109
27.01.2022	130	109
28.01.2022	131	109,8

Продовження таблиці 3.10

Розрахункова дата	Кількість включень за день	Витрачено енергії, Вт*год
29.01.2022	132	110,6
30.01.2022	132	110,6
31.01.2022	133	111,4

3.3. Розрахунок річних втрат енергії на орієнтацію фотодавачів

Кількість енергії, витраченої на орієнтацію стежачого майданчика за рік :

$$E_{\text{зат}} = E_{\text{пов}} + E_{\text{нах}}; \quad (3.18)$$

де, $E_{\text{пов}}$ – річна енергія, що споживається поворотним пристроєм, $E_{\text{нах}}$ – річна енергія спожита пристроєм регулювання кута панелі.

$$E_{\text{пов}} = \sum_1^{365} E_{\text{пов}_i} = 54,76 \text{ кВт} \cdot \text{г};$$

$$E_{\text{нах}} = \sum_1^n E_{\text{нах}_i} = 92 \text{ Вт} \cdot \text{г};$$

$$E_{\text{зат}} = 54,85 \text{ кВт} \cdot \text{г};$$

Для зменшення витрат електроенергії в трекерній системі достатньо зменшити кількість включень електроприводу поворотного пристрою, що в свою чергу вплине на точність позиціонування панелей.

Приведемо розрахунок втрат електроенергії для наступних значень точності позиціонування: 1° , 2° , 5° і 10° .

Результати розрахунку втрат електроенергії в трекерній системі ФЕС наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Кількість спожитої енергії на позиціонування панелей

Річні втрати енергії при точності 1°, кВт·год	Річні втрати енергії при точності 2°, кВт·год	Річні втрати енергії при точності 5°, кВт·год	Річні втрати енергії при точності 10°, кВт·год
54,85	34,68	21,18	16,98

Результати розрахунку спожитої енергії ФЕС з точністю позиціонування 10° складає 98,5% від спожитої енергії ФЕС з точністю позиціонування 1°. Розрахунки річної генерації від ФЕС з точністю стеження 10° становить 15,55 МВт·год; для 5° - 15,67 МВт·год; для 2° - 15,74 МВт·год.

Для порівняння енергетичної ефективності алгоритмів з різною точністю позиціонування, частка спожитої енергії відносно некерованої ФЕС визначається:

$$k = \frac{E_{\text{зат}}}{E_{\text{т}} - E_{\text{с}}} \cdot 100\%;$$

для ФЕС з точністю позиціонування панелей 1°:

$$k = \frac{54,85}{(15,79 - 11,47) \cdot 1000} \cdot 100\% = 1,27\%;$$

для ФЕС з точністю позиціонування панелей 2°:

$$k = \frac{34,68}{(15,74 - 11,47) \cdot 1000} \cdot 100\% = 0,81\%;$$

для ФЕС з точністю позиціонування панелей 5°:

$$k = \frac{21,18}{(15,67 - 11,47) \cdot 1000} \cdot 100\% = 0,5\%;$$

для станції з точністю позиціонування 10°:

$$k = \frac{16,98}{(15,55 - 11,47) \cdot 1000} \cdot 100\% = 0,42\%.$$

Висновки до розділу 3

Аналіз енергетичної ефективності роботи ФЕС вказує, що з меншим кроком позиціонування система буде мати кращі показники.

Енергетична ефективність роботи ФЕС для кожного типу сонячних панелей відрізняється робочими умовами керування трекерної системи. Результати моделювання довели, що точність позиціонування обмежена 10° для монокристалічних і 30° для полікристалічних панелей і панелей з аморфного кремнію.

При виборі алгоритму в реальних умовах варто користуватися показниками енергетичної ефективності роботи ФЕС та результатами техніко економічного порівняння.

Розділ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

Критерії техніко-економічної оптимізації відображають економічні аспекти будови та експлуатації енергоустановок.

До критеріїв, що притамінні більш узагальненим показникам відносяться річний економічний ефект, розрахункові витрати, або термін окупності.

Показниками роботи енергетичних установок, є питомі капіталовкладення та експлуатаційні витрати.

4.1. Екологічна складова оцінки ефективності проектів

Аналіз проектів часто відбувається без економічної оцінки екологічних наслідків. Причина цього відсутність зручних способів визначення збитку, який наноситься природі та його вплив на економічну ефективність проекту.

Екологічною складовою оцінки проекту, як правило є економічний збиток від забруднення навколишнього середовища.

Використовуються різні підходи до оцінки екологічного збитку:

- збиток життя і здоров'ю оцінюється за витратами на лікування та втратами доходу;
- втрати, виснаження природних ресурсів оцінюється вартістю рекультиваційних робіт;
- пошкодження майна оцінюється його ринковою вартістю;

Під оцінкою ефективності з позиції екологічної складової розуміють розрахунок екологізованих показників ефективності проекту.

Оцінкою екологічної ефективності є розрахунок показника ефективності природоохоронних капіталовкладень.

4.2. Методика розрахунку екологічної складової приведених витрат

Виходячи з вищенаведеного екологічна складова річних експлуатаційних витрат визначається за формулою :

$$З = 0,1992 \cdot K + I_{\text{пал}} + 1,2 \cdot I_{\text{зп}} + I_{\text{екол}} \quad (4.1)$$

$$I_{\text{екол}} = P_{\text{кн}} + P_{\text{вик}} + P_{\text{очищ}} + P_{\text{кис}} \quad (4.2)$$

де $P_{\text{кн}}$ – вартість користування природними надрами; $P_{\text{вик}}$ – вартість за викиди; $P_{\text{очищ}}$ – вартість за відновлення; $P_{\text{кис}}$ – вартість за використання кисню.

Розрахунок оплати за користування природними надрами визначається за формулою:

$$P_{\text{кн}} = V_{\text{ф}} \cdot C_{\text{кн}} \cdot K_{\text{пп}}, \quad (4.3)$$

де $V_{\text{ф}}$ – об'єм видобутих природних корисних копалин, т; $C_{\text{кн}}$ – величина встановленої плати за користування природними надрами, грн./т; $K_{\text{пп}}$ – коригуючий коефіцієнт в залежності від виду палива.

Сума податку за фактичний обсяг викидів та ставок податку за формулою:

$$P_{\text{вик}} = M_i \cdot N_{\text{пі}}, \quad (4.4)$$

де $P_{\text{вик}}$ – розмір податку за обсяги викидів, грн.; M_i – об'єми викидів забруднюючої речовини, т; $N_{\text{пі}}$ – ставка податку за обсяги викидів, грн./т.

Згідно Кіотського протоколу за викиди парникових газів (CO_2) треба платити ставку у розмірі 15-17 євро за 1 тону CO_2 . При виборі варіантів враховувати ціну за викиди згідно Кіотському протоколу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз теоритичних досліджень виявив, що на цей момент існує досить значна кількість способів стеження за положенням сонця та керування кута фотоелектричної батареї. Проте, ще не повністю вирішенні задачі трекерних систем позиціонування.

В роботі розглянуті основні способи позиціонування від точок спостереження для збільшення генерації електроенергії фотоелектричними модулями.

У цьому розділі були розглянуті різновиди трекерних системи та вимоги до них. Запроновані алгоритми керування потужністю ФЕС за допомогою трекерних систем з гібридним регулюванням.

Проведено аналіз ефективності трекерних систем, що працюють за заданим алгоритмом, який залежить від положення Сонця на небосхилі.

Аналіз енергетичної ефективності роботи ФЕС вказує, що з меншим кроком позиціонування система буде мати кращі показники.

Енергетична ефективність роботи ФЕС для кожного типу сонячних панелей відрізняється робочими умовами керування трекерної системи. Результати моделювання довели, що точність позиціонування обмежена 10° для монокристалічних і 30° для полікристалічних панелей і панелей з аморфного кремнію.

При виборі алгоритму в реальних умовах варто користуватися показниками енергетичної ефективності роботи ФЕС та результатами техніко економічного порівняння.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про національний план дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.
2. California Institute of Technology. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization; April 18–21, 2005.
3. Markvart T.. Solar electricity, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
4. Khlaichom P., Sonthipermpon K.. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; 2006.
5. Walraven R.. Calculating the position of the sun. Solar Energy 1977;20:393
6. Roth P., Georgiev A., Boudinov H.. Cheap two-axis sun following device. Energy Conversion and Management 2005;46:1179–92.
7. Should you install a solar tracker? [Электронный ресурс] // Tracstar - Режим доступа: <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.
8. Tomson T.. Discrete two-positional tracking of solar collectors. Renewable Energy 2008;33:400–5.
9. Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M.. A programmable logic controller to control two axis sun tracking system. Information Technology Journal 2006;5(6):1083–7.
10. JKM250M-60 MONO CRYSTALLINE MODULE [Электронный ресурс] Jinko Solar | Your Best Supplier of Modules, Cells & Wafers - Режим

доступа: https://www.jinkosolar.com/product_592.html (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

11. Солнечное излучение на наклонной поверхности [Электронный ресурс] PVCDROM Christiana Honsberg и Stuart Bowden - Режим доступа: <http://pvcldrom.pveducation.org/RU/SUNLIGHT/MODTILT.HTM> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

12. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Электронный ресурс] // NASA - POWER - Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/hirestimeser.cgi> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

13. SUNNY BOY 9000TL-US / 10000TL-US / 11000TL-US [Электронный ресурс] // SMA Solar Technology AG - Inverter, Photovoltaics solutions - Режим доступа: <https://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-boy-9000tl-us-10000tl-us-11000tl-us.html> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

14. Software [Электронный ресурс] // PVsyst. Photovoltaic software - Режим доступа: <http://www.pvsyst.com/en/software> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

15. Приложение II. Высота солнца над горизонтом [Электронный ресурс] // Книга "Земные ландшафты"- Режим доступа: <https://landschafty.jimdo.com/приложение-ii-высота-солнца-над-горизонтом/> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

16. Восход и закат солнца в Харькове / Продолжительность светового дня / Данные за весь год [Электронный ресурс] Погода для туристов. Прогнозы, статистика, анализ - Режим доступа: <https://pogoda.turtella.ru/Ukraine/Kharkov/sun/> (Дата звернення 29.11.2022). – Загл. з екрану.

