

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Медвідь Владислав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.311.243
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення алгоритму вимірювання рівня сонячної радіації для прогнозування
генерації електроенергії

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело**

Здобувач освітнього ступеня В.О. Медвідь
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Цих Віталій Сергійович, канд. техн. наук, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)
прізвище)

(підпис) (дата) (ініціали та

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Автоматизації та енергетики

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Медвідь Владислав Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення алгоритму вимірювання рівня сонячної радіації для прогнозування генерації електроенергії

керівник роботи Цих Віталій Сергійович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “29” квітня 2025 року № 268/7

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічні та метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки для вимірювання сонячної радіації

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Дослідити поняття вимірювання сонячної радіації, проаналізувати наявні прилади для вимірювання сонячної радіації та провести їх кваліметричну оцінку, розробити алгоритм підбору приладу для вимірювання рівня сонячної радіації та підкріпити це програмним продуктом для оптимізації вибору такого обладнання.

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

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Нормоконтроллер | доцент Яворський А.В. | | |
| Перевірка на плагіат | доцент Миндюк В.Д. | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 29.04.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів бакалаврської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1 | Видача завдання (відповідно до наказу). | 29.04.2025 | |
| 2 | Розроблення 1 розділу: Аналіз особливостей вимірювання рівня сонячної інсоляції при проектуванні сонячних електростанцій | 03.05.2025 | |
| 3 | Розроблення 2 розділу: Дослідження показників якості піранометрів з використанням методу кваліметрії | 15.05.2025 | |
| 4 | Розроблення 3 розділу: Розроблення алгоритму вибору засобу вимірювання сонячної радіації та його програмна реалізація | 29.05.2025 | |
| 5 | Оформлення бакалаврської роботи | 04.06.2025 | |
| | | | |
| | | | |

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ін)

АНОТАЦІЯ

Медвідь В.О. «Розроблення алгоритму вимірювання рівня сонячної радіації для прогнозування генерації електроенергії». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2025.

У даній бакалаврській роботі досліджено сучасні підходи до використання сонячної енергії з акцентом на принципи роботи та класифікацію фотоелектричних модулів. Розкрито фізичні основи перетворення сонячної енергії в електричну, охарактеризовано основні типи модулів за конструкцією, матеріалами та ефективністю. Особливу увагу приділено вивченню характеристик сонячної радіації та методам її вимірювання, зокрема за допомогою актинометрів, піранометрів і піргеліометрів. Проведено критичний аналіз функціональних можливостей цих приладів, що дозволило визначити найбільш ефективні з них для практичного використання.

У рамках дослідження здійснено порівняльну оцінку технічних параметрів засобів вимірювання, сформовано таблиці ефективності та якості з акцентом на перевагах піранометрів, як найпридатніших приладів для комплексного контролю сонячної радіації. На основі отриманих висновків розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати процес підбору вимірювального обладнання відповідно до конкретних умов та технічних потреб користувача, що підвищує точність та ефективність впровадження сонячних електростанцій.

Ключові слова: вимірювання, сонячна радіація, піранометр, актинометр, піргеліометр, кваліметрія, алгоритм, програмний продукт.

ABSTRACT

Medvid V.O. "Development of an algorithm for measuring solar radiation levels for electricity generation forecasting." Bachelor's thesis – manuscript copy. Specialty – 152 "Metrology and information-measuring technology." – Ivano-Frankivsk, 2025.

This bachelor's thesis explores modern approaches to the use of solar energy, with an emphasis on the operating principles and classification of photovoltaic modules. It outlines the physical principles of converting solar energy into electricity and characterizes the main types of modules based on design, materials, and efficiency. Special attention is given to the study of solar radiation characteristics and its measurement methods, particularly using actinometers, pyranometers, and pyrhelimeters. A critical analysis of the functional capabilities of these instruments was conducted, enabling the identification of the most effective devices for practical application.

As part of the research, a comparative evaluation of the technical parameters of measurement tools was performed, with efficiency and quality tables compiled, highlighting the advantages of pyranometers as the most suitable instruments for comprehensive solar radiation monitoring. Based on the findings, software was developed to automate the process of selecting measurement equipment according to specific conditions and technical user requirements, thereby improving the accuracy and efficiency of implementing solar power plants.