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ

Питання охорони праці розглядаються для електротехнічної лабораторії. Лабораторія розміщена у приміщенні і має робоче місце інженера- проектувальника- з персональним комп'ютером.

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона відноситься до категорії Іа (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/год). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 в лабораторії встановлені такі метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- 1) температура повітря від 22 до 24 ° С;
- 2) вологість повітря від 40 до 60%;
- 3) швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м / с;

б) для теплого періоду року:

- 1) температура повітря від 23 до 25°С;
- 2) вологість повітря від 40 до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

Нормалізація мікрокліматичних умов здійснюється за рахунок раціонального планування приміщення і оптимального розміщення в ньому обладнання, а також приладів регулювання тепловиділення, холодовиділення і вологовиділення.

До роботи з персональним комп'ютером (ПК) допускаються працівники, які не мають медичних протипоказань, пройшли інструктаж з питань охорони праці. Особи, що працюють з ПК більше 50% робочого часу, повинні проходити обов'язкові попередні при вступі на роботу і періодичні медичні огляди в установленому порядку. Організація робочого

місця з ПК повинна враховувати вимоги безпеки, зручність положення, рухів і дій працівника. Робочий стіл з урахуванням характеру виконуваної роботи повинен мати достатній розмір для раціонального розміщення монітора (дисплея), клавіатури, іншого використовуваного обладнання і документів, поверхню, що володіє низькою здатністю, що відображає. Клавіатура розташовується на поверхні столу таким чином, щоб простір перед клавіатурою було достатнім для опори рук працівника (на відстані не менше ніж 300 мм від краю, зверненого до працівника). Щоб забезпечувалося зручність зорового спостереження, швидке і точне зчитування інформації, площина екрану монітора розташовується нижче рівня очей працівника переважно перпендикулярно до нормальної лінії погляду працівника (нормальна лінія погляду – 15 град. Вниз від горизонталі). Для виключення впливу підвищених рівнів електромагнітних випромінювань відстань між екраном монітора і працівником повинна становити не менше 500 мм (оптимальне 600 – 700 мм). Робочий стілець (крісло) повинен бути стійким, місце сидіння має регулюватися по висоті, а спинка сидіння - по висоті, кутах нахилу, а також відстані спинки від переднього краю сидіння. Регулювання кожного параметра має бути незалежною, легко здійснюваною плюс надійну фіксацію.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення 18 м^2 ($6 \times 3 \text{ м}$);
- висота 2,5 м;
- кількість робочих міст – 2;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 2 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м^2 площі і 20 м^3 обсягу на одне окреме робоче місце з ПК. Фактичне значення корисної площі приміщення сягає 18 м^2 , а об'єм складає 45 м^3

таким чином видно, що вимоги щодо площі та об'єму робочого місця виконано.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5%.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [23].

Розрахункова формула методу розрахунку освітлення:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (\text{A.1})$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}}, \quad (\text{A.2})$$

де $W_{\text{св}}$ – потужність одного світильника, Вт;

$n_{\text{св}}$ – кількість світильників в приміщенні, шт;

$$W_{\Sigma} = 110 \cdot 4 = 440 \text{ (Вт)} ;$$

$$W = \frac{440}{18} = 24,4 \text{ (Вт/м}^2\text{)}.$$

Питомої потужності $24,4 \text{ Вт/м}^2$ відповідає освітленість в 350 лк. при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Таким чином, створюються сприятливі зорові умови в лабораторії.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КУТА НАХИЛУ ТА ПЛОЩІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Б.1. Визначення оптимального кута нахилу сонячних колекторів для умов півдня України

Постановка завдання

При конкретному проектуванні СЕУ стикаються з деякими недостатньо визначеними параметрами. Так в деяких рекомендаціях для проектування сонячних установок для гарячого водопостачання наводиться, що кут нахилу колекторів, орієнтованих на південь, має бути $30-45^\circ$ [50].

Вказані рекомендації, ймовірно, обґрунтовані для районів Німеччини, де розроблені відповідні документи. Проте слід зазначити, що для конкретної місцевості мають бути свої рекомендовані оптимальні параметри [113-118]. Тому метою цього розділу є розробка методики визначення і розрахунок оптимального кута нахилу сонячного колектора залежно від режиму роботи на прикладі м. Одеси. Під режимом роботи розуміється цілорічна або сезонна робота впродовж теплої половини року.

Визначення кількості енергії, що падає на похилу поверхню сонячного колектора

Оптимальним кутом нахилу колектора будемо рахувати кут, що забезпечує максимальну кількість теплоти, що передається теплоносію за визначений відрізок часу. Частина об'єктів комунально-побутового сектора працює тільки в теплу частину року, наприклад, оздоровчі дитячі табори. Маючи дані по прямому H_D і розсіяному H_{sc} випромінюванню, що падає на горизонтальну поверхню залежно від широти місцевості, були визначені відповідні дані для широти м. Кропивницьки, табл. Б.1.

Таблиця Б.1 Дані по прямому H_B і розсіяному H_D випромінюванню на горизонтальну поверхню у безхмарний день для м. Кропивницький ($\varphi=46,47^\circ$), $Вт/м^2$

Місяць та схилення		Години доби до полудня					
		6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Січень $\delta=-20,8^\circ$	H_B			62,8	195,4	272,1	348,9
	H_D			48,8	69,8	80,2	90,7
Лютий $\delta=-13,3^\circ$	H_B		61,6	202,4	300,1	390,8	481,5
	H_D		24,4	69,8	90,7	94,2	104,7
Березень $\delta=-2,4^\circ$	H_B	86,6	184,9	334,9	453,6	540,8	628
	H_D	34,9	97,9	101,3	104,7	111,6	125,6
Квітень $\delta=10^\circ$	H_B	111	250	388	534	608	683
	H_D	77	93,1	109	132	136	139
Травень $\delta=18^\circ$	H_B	211	342	473	617	690	766
	H_D	77	94	111	132	133	134
Червень $\delta=23^\circ$	H_B	239	374	507	639	707	775
	H_D	84	97	111	127	127	127
Липень $\delta=21^\circ$	H_B	198,3	349,6	500,1	601,7	695,0	741,7
	H_D	84	99	111	125	128	132
Серпень $\delta=13^\circ$	H_B	132	277,3	421,7	532,7	601,8	670,1
	H_D	70	87	104	118	125	132
Вересень $\delta=3^\circ$	H_B	73,7	194,0	315,1	482,1	545,8	609,0
	H_D	43,6	63,7	84	104	110,3	116,4
Жовтень $\delta=-9,7^\circ$	H_B	20,9	108,2	195,4	404,7	457,1	509,4
	H_D	9,3	43	62,8	83,7	90,7	97,7

Продовження таблиці Б.1

Місяць та схилення		Години доби до полудня					
		6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Листопад $\delta=-19^\circ$	H_B		22,1	83,7	293,1	341,9	390,8
	H_D		16,3	48,8	69,8	74,4	83,7
Грудень $\delta=-23^\circ$	H_B			48,8	195,4	314	341
	H_D			27,9	39,5	74,6	79,2
		Години доби після полудня					
		17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13

Величина питомого теплового потоку q' , Вт, який падає на 1 м^2 похилої поверхні сонячного колектора в кожну годину безхмарного дня, визначається за формулою [119]:

$$q' = H_B \frac{\cos(\phi - s)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\phi - s)\sin(\delta)}{\cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\phi)\sin(\delta)} + H_D = H_B \cdot \kappa(\phi, s, \delta, \omega) + H_D, \quad (\text{Б.1})$$

де ϕ — широта місцевості;

s — кут нахилу площини сонячного колектора до горизонту;

δ — середньо місячне схилення, величина якого для кожного місяця приведена в табл. Б.1;

ω — годинний кут, рівний нулю в полудень для колекторів, орієнтованих на південь; через кожну годину значення годинного кута змінюється на 15° зі знаком плюс (з 12 годин до ранку) чи мінусом (з 12 годин до вечору);

$\kappa(\phi, s, \delta, \omega)$ — кутовий коефіцієнт, який залежить від перерахованих кутів.

В табл. Б2 в якості прикладу, наводяться дані по питомому тепловому потоку, що падає на похилу поверхню колектора при куті нахилу 40° , розрахованих за формулою (Б.1).