Keywords: measurement, solar radiation, pyranometer, actinometer, pyrhelimeter, qualimetry, algorithm, software product.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ..... | 10 |
| 1.1 Особливості прогнозування генерації електроенергії СЕС..... | 10 |
| 1.1.1. Структура СЕС та особливості роботи..... | 10 |
| 1.1.2. Основні дані, необхідні для прогнозування генерації СЕС..... | 12 |
| 1.1.3. Ефективність роботи сонячних фотомодулів..... | 13 |
| 1.1.3.1. Фізичні основи перетворення сонячної радіації в е/е..... | 13 |
| 1.1.3.2. Аналіз різних видів сонячних фотомодулів і їх рівня ефективності..... | 14 |
| 1.2. Визначення рівня сонячної інсоляції..... | 16 |
| 1.2.1. Сонячна радіація, випромінювання, інсоляція..... | 16 |
| 1.2.2. Обладнання, яке використовується для вимірювання інсоляції.... | 17 |
| 1.2.2.1. Піранометри..... | 17 |
| 1.2.2.2. Піргеліометри..... | 20 |
| 1.2.2.3. Актинометри..... | 22 |
| 1.3. Постановка задачі дослідження..... | 26 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПІРАНОМЕТРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КВАЛІМЕТРІЇ..... | 27 |
| 2.1 Аналіз піранометрів. Основні характеристики. Поділ піранометрів.... | 27 |
| 2.2 Кваліметрія. Оцінювання комплексного показника якості піранометрів різних груп..... | 30 |
| 2.3. Опитування фахівців щодо основних критеріїв вибору ЗВТ для вимірювання рівня сонячної інсоляції..... | 36 |
| Висновки до розділу 2..... | 40 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ ТА ЙОГО ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 3.1. Умови розроблення алгоритму для вибору засобу вимірювання сонячної радіації..... | 41 |
| 3.2. Формування програми в Python по спрощеному підбору ЗВТ..... | 42 |
| Висновки до розділу 3..... | 46 |
| ВИСНОВКИ..... | 47 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 48 |
| ДОДАТКИ..... | 53 |
| Додаток А..... | 53 |
| Додаток Б..... | 54 |
| Додаток В..... | 56 |

ВСТУП

Актуальність роботи.

У сучасних умовах глобального потепління, енергетичної кризи та зростаючого попиту на екологічно чисті джерела енергії використання сонячної енергії набуває все більшої актуальності. Сонячні електростанції є одним із ключових елементів сталого розвитку енергетики, що дозволяє зменшити залежність від викопного палива, зменшити вартість енергоресурсів та суттєво скоротити викиди парникових газів. У зв'язку з цим інтеграція сонячної енергетики в енергетичну систему країни є важливим напрямом розвитку.

Проте ефективність роботи СЕС значною мірою залежить від рівня сонячної радіації, який є змінним у часі та просторі під впливом багатьох факторів – таких як хмарність, атмосферна вологість, сезонність, географічне розташування та навіть локальні особливості ландшафту. Тому для забезпечення стабільного, надійного та економічно обґрунтованого прогнозування виробітку електроенергії необхідне отримання достовірних даних про рівень сонячної радіації.

Отримання таких даних можливе лише за умови використання сучасних високоточних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які здатні реєструвати інтенсивність сонячного випромінювання з високою точністю у режимі реального часу. Проте вибір конкретного типу ЗВТ залежить не лише від технічних характеристик приладу, але й від умов його експлуатації: кліматичних особливостей регіону, наявності пилу чи вологи, температурних коливань, режиму роботи установки (стаціонарна чи мобільна), частоти вимірювань, необхідного рівня точності, а також вартості обслуговування. Неправильно підібраний засіб вимірювання може суттєво спотворити результати, що унеможливить ефективне прогнозування.

Таким чином, проблема створення алгоритму для точного вимірювання та аналізу рівня сонячної радіації є надзвичайно актуальною. Вона спрямована на підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій, забезпечення

точного прогнозування енергогенерації та формування надійних рішень у сфері відновлюваної енергетики.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є аналіз і застосування сучасних засобів вимірювання сонячної інсоляції для прогнозування виробітку електроенергії сонячною електростанцією, а також розроблення програмного інструменту для підбору ЗВТ під конкретні кліматичні та технічні умови.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

- провести аналіз особливостей вимірювання сонячної радіації;
- дослідити типи ЗВТ для вимірювання рівня сонячної радіації;
- оцінити точність та придатність ЗВТ для різних умов експлуатації;
- розробити алгоритм підбору ЗВТ для вимірювання інсоляції;
- здійснити тестування розробленого програмного продукту.

Об'єкт дослідження

Процес вимірювання рівня сонячної радіації при проектуванні сонячних електростанцій.