Таблиця Б.2

Питомий тепловий потік, що падає на колектор при куті нахилу 40°
у безхмарний день для широти м. Кропивницький ($\varphi=46,47^\circ$), та
відповідний кутовий коефіцієнт, Вт/м², [120, 121]

Місяць		Години доби до полудня					
		6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
	ω	-82,5	-67,5	-52,5	-37,5	-22,5	-7,5
Січень	q'			293,10	606,17	739,00	896,50
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$			3,8901	2,7450	2,4211	2,3095
Лютий	q'		259,37	541,08	699,46	842,70	1006,22
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$		3,8145	2,3285	2,0285	1,9153	1,8723
Березень	q'	216,08	395,43	617,82	793,10	926,27	1068,75
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	2,0921	1,6091	1,5423	1,5176	1,5064	1,5018
Квітень	q'	153,45	348,78	552,82	772,37	882,07	984,81
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	0,6887	1,0226	1,1418	1,1984	1,2270	1,2393
Травень	q'	184,96	379,75	574,43	783,24	888,53	986,20
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	0,5125	0,8357	0,9798	1,0549	1,0948	1,1123
Червень	q'	196,43	389,33	582,07	770,54	869,91	955,86
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	0,4711	0,7821	0,9293	1,0083	1,0509	1,0698
Липень	q'	172,78	361,17	560,13	714,06	839,03	905,39
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	0,4478	0,7499	0,8980	0,9789	1,0230	1,0427
Серпень	q'	150,12	348,53	557,55	725,68	831,73	928,74
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	0,6070	0,9431	1,0754	1,1407	1,1744	1,1890
Вересень	q'	121,91	312,12	504,75	758,92	857,83	953,25
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$	1,0616	1,2803	1,3353	1,3585	1,3696	1,3743
Жовтень	q'		321,91	449,75	819,68	891,82	977,32
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$		2,5777	1,9803	1,8186	1,7526	1,7268
Листопад	q'		128,35	327,17	808,67	850,71	936,32
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$		5,07	3,33	2,52	2,27	2,18
Грудень	q'			270,17	644,16	904,65	929,91
	$\kappa(\varphi, s, \delta, \omega)$			4,9645	3,0945	2,6435	2,4948
		Години доби після полудня					
		17-18	16-17	15-16	14-15	13-14	12-13
	ω	82,5	67,5	52,5	37,5	22,5	7,5

Середньодобова кількість енергії, що падає на 1 м^2 сонячного колектора в кожному місяці, визначається підсумовуванням даних відповідного рядка в табл. Б.2 і множенням отриманого значення на два. Підсумовування значень в рядку дає кількість енергії, отриману до полудня, у Вт·год. Кількість сонячної енергії, що падає на колектор за місяць, визначається добутком середньодобового значення на кількість днів в місяці, табл. Б.3. Отримані дані відповідають енергії, що падає, у безхмарний день.

Таблиця Б.3 Кількість енергії, яка падає у безхмарний день, $\text{кВт}\cdot\text{год.}/\text{м}^2$, при куті нахилу плоского колектора 40°

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
середньодоб.	4,372	5,495	7,158	7,388	7,658	7,628
за місяць	135,55	170,34	221,90	221,65	237,40	228,85
Місяць	Липень	Серп.	Верес.	Жовтень	Листопад	Груд.
середньодоб.	7,197	7,135	7,017	6,754	5,499	4,699
за місяць	223,10	221,17	210,52	209,37	170,48	145,68

Визначення кількості сонячної енергії, що передається теплоносію

Питомий тепловий потік q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, переданий в систему гарячого водопостачання в кожную годину дня визначається за формулою:

$$q = q' \cdot \eta_0 \cdot \eta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (\text{Б.2})$$

де η_0 — коефіцієнт, який враховує реальні умови хмарності. Для району м. Одеси значення η_0 приводяться в табл. Б.4.

η_k — коефіцієнт корисної дії СК, який залежить від його конструкції. При різниці температур теплоносія в колекторі та навколишнього повітря $20 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ця залежність наступна

$$\eta_K = 0,82 - 0,007 \cdot (t_K - t_0), \quad (\text{Б.3})$$

де t_K — температура підігрітої в колекторі води, а t_0 — температура навколишнього повітря. Середньомісячні значення температури навколишнього повітря також приводяться в табл. Б.4. Температура t_K звичайно приймається рівною 50 °С. Температура t_0 — це середня температура повітря атмосфери у денні години розрахункового місяця, яку розраховують за формулою:

$$t_0 = t_{cp} + 0,3 \cdot A_t, \quad (\text{Б.4})$$

де t_{cp} і A_t — середньодобова температура повітря і максимальна амплітуда коливань добових температур розрахункового місяця.

Таблиця Б.4 Значення середньоденної температури повітря t_0 та показника η_0 , який враховує хмарність для м. Кропивницького

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
t_0 , град.	-5	-2	7,1	14	21	25
η_0	0,52	0,59	0,66	0,72	0,77	0,82
Місяць	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
t_0 , град.	28	27	23	14	9	0
η_0	0,86	0,86	0,78	0,68	0,57	0,47

η_1 — коефіцієнт, що враховує міру прозорості атмосфери, величина якого коливається від 0,8 в промислових районах до 1 в курортній зоні. Прийнято $\eta_1=1$;

η_2 — коефіцієнт, що враховує втрати тепла при транспортуванні до споживача. Величина цього коефіцієнта коливається від 0,85 для великих централізованих систем гарячого водопостачання до 0,98 для локальних водопідігрівачів [49]. Прийнято $\eta_2=0,98$;

η_3 — коефіцієнт, що враховує втрати, обумовлені нестационарним теплообміном при мінливій хмарності. Рекомендується $\eta_3 = 0,9$.

Загальний ККД передачі теплоти може бути отриманий як

$$\eta = \eta_o \cdot \eta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3. \quad (\text{Б.5})$$

Значення загального ККД залежить тільки від місяця та приводиться в табл. Б.5.

Таблиця Б.5 Значення загального ККД передачі теплоти користувачу

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
η	0,234	0,274	0,343	0,361	0,419	0,466
Місяць	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
η	0,505	0,500	0,434	0,382	0,303	0,224

Визначення раціонального кута нахилу колектора для СЕУ, працюючої теплу половину року

Залежність кількості теплоти, переданої споживачеві, залежно від кута нахилу колектора для теплої половини року наводиться в табл. Б.6. З приведених даних видно, що максимальна кількість теплоти відповідає куту нахилу 25° [120, 121].

Визначення раціонального кута нахилу колектора для СЕУ, яка працює впродовж усього року

Розглянемо залежність отриманої кількості теплоти від СЕУ залежно від кута нахилу за весь рік. У табл. Б.7 наводяться необхідні дані для недостатніх місяців.

Таблиця Б.6 Енергетичні характеристики сонячних колекторів залежно від кута нахилу

Кут нахилу колектора, s, град.	Місяць	Середньодоб. кількість теплоти, яка падає на колектор, q' , Вт·год/м ²	Кількість теплоти, яка падає за місяць, $q'_{\text{мес}}$, кВт год/м ²	Кількість теплоти, яка передана в систему ГВП, $q_{\text{мес}}$, кВт год/м ²
15°	Квітень	7179,8	215,4	77,69
	Травень	7946	246,33	103,2
	Червень	8094,38	242,83	113,28
	Липень	7730,36	239,64	121,06
	Серпень	7077,91	219,42	109,68
	Вересень	6367,77	191,63	82,93
20°	Квітень	7312,9	219,39	79,13
	Травень	7975,8	249,25	103,6
	Червень	8082,27	242,47	113,11
	Липень	7700,20	238,71	120,59
	Серпень	7169,31	222,25	111,09
	Вересень	6548,30	197,53	85,75
25°	Квітень	7400,81	222,02	80,85
	Травень	7954,95	246,6	103,33
	Червень	8081,94	240,57	112,22
	Липень	7621,82	236,28	119,36
	Серпень	7215,86	223,69	111,81
	Вересень	6758,69	202,76	88,02
30°	Квітень	7442,87	223,29	80,54
	Травень	7883,99	244,40	102,41
	Червень	7904,85	237,15	110,63
	Липень	7495,82	232,37	117,39
	Серпень	7217,23	223,73	111,84
	Вересень	6889,64	206,69	89,72

Таблиця Б.7 Енергетичні характеристики сонячних колекторів залежно від кута нахилу

Кут нахилу колект., s, град.	Мі-сяць	Кільк. теплоти, яка падає за міс., $q'_{\text{мес}}$, кВт·год/м ²	Кільк. теплоти, що передана в систему ГВП, $q_{\text{мес}}$, кВт·год/м ²	Сумарна кількість теплоти за рік, $q_{\text{рік}}$, кВт·год/м ²
20°	1	121,02	28,03	883,86
	2	157,69	43,16	
	3	189,78	65,15	
	10	164,93	63,11	
	11	141,04	42,76	
	12	126,76	28,37	
25°	1	131,42	30,44	902,98
	2	167,88	49,95	
	3	197,10	67,66	
	10	174,15	66,64	
	11	152,71	46,29	
	12	139,19	31,16	
30°	1	140,95	32,65	916,32
	2	176,97	48,44	
	3	203,14	69,73	
	10	182,20	69,72	
	11	163,35	49,52	
	12	150,67	33,73	
35°	1	149,55	34,64	923,76
	2	184,87	50,60	
	3	207,84	71,35	
	4	223,16	80,49	
	5	240,66	100,85	
	6	232,23	108,33	
	7	227,02	114,68	
	8	222,37	111,16	
	9	209,28	90,85	
	10	189,04	72,33	
	11	172,87	52,41	
	12	161,11	36,06	

Кут нахилу колект., s , град.	Мі- сяць	Кільк. теплоти, яка падає за міс., $q'_{\text{мес}}$, кВт·год./м ²	Кільк. теплоти, що передана в систему ГВП, $q_{\text{мес}}$, кВт·год./м ²	Сумарна кількість теплоти за рік, $q_{\text{рік}}$, кВт·год./м ²
40°	1	157,15	36,40	925,26
	2	191,55	52,43	
	3	211,17	72,49	
	4	221,66	79,95	
	5	235,42	98,65	
	6	225,85	105,35	
	7	220,26	111,27	
	8	219,63	109,78	
	9	210,53	91,39	
	10	194,59	74,46	
	11	181,22	54,94	
	12	170,43	38,15	

В результаті аналізу отриманих даних було визначено, що оптимальний кут нахилу при цілорічній експлуатації сонячної установки лежить в діапазоні 38-40° (при $s=38^\circ$ $q_{\text{год}}=925,38$ кВт·год., при $s=39^\circ$ $q_{\text{год}}=925,44$ кВт·год.).