Предмет дослідження

Засоби вимірювальної техніки для визначення рівня сонячної радіації та методи їх підбору відповідно до умов експлуатації.

Методи дослідження

У роботі використано методи системного аналізу, кваліметрії, моделювання, порівняльного аналізу технічних характеристик приладів, а також програмної реалізації алгоритмів підбору ЗВТ.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблений програмний продукт може бути використаний фахівцями в галузі відновлюваної енергетики для оперативного і точного вибору ЗВТ під час проектування та експлуатації сонячних електростанцій, що сприятиме підвищенню ефективності енергетичних систем.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Особливості прогнозування генерації електроенергії СЕС

1.1.1 Структура СЕС та особливості роботи

Сонячна електростанція – це система (рис. 1.1), яка складається з кількох компонентів та системи накопичення, разом із фотомодулями та інвертором. Ця технологія уловлює енергію сонячного випромінювання та трансформує її в електричний струм. Далі отриманий постійний струм проходить через інвертор, де він конвертується у змінний, придатний для живлення побутових електропристроїв.

Сонячні панелі – основні складові станції, зроблені з численних комірок, що включають напівпровідниковий матеріал. Вони якраз і перетворюють енергію світла на електричну енергію. Інвертор також є важливим елементом СЕС. Беручи до уваги принцип роботи такої електростанції, струм, що виробляється є постійним, отже він не годиться для живлення приладів, тому його необхідно спочатку трансформувати на змінний – саме це завдання виконує інвертор. В залежності від компонентів та мети встановлення станції, вона здатна як задовольняти потреби споживача, так і передавати надлишок електроенергії в загальну мережу [1].



Рисунок 1.1 – Схема типової сонячної електростанції [2].

Існує три основні типи сонячних батарей: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові (рис. 1.2). Проте ці категорії не завжди чітко відрізняються, адже деякі сонячні елементи можуть належати до кількох груп одночасно. Основний тип – кристалічні сонячні елементи, які можуть бути виготовлені з монокристалів або полікристалічного матеріалу. Саме за цією технологією було створено перші сонячні батареї. Зараз близько 80% сонячних батарей на ринку є кремнієвими елементами цього типу. Зазвичай ефективність кристалічного сонячного елемента становить приблизно 20%. Полікристалічні елементи часто дешевші, але трохи менш ефективні, ніж монокристалічні [3]. Ознайомившись із поняттям сонячних електростанцій, варто розібратись які дані необхідні при роботі із такими системами.