Загальний ККД передачі теплоти при цьому дорівнює 38,0 %, що дещо не співпадає з середнім ККД, розрахованим за даними табл. Б.4.

Додаток В

Алгоритм визначення сонячної позиції (SPA) для розрахунку сонячного зеніту та кута азимуту

Через складність алгоритму ми включили кілька прикладів у Додаток, щоб дати користувачам впевненість у їхніх покрокових обчисленнях. Ми також включили в Додаток пояснення того, як обчислити рівняння[50] часу, прохід сонця (сонячний полудень), схід, захід сонця та як змінити юліанський день на календарну дату. Ми також включили вихідний код C із заголовковим файлом для всіх обчислень у цьому звіті (крім перетворення юліанського дня в календарну дату). Користувачі можуть включити цей модуль у свій власний код, включивши файл заголовка, оголошуючи структуру SPA, заповнюючи необхідні вхідні параметри в структуру, а потім викликаючи

Функція розрахунку SPA. Ця функція обчислить всі вихідні значення та заповнить структуру SPA для користувача. Користувачі повинні зазначити, що цей звіт використовується для розрахунку сонячного положення лише для застосування сонячної радіації, і що він є чисто математичним і не призначений для навчання астрономії чи опису обертання Землі. Щоб отримати додатковий опис астрономічної номенклатури, яка використовується у звіті, користувачеві пропонується переглянути визначення в астрономічних альманахах або інших астрономічних довідниках.

Для позиціонування фотоелектричних елементів в напрямку Сонця необхідно обчислити два основних параметри, а саме кутову висоту Сонця та азимутувий кут. Вони не можуть бути повторно використані для іншого проміжку часу через нахил Землі і її руху навколо Сонця.

Конвертація [52] градусів у радіани. Для математичних обчислень основною одиницею вимірювання плоских кутів вважається радіан, тому для перетворення градусів в радіан слід використовувати наступну формулу:

$$Rad = \frac{\pi \cdot \nu}{180}, \quad (B.1)$$

де ν – це градусна одиниця, яку потрібно перевести в радіани.

Меридіани місцевого стандартного часу. Меридіан місцевого стандартного часу вважається еталонним меридіаном, який використовується для певного часового поясу, а також нульовим меридіаном, якіє використовують для середнього часу за Гринвічем (рисунок В.1).

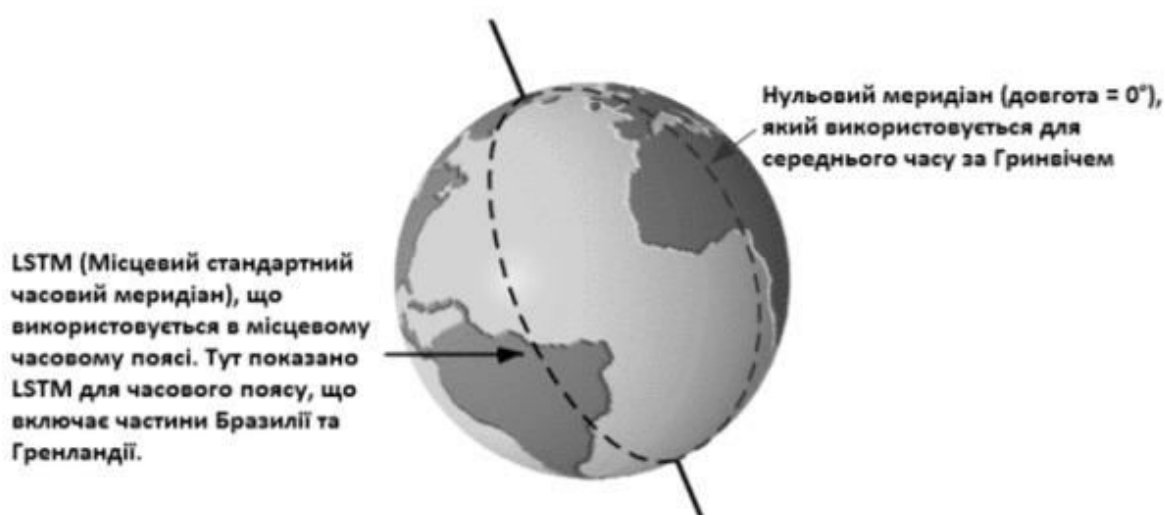


Рисунок В.1. – Меридіан місцевого стандартного часу

Меридіан місцевого стандартного часу вираховується за формулою:

$$LSTM = 15 \cdot \Delta T_{UTC}, \quad (B.2)$$

де ΔT_{UTC} – це часовий пояс, який зазначений у Всесвітньому координованому часі (UTC).

Рівняння часу. Так як Сонце рухається по екліптиці нерівномірно, тривалість сонячного дня змінюється протягом року, як це зображено на рисунку В.2. Через ці зміни взимку в північній півкулі день триває довше ніж влітку в той час, як в південній півкулі - все навпаки.

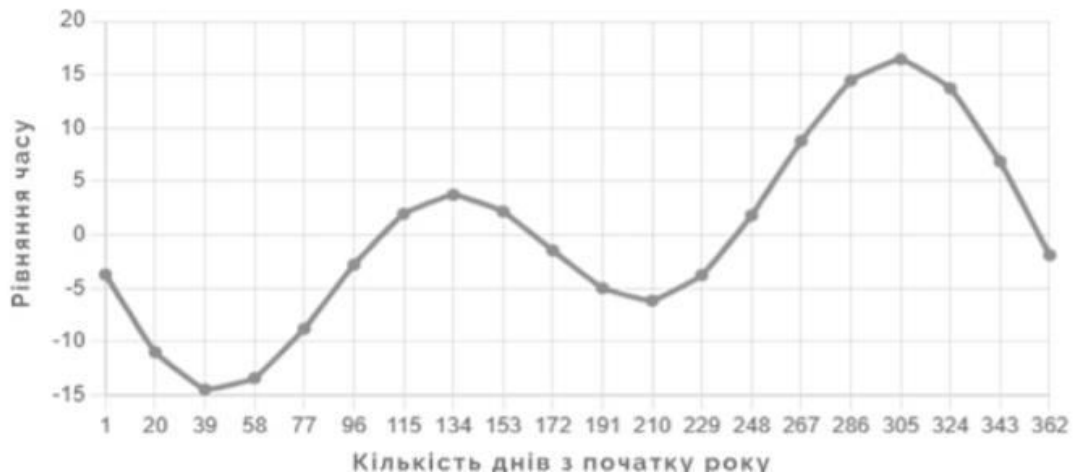


Рисунок В.2. – Графік змін у рівнянні часу протягом року

Для визначення рівняння часу потрібно скористатися нижче наведеною формулою:

$$EoT = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot B_{rad}) - 7.53 \cdot \cos(B_{rad}) - 1.5 \cdot \sin(B_{rad}), \quad \text{В.3}$$

Де В визначається за формулою:

$$B = \frac{360}{365} \cdot (DY - 81), \quad \text{(В.4)}$$

де DY – це порядковий номер дня з початку року.

Корекційний коефіцієнт часу. Корекційний коефіцієнт часу враховує зміни місцевого сонячного часу в межах даного часового поясу через зміни довготи в межах часового поясу, а також містить рівняння часу.

Корекційний коефіцієнт часу можна визначити за формулою:

$$B = 4 \cdot (Longitude - LSTM) \cdot EoT, \quad (B.5)$$

де $Longitude$ – це координати довготи, рад;

$LSTM$ – це меридіан місцевого стандартного часу;

EoT – це рівняння часу.

Місцевий сонячний час. Час який визначається в місці знаходження спостерігача видимим положенням Сонця на небесній сфері. Для визначення місцевого сонячного часу потрібно скористатися наступною формулою:

$$LST = H + \frac{TC}{60} + \frac{M}{60}, \quad (B.6)$$

де H – поточна година спостерігача;

M – поточна хвилина спостерігача;

TC – корекційний коефіцієнт часу.

Часовий кут перетворює місцевий сонячний час в число радіан на які Сонце рухається по небу. Часовий кут визначається за формулою:

$$HRA = \frac{15 \cdot LST \cdot \pi}{180}, \quad (B.7)$$

де LST – це місцевий сонячний час.

Кут схилення Сонця який являє собою кут між променями сонця і площиною екватора Землі. Даний кут змінюється в залежності від сезону через нахил Землі навколо своєї осі обертання і обертання Землі навколо Сонця. Кут схилення сонця можна обчислити за формулою:

$$\delta = \frac{23.45 \cdot \sin(B_{rad}) \cdot \pi}{180}, \quad (B.8)$$

де B - обчислюється за формулою В.5

Кутова висота Сонця. Висота Сонця над горизонтом не є постійною величиною, вона змінюється протягом дня і залежить від широти конкретного місця і дня року. Щоб визначити кутову висоту Сонця протягом дня потрібно скористатися наступною формулою:

$$\begin{aligned} Elevation = & \arcsin((\sin(\delta) \cdot \sin(Latitude)) + \\ & + (\cos(\delta) \cdot \cos(Latitude) \cdot \cos(HRA)) \end{aligned} \quad (B.9)$$

де δ – кут схилення Сонця;

$Latitude$ – координати широти, рад;

HRA – це часовий кут.