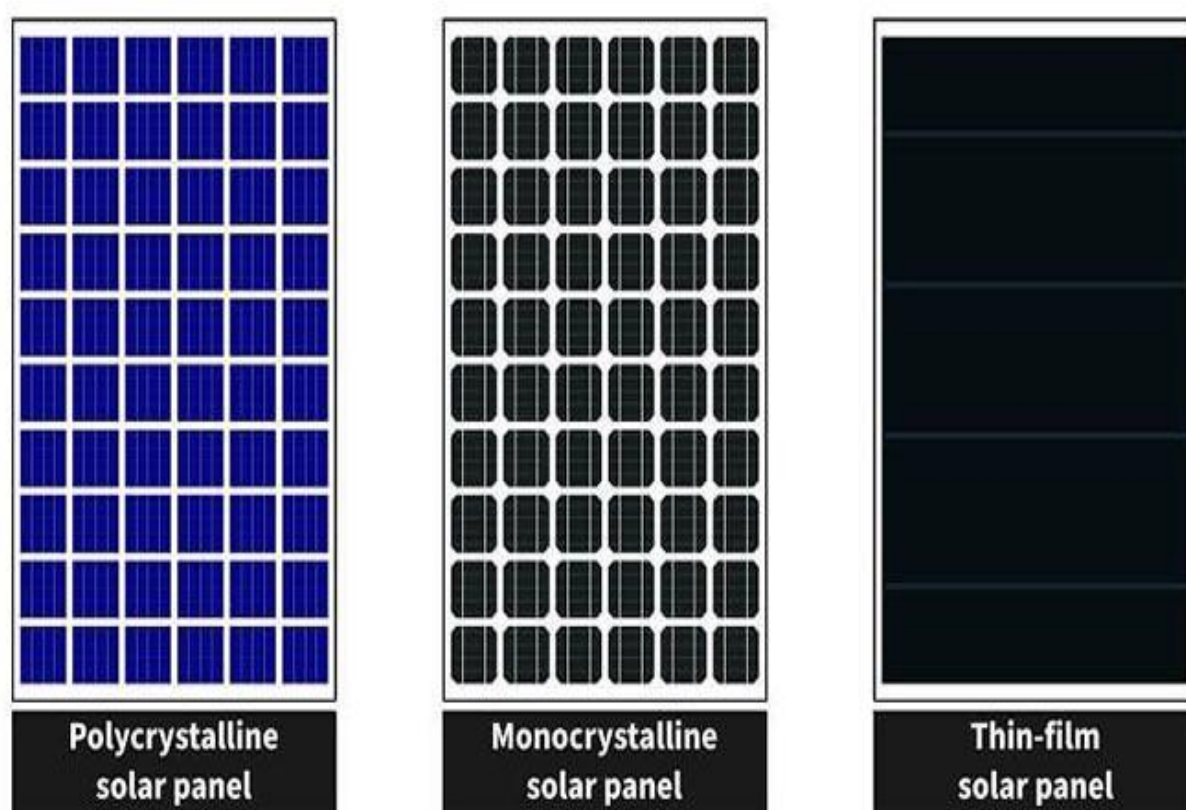


Рисунок 1.2 – Типи сонячних панелей: полікристалічні, монокристалічні, тонкоплівкові (зліва-направо) [4].

1.1.2 Основні дані, необхідні для прогнозування генерації СЕС

Перш ніж встановлювати сонячну електростанцію (СЕС), важливо зібрати й проаналізувати основну інформацію, яка впливає на її ефективність. Прогнозування генерації електроенергії дає змогу оцінити, скільки енергії зможе виробляти станція в реальних умовах, і чи буде цього достатньо для задоволення потреб споживача.

Аналізуючи статті [5] та [6] варто зазначити що перед встановленням станції потрібно зібрати кілька важливих даних, які допоможуть оцінити, скільки енергії вона зможе виробляти. Усе починається з вибору місця. Найкраще, якщо панелі будуть розміщені там, де багато сонця, і ніщо не затіняє їх протягом дня – ні дерева, ні будинки. Також потрібно подивитися, чи дах або ділянка придатні для монтажу – чи витримають вагу панелей і чи вистачає площі.

Ще один ключовий момент – це рівень сонячного світла в цьому регіоні, тобто інсоляція. Дані про це можна знайти в метеорологічних службах або онлайн-сервісах. Чим більше сонця протягом року – тим більше енергії ви отримаєте. Але не треба забувати, що в Україні погода змінна, тому завжди краще враховувати середні значення за кілька років. Коли вже зрозуміло, де і скільки сонця буде, потрібно подумати про потужність станції. Це залежить від того, скільки електрики ви споживаєте вдома чи на підприємстві. Варто подивитися рахунки за світло за останній рік – це допоможе оцінити середнє споживання. Потім підбирають обладнання: сонячні панелі, інвертор, а якщо потрібно – ще й акумулятори для зберігання енергії.

Підсумовуючи, варто вказати, що дуже важливо не просто купити «максимально потужну» станцію, а підібрати її під реальні потреби. Бо якщо встановити надто сильну – це зайві витрати. Якщо ж потужності буде замало, доведеться знову все переробляти. Також слід подумати наперед – чи будете в майбутньому підключати ще якісь прилади, наприклад, електрочайник чи зарядку для авто.

1.1.3 Ефективність роботи сонячних фотомодулів

1.1.3.1 Фізичні основи перетворення сонячної радіації в е/е

Серед різноманіття джерел відновлюваної енергії, сонячна енергія вирізняється своєю доступністю, екологічністю та невичерпністю. У сучасних умовах переходу до сталого розвитку та «зеленої» енергетики вона посідає провідне місце. Основи фізичних процесів, які лежать в основі перетворення сонячного випромінювання в електроенергію, ґрунтуються на явищі, відомому як фотоэффект. Це фізичне явище було обґрунтовано Альбертом Ейнштейном на початку ХХ століття, за що він отримав Нобелівську премію [7].

Розглянемо процеси, що відбуваються в напівпровідниковому переході під час його роботи як фотоелемента (сонячного елемента) при освітленні. Фотоэффект полягає в тому, що під дією світла фотони передають свою енергію електронам. Якщо енергія фотона перевищує роботу виходу електрона з атома, електрон вивільняється, що створює умови для виникнення електричного струму.

У фотоелектричних елементах, які виготовляють переважно з напівпровідникових речовин (найчастіше з кристалічного кремнію), цей процес дозволяє перетворювати сонячну енергію на електричну. При цьому утворюється електрон-діркова пара – електрон переходить у зону провідності, залишаючи після себе дірку в валентній зоні.