Таким чином, використовуючи формулу В.9, для 19.10.2022 року і широти 49.80597.

Графік кутової висоти Сонця буде мати вигляд згідно рисунку В.3.

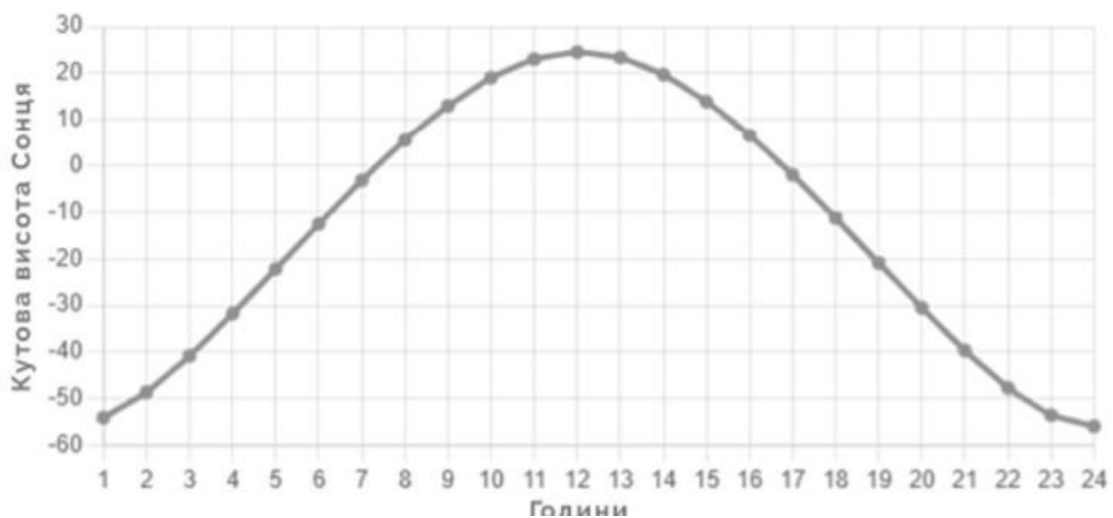


Рисунок В.3 – Графік зміни кутової висоти Сонця протягом дня

Азимутальний кут. Азимутальний кут являється напрямком компаса, з якого надходить сонячне світло, який зображена на рисунку 1.5. В час сонячного полудня сонце завжди знаходиться прямо на півдні в північній півкулі і прямо на півночі в південній півкулі.

У дні рівнодення сонце встає прямо на сході і сідає прямо на заході незалежно від широти, тому азимутальні кути в цей час складають рівно 90° на сході та 270° на заході. Проте азимутальний кут змінює кут від залежності широти і пори року.

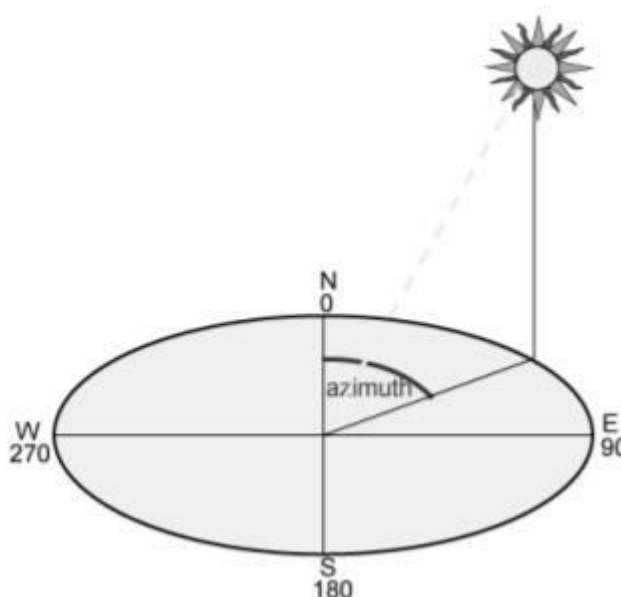


Рисунок В.4 – Азимутальний кут
Азимутальний кут обчислюється за формулою:

$$Azimuth = \arccos\left(\frac{\cos(Latitude) \cdot \sin(\delta) - \cos(\delta) \cdot \sin(Latitude) \cdot \cos(HRA)}{\cos(Elevation)}\right), \quad (B.10)$$

де δ – кут схилення сонця;

Latitude – кут координати широти, рад;

HRA – це часовий кут;

Elevation – це часовий кут.

Часові зміни. Щоб коректно керувати сонячним трекером потрібно визначити часові зміни, а саме тривалість дня, час сходу за заходу Сонця. Ці дані є необхідні, щоб налаштувати робочий час для коректної роботи сонячного трекера.

Розрахунок сходу та заходу скористаємося наступними формулами:

$$Sunrise = 12 - \frac{\arccos(A)}{0.261799} - \frac{TC}{60} \quad (B.11)$$

$$Sunrise = 12 + \frac{\arccos(A)}{0.261799} - \frac{TC}{60} \quad (B.12)$$

де TC – корекційний коефіцієнт часу;

A – визначається за формулою.

$$Sunrise = -1 \cdot \frac{\sin(Latitude) \cdot \sin(\delta)}{\cos(Latitude) \cdot \cos(\delta)} \quad (B.13)$$

де Latitude координати широти, рад;

δ - кут схилення Сонця.

Тривалість дня розрахуємо за формулою:

$$DL = \frac{24}{\pi} \cdot \arccos(-\operatorname{tg}(Latitude) \cdot \operatorname{tg}(\delta)), \quad (B.14)$$

де Latitude - координати широти, рад;

δ - кут схилення Сонця.

Алгоритм автоматизованої роботи сонячного трекера

Запропонований метод розрахунку положено в основу алгоритму автоматизованої роботи сонячного трекера зображено на рисунку В.5.

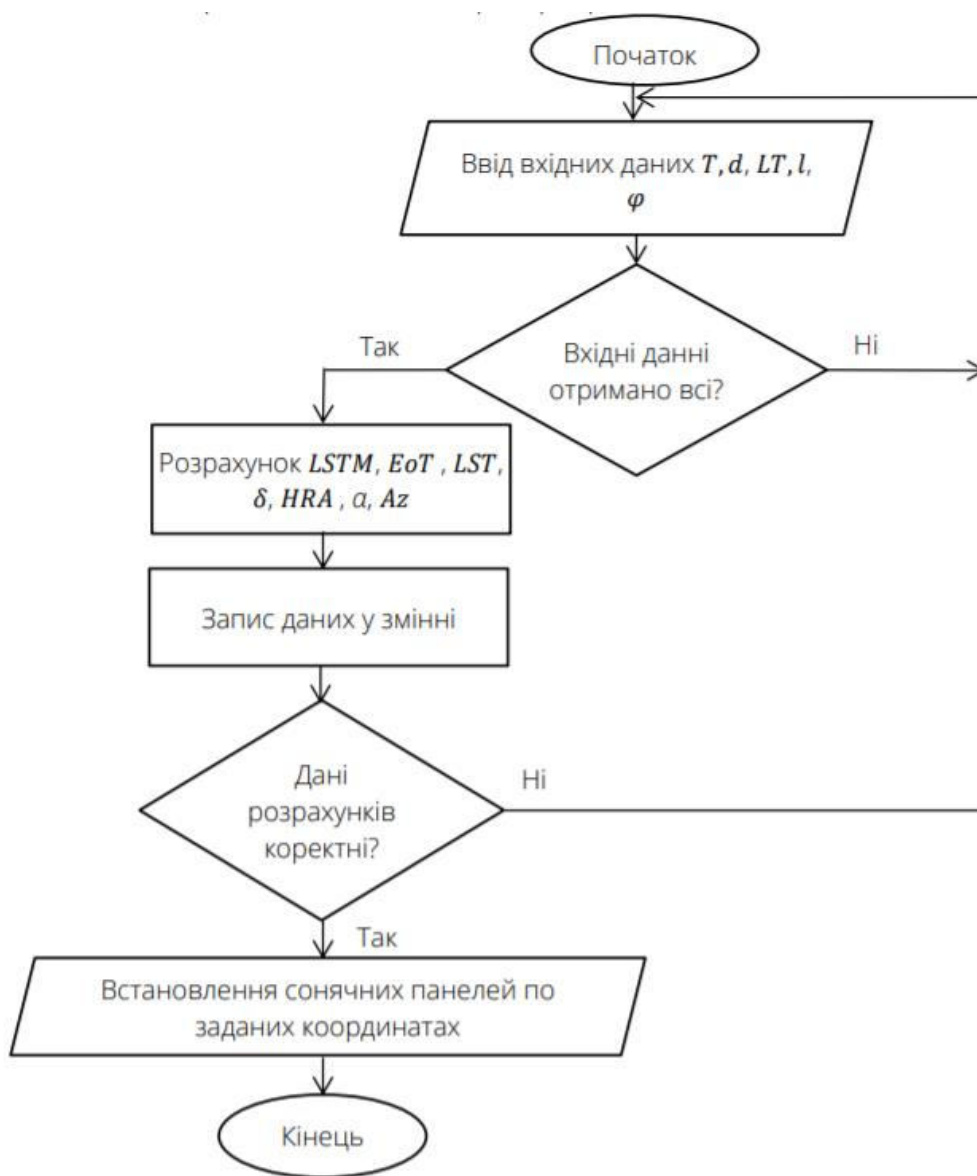


Рисунок В.5- Алгоритм автоматизованої роботи сонячного трекера

Вихідними даними алгоритму є часовий пояс T , кількість днів з початку року d , поточна година LT , координати довготи l та широти φ місця розташування сонячної електростанції [54]. На основі розрахунків кута висоти α та азимуту Az можна точно виявити знаходження Сонця та встановити сонячні панелі під оптимальним кутом до нього.

Представлена блок схема інтелектуального методу керування сонячною панеллю на рисунку В.6.

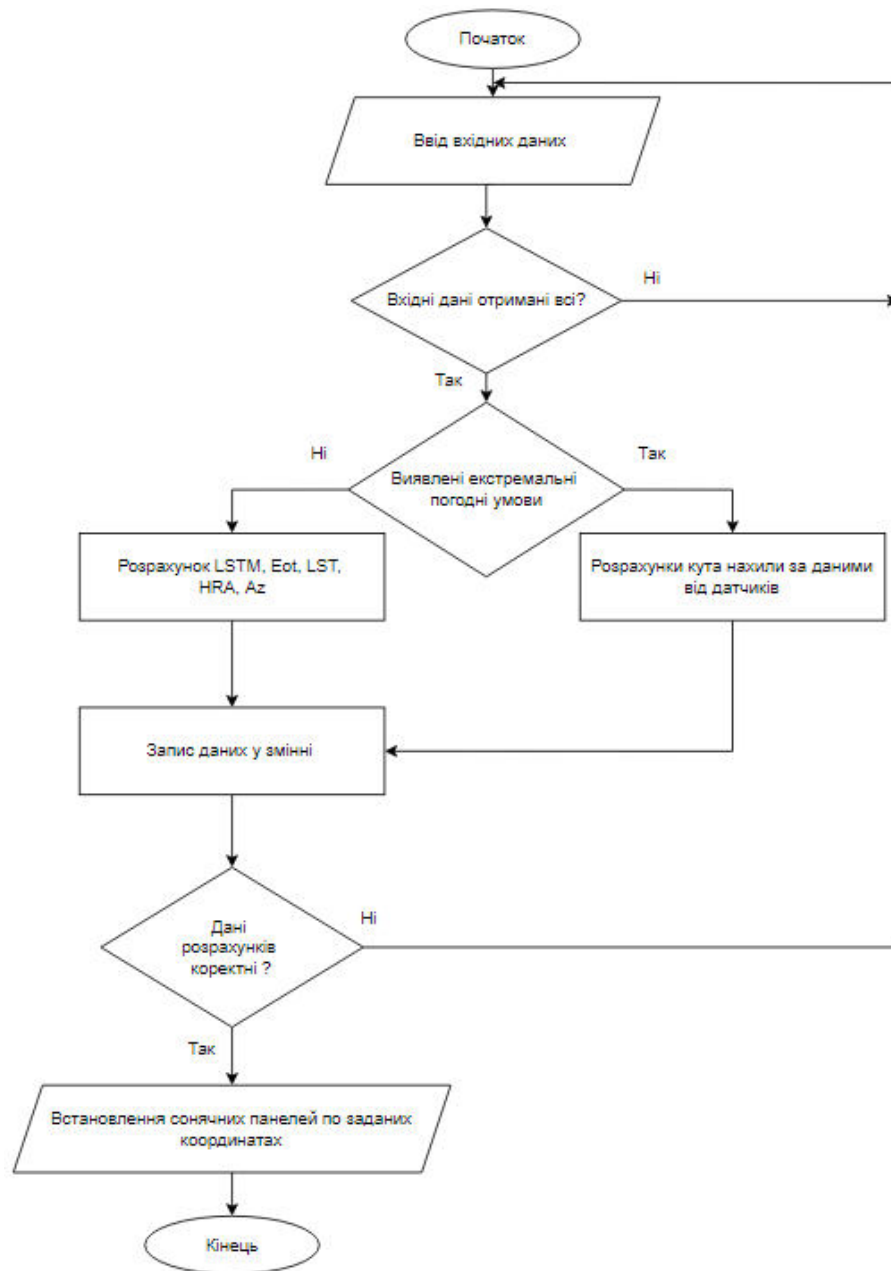


Рисунок В.6 - Блок схема інтелектуального методу керування сонячною панеллю

Проаналізувавши блок-схему методу інтелектуального методу керування сонячними панелями, після запуску відбувається ввід вхідних даних та перевіряється їх повнота, якщо пона не була досягнута то повертає на перевірку вхідних даних, після чого відбувається перевірка на екстремальні умови по типу:

Розрахунок потужності сонячної панелі без трекера

В процесі розробки сонячного трекера були проведені вимірювання значень вихідних струму та напруги при стаціонарному встановленні сонячної панелі без використання трекера у напрямку на південь, за умов інтенсивного сонячного випромінювання. Дані вимірювань наведені в таблиці Г.1.

Таблиця Г.1 Дані роботи сонячної панелі без використання трекера

Час Т, год	Струм І, А	Напруга U, В	Потужність Р, Вт
7	0,25	5,1	1,28
8	0,25	5,15	1,29
9	0,26	5,2	1,35
10	0,27	5,3	1,43
11	0,29	5,5	1,60
12	0,31	5,7	1,77
13	0,32	5,8	1,86
14	0,3	5,7	1,71
15	0,29	5,6	1,62
16	0,28	5,5	1,54
17	0,26	5,4	1,40
18	0,25	5,3	1,33
19	0,24	5,2	1,25

Вихідну потужність було розраховано за формулою Г.1

$$P = U \cdot I \quad (\text{Г.1})$$

Зробивши висновки з даних наведених у таблиці Г.1 було побудовано графік потужності сонячної панелі від часу доби та наведено у рисунку Г.1

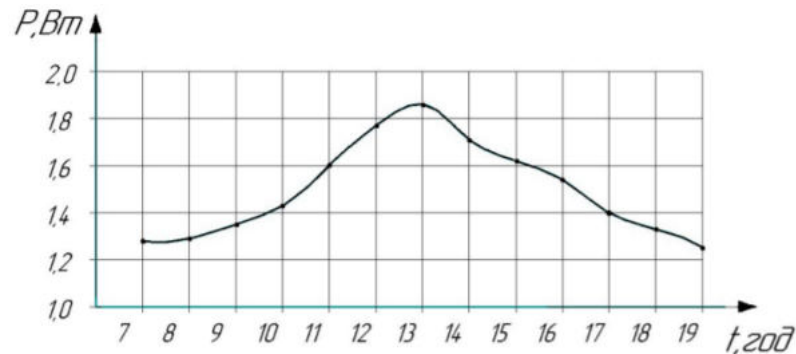


Рисунок Г.1 Графік залежності потужності, яку виробляє сонячна панель під час доби при стаціонарній установці

З наведеного графіка можемо зробити висновки, що панель працює вранці на низькій потужності, після чого плавно піднімається до максимального значення опівдні після чого знову плавно знижується до мінімальної потужності ввечері. При цьому середня добова потужність становить 1,43 Ват.

У другому експерименті було виміряно дані вихідного струму та вихідної напруги з сонячної панелі за умови її установки на двовісному сонячному трекері, за умови інтенсивного сонячного випромінювання. Отримані дані були систематизовані та наведені у таблиці Г.2. Значення вихідної потужності були розраховані за формулою Г.1. На рисунку Г.2 зображено графік залежності вихідної потужності від часу доби, за умови використання трекера.

Таблиця Г.2 Дані роботи сонячної панелі з використання трекера

Час T, год	Струм I, А	Напруга U, В	Потужність P, Вт
7	0,28	5,6	1,56
8	0,28	5,65	1,56
9	0,29	5,7	1,65
10	0,29	5,7	1,65
11	0,30	5,7	1,71

12	0,31	5,9	1,83
13	0,32	5,9	1,89
14	0,31	5,8	1,80
15	0,30	5,7	1,71
16	0,29	5,7	1,65
17	0,28	5,6	1,57
18	0,28	5,6	1,57
19	0,27	5,5	1,49

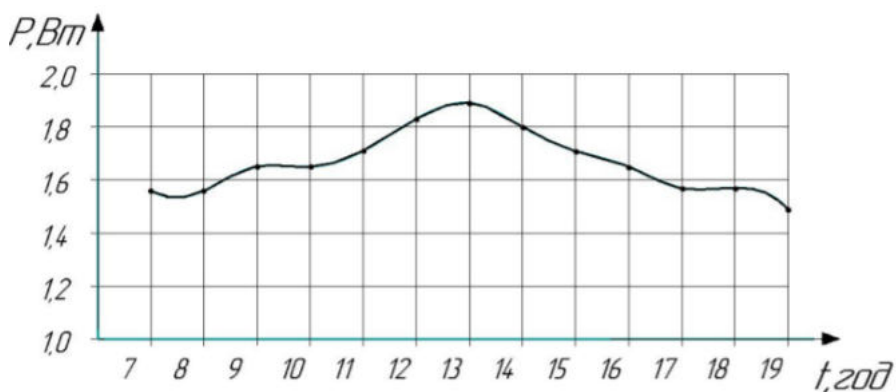


Рисунок Г.2 Графік залежності потужності, яку виробляє сонячна панель від часу доби при установці на двовісного трекера.

Проаналізувавши графік з рисунка Г.2 можна зробити висновок, що вихідна потужність при використанні двовісного трекера є більш стабільною та енергоефективною, при порівнянні графіка вихідної напруги сонячного двовісного трекера та без нього зображено на рисунку Г.3.