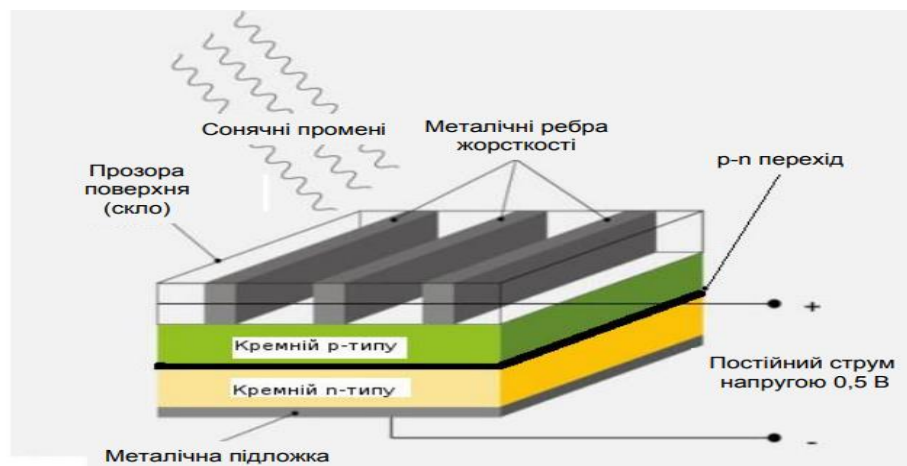


Рисунок 1.3 – Схематична конструкція фотомодуля [8].

Сучасні фотогальванічні модулі, які широко застосовуються у сфері відновлюваної енергетики, переважно побудовані на основі р-п переходу – межі між двома типами напівпровідникових матеріалів. Напівпровідники р-типу характеризуються наявністю дірок – відсутніх електронів у кристалічній решітці, тоді як n-тип містить надлишок вільних електронів. Ця межа створює внутрішнє електричне поле, що сприяє розділенню носіїв заряду. Коли сонячне світло збуджує атоми напівпровідника, утворюються електрон-діркові пари. Вбудоване електричне поле переходу спрямовує електрони до шару з n-провідністю, а дірки – до шару з р-провідністю. Якщо до фотоелемента під'єднане зовнішнє електричне коло, ці носії заряду формують постійну електричну напругу і струм, який може бути використаний для живлення електричних приладів або накопичення енергії. Коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелемента визначається здатністю матеріалу перетворювати поглинену світлову енергію в електричну. На цей показник впливають багато чинників: спектральний склад сонячного випромінювання, кут падіння променів, температура елемента, а також фізико-хімічні властивості використаних матеріалів. Традиційні кремнієві сонячні батареї демонструють ККД у межах 15–22%. Проте застосування інноваційних технологій, таких як багатошарові перетворювачі, дозволяють суттєво підвищити ефективність пристроїв – у деяких випадках до понад 40% [9].

1.1.3.2 Аналіз різних видів сонячних фотомодулів і їх рівня ефективності

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячної панелі показує, яку частину сонячного світла вона здатна перетворити на електроенергію. Тобто, якщо на панель потрапляє певна кількість сонячного випромінювання, ККД покаже, скільки з нього «перетвориться» в струм, а не втратиться у вигляді тепла чи відбиття. Завдяки розвитку технологій останніми роками, ефективність таких панелей значно зросла – якщо раніше середній показник був близько 15%, то зараз часто можна побачити панелі з ефективністю понад 20%. Це дуже важливо, бо завдяки цьому сучасні панелі можуть виробляти більше енергії з тієї ж самої площі. Раніше стандартна панель мала потужність 250 Вт, а тепер – 400 Вт і

навіть більше. Ефективність залежить не тільки від якості самої кремнієвої основи, а й від того, як саме зібрана панель: як розміщені окремі сонячні елементи, який розмір має панель, чи є проміжки між елементами. Ще один момент – чим більша площа панелі, тим більше сонця вона зловить, а отже, і більше електроенергії згенерує. На сьогодні існують моделі, які можуть видавати до 700 Вт [10].