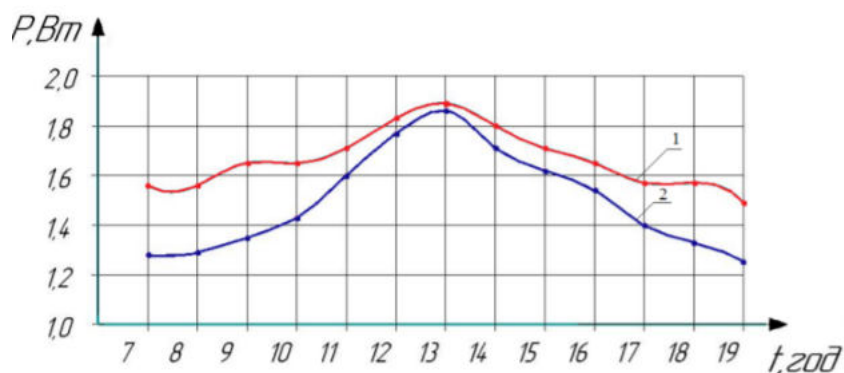


Рисунок Г.3 графіки порівняння вихідної потужності з трекером(1) та без нього (2)

Середня вихідна потужність панелі з трекером становить 1,71 ватт що на 0,28 ватт більше ніж у стаціонарно встановленої сонячної батареї.

З проведеного дослідження випливає, що використання трекера є повністю обґрунтованим, оскільки значно підвищує продуктивність сонячної панелі, що і видно з графіка, представленого на рисунку Г.3. Завдяки використанню двовісного трекера сонячна панель працює максимально продуктивно і має можливість перетворювати значно більше енергії сонячного світла в електричну енергію.

Також робота сонячної панелі при використанні сонячного трекера є більш стабільною, оскільки підвищує продуктивність, а також зменшує час окупності сонячної панелі і всієї конструкції в цілому.

На даний момент, сонячні електростанції є одним із найперспективніших напрямів відновлюваної енергетики. Як правило, для промислових сонячних електростанцій застосовується монтаж сонячних панелей під певним фіксованим кутом. При цьому, ефективність сонячних панелей значним чином залежить від кута падіння сонячних променів. Тому, альтернативним варіантом для сонячних електростанцій є монтаж сонячних панелей на рухомих одновісних чи двовісних кріпленнях, які керуються системою стеження за сонцем (сонячним трекером). Хоча вартість таких кріплень набагато вища, ніж нерухомих, значне зростання ефективності установки [3] знижує період її окупності (рисунок Г.4). Трьома основними способами керування рухомими сонячними панелями є:

- керування за фотодіодом;
- керування за азимутальним кутом та кутом нахилу;

-керування за математичним розрахунком позиції Сонця.

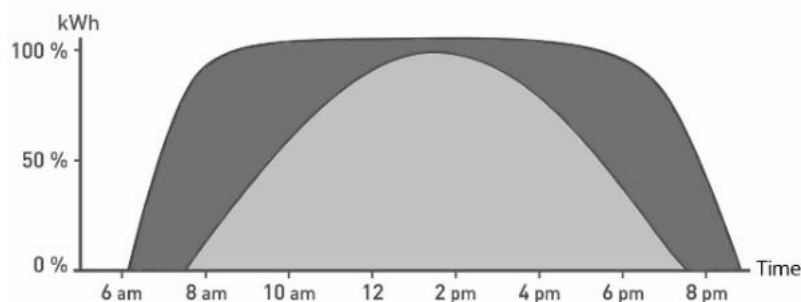


Рисунок Г.4 Порівняння ефективності фіксованих сонячних панелей(світло-сіра зона) та сонячних панелей що рухомі у двох осях (темно-сіра зона)

Кожен із цих підходів має свої переваги і недоліки. Наприклад, керування позицією сонячних панелей за показниками освітленості, що вимірюються світлодіодами, встановленими на панель, передбачає періодичне їх очищення та обслуговування, в той час як розрахунок позиції за математичними формулами втрачає свою ефективність у випадку хмарної погоди або наявності природних та штучних перешкод довкола сонячних панелей (дерев, будинків, тощо). В дипломній роботі було запропоновано програмне забезпечення для дослідження зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів, яке дозволяє отримати дані щодо ефективності сонячної панелі при різних азимутах та кутах нахилу до горизонту. Програмне забезпечення формує образ, приклад графічного представлення якого подано на рисунку Г.5

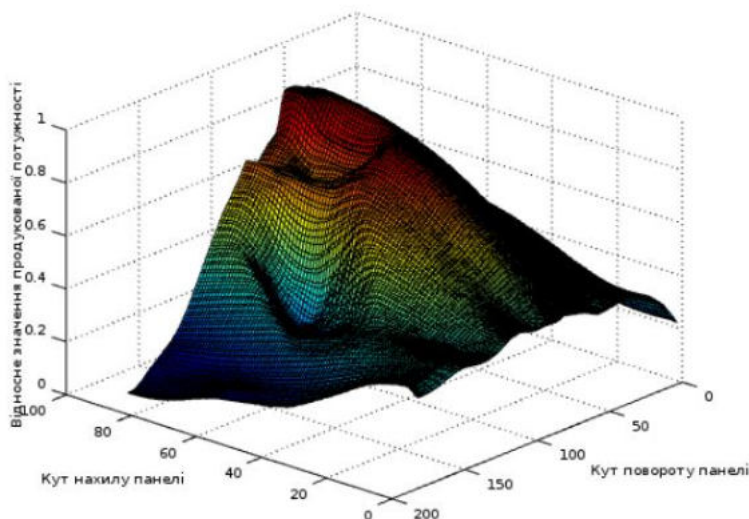


Рисунок Г.5 Приклад графічного представлення про ефективність сонячних панелей від кута нахилу та азимуту

Проведення вимірювань та побудови образу займає близько 10 хвилин, тому проведення повного вимірювання та пошуку панелей батарей, що дає максимальну ефективність, є неефективним для використання в системі позиціонування панелей у реальному часі. Проте, сама система може бути використана для вирішення завдань пошуку оптимальних положень, якщо на базі забезпечення розробленого програмного та оптимізованого обладнання буде імплементовано координаційні методи за нашим пошуком. Ось такі методи пошуку оптимальної результативності вимірювання з точки зору потужності сонячних панелей у реальному часі.

За допомогою розробленого програмного забезпечення на основі математичної моделі було сформовано 2 тестові зразки. На основі 2 змодельованих образів та 3 експериментальних образів, сформованих у роботі, було проведено порівняння ефективності методів узгодженого пошуку максимуму при знаходженні позиції сонячної панелі з максимальною потужністю початку продукуючого струму, при пошуку з вільної точки. Для цього на базі мови програмування середовища Visual Studio C++ було розроблено імплементатії методів координаційного підходу, у вигляді функцій, які приймають значення матриці 180 на 90 і повертають наступні:

- 1) позицію максимуму, що була знайдена методом;
- 2) кількість кроків повороту панелі, за яку був максимум.

Оскільки кожен знайшли з методів притаманної наявності похибок через вразливість для знаходження локальних поворотних панелей замість глобальних, при проведених порівняльних дослідженнях, поставлено наступні умови:

- 1) кожен із методів операцій був один зразок 1000 разів, починаючи пошук максимуму із випадкових позицій;
- 2) після завершення роботи методу, значення знайденого максимуму вирівнювалося з попереднім відомим правильним значенням, і, якщо вони не співпадали, зараховувався промах;
- 3) при зарахуванні промаху, обчислювалася євклідова відстань від точок справжнього максимуму до точки, який метод встановлення як максимум;
- 4) після завершення 1000 спроб відбувається обчислення середнього ряду кроків для досягнення максимуму, відсотка промахів у загальному експерименті та середнє значення євдової відстані від справжнього максимуму до помилкового знайденого тестового методу

Таблиця Г.3 Використання методу поординатного підйому для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі

Образ Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня євклідова відстань фактичного результату до дійсного максимуму	Середня кількість кроків до досягнення максимуму (1 крок рівний одному повороту на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0	0	1568.4
Експериментальний образ 2	0.852	3.3057	1499.5

Експериментальний образ 3	0	0	1437.7
Моделльний образ 1	0	0	1557.3
Моделльний образ 2	0	0	1438.7

Таблиця Г.4 – Використання методу Хука-Дживса для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.

Образ Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань фактичного результату до дійсного максимуму	Середня кількість кроків до досягнення максимуму (1 крок рівний одному повороту на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.075	0.33541	1952.1
Експериментальний образ 2	0.211	0.47181	1868
Експериментальний образ 3	0.558	1.995	1968.2
Моделльний образ 1	0	0	1480.1
Моделльний образ 2	0	0	1485.7

Таблиця Г.5 – Використання методу Розенброка для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.

Образ Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань фактичного результату до дійсного максимуму	Середня кількість кроків до досягнення максимуму (1 крок рівний одному
-------------------------	---	---	---

			повороту на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.074	0.33094	1876.1
Експериментальний образ 2	0.218	0.48746	1805.9
Експериментальний образ 3	0.556	17.93	1903.1
Модельний образ 1	0	0	1393
Модельний образ 2	0	0	1446.4

Таблиця Г.6 – Використання інтелектуального методу для вирішення задачі знаходження оптимальної позиції сонячної панелі.