Найвищий рівень ефективності мають монокристалічні модулі – їх показники коливаються від 18% до 22%. Це означає, що майже п'яту частину енергії, яку вони отримують від сонця, вони можуть перетворити на електроенергію. Такі панелі зроблені з одного суцільного кристалу кремнію, що забезпечує рівномірне поглинання світла. Вони займають менше місця, але коштують дорожче. Їх часто обирають для приватних будинків, де площа обмежена, а надійність важлива. Полікристалічні модулі дешевші у виробництві, але й менш ефективні – зазвичай 15–17%. Вони мають синюватий колір і складаються з багатьох кристалів кремнію, що трохи знижує їх здатність вловлювати світло. Зате завдяки нижчій ціні ці панелі часто використовують у великих комерційних СЕС, де площа не є проблемою. Більш новим і цікавим варіантом є тонкоплівкові модулі. Вони не мають кристалічної структури, дуже тонкі й гнучкі, а також краще працюють у розсіяному світлі чи в затінку. Їх ефективність зазвичай нижча – близько 10–13%, але вони легші та підходять для нестандартних конструкцій, наприклад, фасадів будівель або дахів із малою несучою здатністю [11].

На основі цієї інформації варто зазначити, що кожен тип сонячних панелей має своє призначення. Після аналізу ефективності приходиться усвідомлення, що монокристалічні модулі – найкращий варіант, оскільки можна отримати максимум енергії з обмеженої площі. Вони дорогі, але й ефективні, особливо коли важливий стабільний результат. На наступній стадії доцільно буде розібрати питання інсоляції – яка так важлива при роботі із СЕС.

1.2 Визначення рівня сонячної інсоляції

1.2.1 Сонячна радіація, випромінювання, інсоляція

Сонце є головним джерелом енергії, оскільки у його надрах безперервно відбуваються термоядерні реакції, виділяючи величезну кількість енергії. Ця енергія досягає нашої планети у вигляді світла та тепла, що підтримує життя і визначає погодні умови на планеті. Сонячне випромінювання (схема рис 1.4) – це складне явище, яке охоплює широкий спектр електромагнітних хвиль: від довгих радіохвиль до короткохвильового ультрафіолету, рентгенівських та гамма-променів. Варто зазначити, що термін «радіація» охоплює весь цей спектр, хоча в побуті ним часто називають лише іонізуючі типи випромінювання [11].

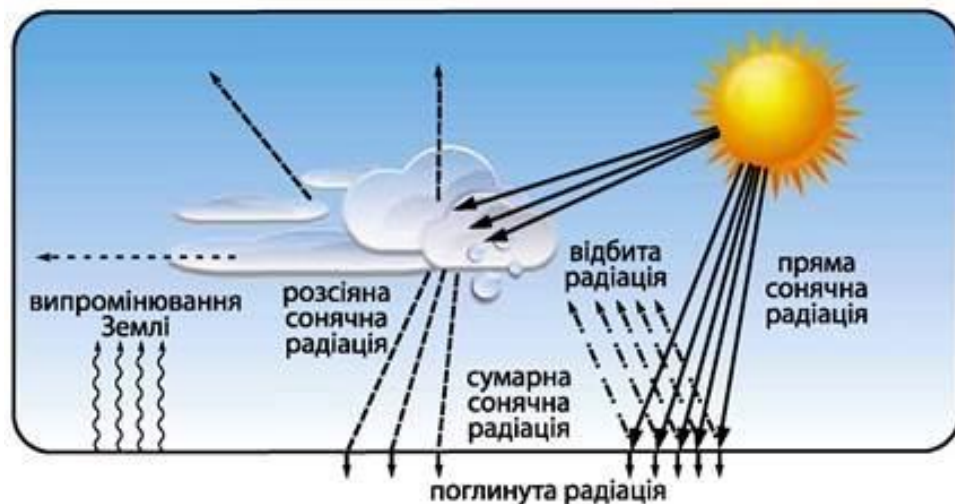


Рисунок 1.4 – Схема поширення сонячної радіації в атмосфері [12].

Радіація, яка досягає поверхні Землі, може мати як прямий, так і розсіяний характер. Її шлях до поверхні планети проходить крізь численні природні бар'єри: озоновий шар, атмосферні хмари, водяну пару, а також дрібнодисперсний пил. Ці елементи здатні змінювати напрямок поширення сонячного випромінювання, зменшуючи його інтенсивність і перетворюючи частину енергії на розсіяну. Пряма радіація – це енергія, яка потрапляє на Землю у вигляді пучка променів, що надходять безпосередньо від сонця, без значних змін напряму. Вона найбільш відчутна у ясну погоду і має сильніший вплив на

живі організми. Розсіяна радіація – це та, що розсіялась в атмосфері, вона надходить на земну поверхню з усього небесного середовища. У хмарні дні вона є фактично єдиним джерелом енергії у приземних шарах атмосфери. В свою чергу, сумарна сонячна радіація – це поєднання прямої та розсіяної, яка надходить у природніх умовах на поверхню землі. [13]