Образ Характеристика	Відношення кількості промахів до загальної кількості експериментів	Середня евклідова відстань фактичного результату до дійсного максимуму	Середня кількість кроків до досягнення максимуму (1 крок рівний одному повороту на 1 градус по будь-якій осі)
Експериментальний образ 1	0.079	0.35443	1875.1
Експериментальний образ 2	0.205	0.43561	1801.4
Експериментальний образ 3	0.590	19.245	1908.2
Модельний образ 1	0	0	1440.1
Модельний образ 2	0	0	1502.7

Перш за все, слід зазначити, що на модельованих образах, всі алгоритми визначили глобальні максимуми безпомилково, затративши на це меншу кількість кроків, порівняно з пошуком максимуму на експериментальних образах. Щодо

експериментальних образів, то методи безпомилково знайшли максимум у випадку 2 і 3 образів. Невеликий відсоток промахів спостерігається на образі 1 та 2. Ймовірно, безпомилкова класифікація глобального максимуму на образі 3 та класифікація з відносно низьким відсотком помилок на образі 2, які були отримані у хмарну погоду, пов'язана зі специфікою алгоритмів пошуку даними методами на поверхні, де чітко прослідковувалися коливання по одній з осей при малих змінах значень по іншій[4]. Найбільша кількість помилок була зафіксована на образах 3 та 5. Щодо образу 3, слід зазначити, що через хмарну погоду даний образ відрізняється неправильними формами та локальними максимумами. При цьому, образ 5 за формою нагадує модельовані образи, однак методи при визначенні максимуму на ньому помилялися найчастіше. При зближенні на рисунку 4.6, однак, видно, що даний образ не має гладкої поверхні, як модельовані образи, а містить велику кількість локальних максимумів з неглибокими локальними мінімумами між ними.

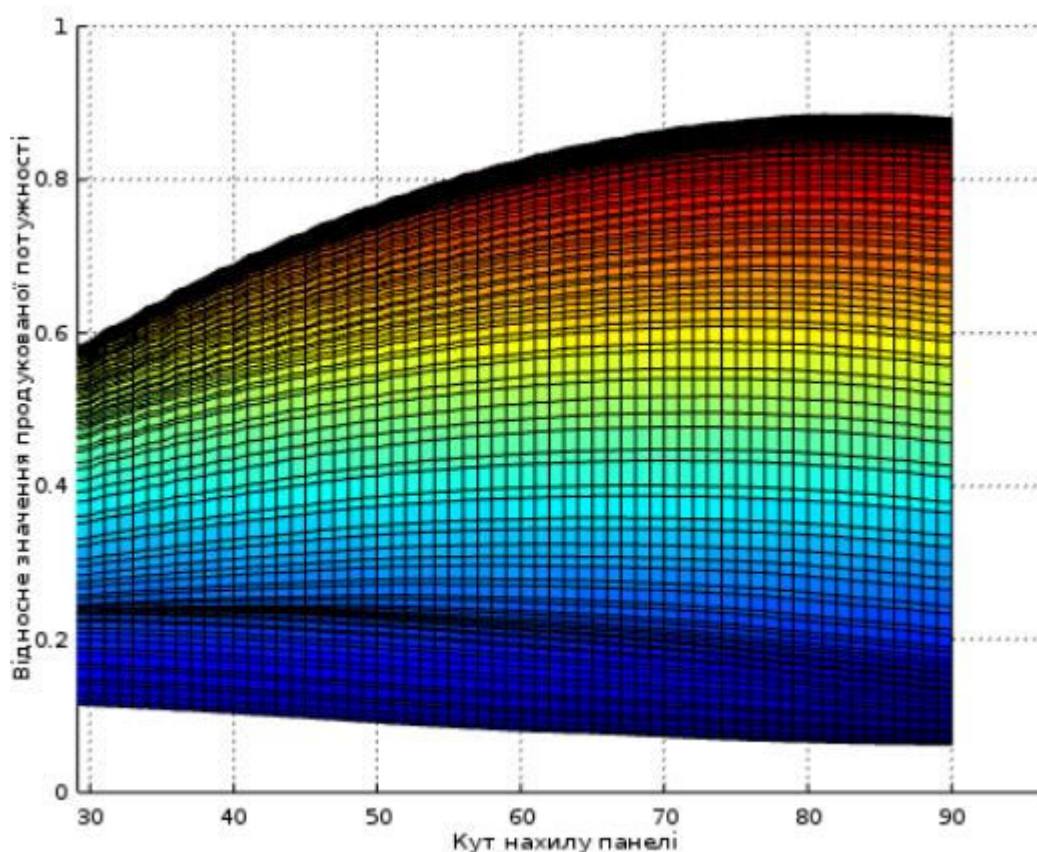


Рисунок Г.6 Фрагмент поверхні образу 3 на зближенні

При цьому слід позначити, що за максимум результатів методів при пошуку в образах 1 і 2, образ 3 хоча і має високий відсоток промахів (приблизно 0,84 проти 0,56 відповідно), однак середня евклідова відстань між знайденим локальним максимумом та глобальним максимумом при пошуку на образі 2 становила близько 3,3 ступеня проти 18 на освіту 1. Це означає, що попри непопадання в поточний глобальний максимум, методи дозволили знайти значення, яке локальне знаходилося неподалік від нього.

Вольт-амперної характеристики сонячної панелі

При розробці інтелектуального методу з трекера були зняті вольт-амперні характеристики сонячної панелі при різній освітленості: в умовах яскравого сонячного світла, хмарності, різних кутах нахилах. Наведемо таблиці залежностей ВАХ при яскравому сонячному випромінюванні і різними умовами, де:

1. $Im1$ - площа сонячної батареї перпендикулярна Сонцю;
2. $Im2$ - площа сонячної батареї перпендикулярна до Сонця і батарея знаходиться за склом;
3. $Im3$ - між сонячним випромінюванням і площиною сонячної батареї 60 градусів;
4. $Im4$ - між сонячним випромінюванням і площиною сонячної батареї 60 градусів і батарея знаходиться за склом.

Наведемо таблиці залежностей ВАХ при яскравому сонячному випромінюванні і різними умовами, де $Im1$ - площа сонячної батареї перпендикулярна Сонцю; $Im2$ - площа сонячної батареї перпендикулярна до Сонця і батарея знаходиться за склом; $Im3$ - між сонячним випромінюванням і площиною сонячної батареї 60 градусів; $Im4$ - між сонячним випромінюванням і площиною сонячної батареї 60 градусів і батарея знаходиться за склом.

Таблиця Г.7 – ВАХ сонячної батареї за умов l_{m1} і l_{m2}

R, Ом	l_{m1}			l_{m2}		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6.7	0.83	125	103	0.7	104	71
44.7	5.21	117	606	4.22	95	396
110.4	9.85	90	878	6.64	79	674
252.7	12.86	52	654	12.02	48	571
477	13.31	29	372	12.28	37	443

Таблиця Г.8 – ВАХ сонячної батареї за умов l_{m1} і l_{m2}

R, Ом	l_{m3}			l_{m4}		
	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
6.7	0.8	95	103	0.7	85	71
44.7	5.1	80	606	4.22	68	396
110.4	8.4	70	878	6.64	57	674
252.7	11.94	42	654	12.02	35	571
477	12.21	19	372	12.28	10	443

Проінтерполюємо знайдені значення і представимо отримані ВАХ у вигляді графіка на рисунку Г.7.

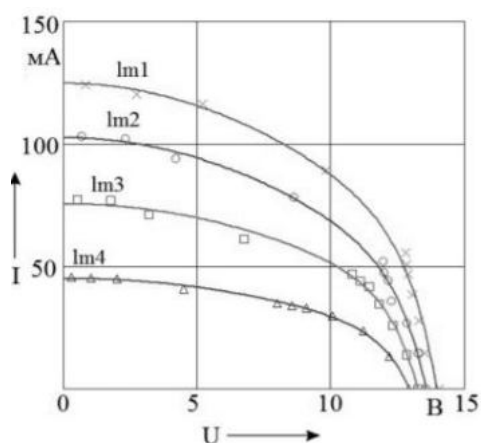


Рисунок Г.7 – ВАХ сонячної батареї при різних освітленості

В результаті інтерполяції була використана формула, яка визначає функції ВАХ сонячної батареї:

$$f(u, K) = K_0 + K_1 e^u + K_2 u^2 \quad (\Gamma.2)$$

Де U - напруга сонячної батареї;

K_0 - K_2 коефіцієнти інтерполяції.

Можемо зробити висновок про те, що сонячна батарея втрачає 20-25% потужності, якщо розташувати її за склом, яке буде відбивати частину сонячного випромінювання. Більший кут між площиною сонячної батареї і сонячним випромінюванням відповідно також зменшує енергетичне вироблення. Проінтерполюємо і представимо графік залежності потужності СБ від опору навантаження $P(R)$ на рисунку $\Gamma.3$. Для спрощення задачі знаходження кривих $P(R)$ скористаємося методом інтерполяції сплайнами, як швидким і ефективним способом інтерполяції функцій. При яскравому сонячному світлі в разі $Im1$ навантаження в 110,4 Ом показує найбільшу потужність, але для проведення основного експерименту і для подальшої експлуатації пристрою встановимо навантаження в 230 Ом. З даним навантаженням трекер буде видавати потрібну генерацію електроенергії в умовах хмарності, а також буде краще реагувати в приміщеннях при штучному освітленні. Зняті залежності (особливо розрахована залежність потужності СБ від опору) показово демонструють, що в залежності від навантаження робоча точка сонячної батареї може бути зрушена в область мінімальної або навіть нульової генерації. Внаслідок цього важливим моментом є узгодження сонячної батареї з навантаженням.