І тут постає поняття інсоляції, яке є тісно пов'язаним із сонячною радіацією. Якщо радіація описує сам процес та джерела надходження енергії, то інсоляція – це вже конкретний показник: кількість сонячної радіації, що потрапляє на 1 м² поверхні Землі за певний час. Інсоляція відображає кількість генерованої обладнанням енергії за певну одиницю часу. Цей показник є важливим для продуктивності роботи системи. Необхідно правильно зпроектувати систему електростанції. Коефіцієнт сонячної інсоляції залежить від рельєфу землі, на якій розташовано станцію. Рівень затінення теж варто враховувати. Знаючи, що таке інсоляція та розуміючи її властивості, варто дослідити, які прилади доцільно використати для її вимірювання [14].

1.2.2 Обладнання, яке використовується для вимірювання інсоляції

1.2.2.1 Піранометри

Піранометр (фотоелектричний) – це тип радіометра, який використовується для вимірювання широкосмугового сонячного випромінювання на плоскій поверхні. Щоб зрозуміти основне джерело надходження енергії, необхідні точні вимірювання сонячного опромінення. Такий апарат здатен фіксувати щільність потоку сонячного випромінювання в ватах на квадратний метр (Вт/м²) з усієї верхньої півсфери [15].

Піранометри вимірюють глобальне опромінення: кількість сонячної енергії на одиницю площі на одиницю час, що падає на поверхню певної орієнтації що виходить із напівсферичного поля зору. У сонячній енергетиці піранометри використовуються для моніторингу продуктивності фотоелектричних електростанцій шляхом порівняння реальної генерації та очікуваної генерації на

основі показів піранометра. Фотоелектричний піранометр зазвичай складається з кремнієвого фотодіода, який перетворює сонячне випромінювання в електричний струм. Згодом електричний струм перетворюється на сигнал напруги, який можна використовувати для розрахунку сонячного опромінення. Прилад (рис. 1.5) спеціально розроблений, щоб вимірювати щільність потоку сонячного випромінювання (у ватах на квадратний метр). Датчик, пофарбований чорною фарбою, поміщається під прозорий скляний або ковпак для захисту від зовнішнього впливу. Стандартний піранометр не вимагає живлення [16].



Рисунок 1.5 – Сучасний піранометр SMP21 [17].

Такі піранометри, коли вони встановлені горизонтально, можуть реєструвати сонячне випромінювання з усієї видимої частини неба. Щоб прилад працював правильно, його слід розміщувати на відкритому місці, де немає тіней або перешкод, що закривають сонце. У деяких ситуаціях піранометр встановлюють під кутом – наприклад, щоб виміряти сонячне світло на похилій поверхні, як це буває на сонячних панелях. Якщо ж прилад перевернути догори дном, він зможе фіксувати світло, відбите від землі, що важливо для оцінки альбедо – здатності поверхні відбивати світло.

Основний сенсор піранометра розміщується під прозорим куполом, який роблять із кварцового скла або іншого матеріалу, що добре пропускає світло. Купол захищає чутливий елемент і допомагає отримати точні результати. Деякі

моделі мають вбудовану вентиляцію: вентилятори створюють потік повітря, який іноді підігривають. Це дозволяє уникнути запотівання, обмерзання та забруднення сенсора пилом [18].

Для оцінки рівня сонячної радіації в умовах відсутності прямого сонячного випромінювання також може застосовуватися спеціалізоване вимірвальне обладнання – дифузометр (рис. 1.6). Цей пристрій являє собою комбінацію стандартного піранометра та механізму затінення, що дозволяє відокремити дифузну (розсіяну) складову сонячного світла. Основною функцією затінювальної системи є блокування прямих сонячних променів, завдяки чому до чутливого елемента приладу надходить виключно розсіяне випромінювання. Для досягнення цього ефекту використовуються різні типи затінювальних елементів, вони розміщуються таким чином, щоб утворювати стабільну тінь. Щоб забезпечити точність вимірювань, положення затінювача має постійно коригуватись відповідно до положення Сонця на небосхилі. Отже, піранометри є доволі надійними та високоточними приладами для вимірювання рівня сонячної радіації, проте такі системи є недешевими та залежними від погодніх умов.



Рисунок 1.6 – Кремнієвий дифузометр (піранометр) [19].

1.2.2.2 Піргеліометри

Піргеліометр (див. рис. 1.7) є високоточним вимірювальним приладом, призначеним для реєстрації прямої сонячної радіації, що потрапляє на поверхню, орієнтовану строго перпендикулярно до напрямку на Сонце. Цей інструмент застосовується, коли необхідно оцінити лише пряму компоненту сонячного випромінювання, без урахування розсіяного світла. На відміну від піранометра, який фіксує сумарне (пряме + розсіяне) сонячне випромінювання на горизонтальній або нахиленій площині, піргеліометр дозволяє ізолювати виключно пряму радіацію [20].



Рисунок 1.7 – Вигляд піргеліометра DR01 (Hukseflux). [21]

Конструкція піргеліометра (рис. 1.8) передбачає використання двох ідентичних тонких манганінових пластин, розташованих у приймальній головці приладу. Одна з пластин залишається відкритою до сонячного випромінювання, а інша – затінена. Зі зворотного боку обидві пластини ізолювані й оснащені термоелементом, утвореним парою мідь–константан. Принцип роботи піргеліометра полягає у порівнянні теплового ефекту, що виникає при поглинанні сонячної енергії. Коли обидві пластини перебувають під однаковими умовами освітлення, їх температура вирівнюється, і електричний сигнал від термопари відсутній. У разі, якщо лише одна з пластин піддається дії сонячного світла, виникає різниця температур, яка фіксується у вигляді термоЕРС

(електрорушійної сили). Щоб визначити потужність сонячної радіації, до затіненого елемента підводиться електричний струм, який підігріває його до температури освітленої пластини. Струм, необхідний для досягнення теплового балансу, пропорційний величині поглинутої сонячної енергії. Відповідно, покази гальванометра слугують основою для обчислення інтенсивності прямого сонячного випромінювання [22]. Варто виділити основні переваги та недоліки приладів такого типу, нажаль, вони не вимірюють розсіяну радіацію, а також є доволі складними у використанні та обслуговуванні, проте піргеліометри є точними, стабільними та часто використовуються як еталонні.

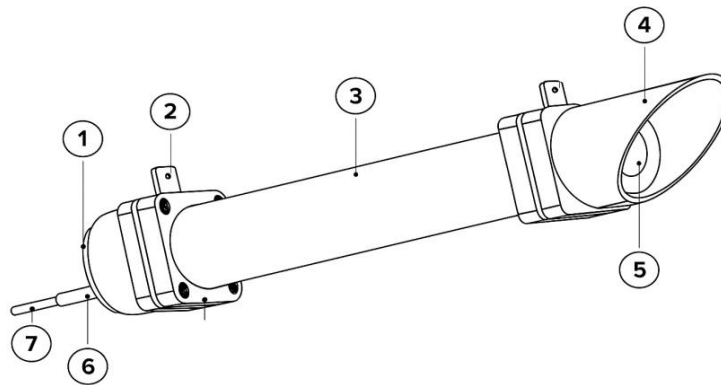


Рисунок 1.8 – Будова піргеліометра: (1) індикатор вологості, (2) приціл, (3) корпус, (4) захисний ковпак, (5) обігрівач із захисним склом, (6) електричний роз'єм, (7) провід [21].

Піргеліометри розрізняються в залежності від датчика, який вони використовують. Три основні види піргеліометрів:

- Термопарні піргеліометри. Ці пристрої функціонують на основі термопар, які фіксують різницю температур між чутливим елементом та навколишнім середовищем. Вони забезпечують високу точність вимірювань та оперативне реагування на зміни рівня сонячної радіації, що робить їх ефективними для наукових досліджень.
- БолOMETричні піргеліометри. Такі прилади працюють за принципом зміни електричного опору матеріалу залежно від температури. Вони

демонструють виняткову чутливість до навіть незначних змін випромінювання, хоча їх реакція трохи повільніша, ніж у термопарних аналогів.

- Піргеліометри з фотоелектричними елементами. Ці моделі перетворюють сонячну енергію безпосередньо в електричний сигнал за допомогою кремнієвих фотоелементів. Вони відзначаються доступністю, довговічністю та стабільною роботою, хоча за рівнем точності можуть поступатися іншим видам піргеліометрів, особливо в умовах змінної освітленості [20].

1.2.2.3 Актинометри

Актинометр – це прилад, призначений для вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання, зокрема прямого сонячного потоку. Цей прилад широко використовується в метеорології, а також входить до складу обладнання космічних апаратів і планетарних зондів. Сучасні моделі оснащуються автоматизованими системами орієнтації на Сонце, що забезпечує точність вимірювань протягом усього світлового дня. Принцип роботи актинометра базується на перетворенні енергії сонячного випромінювання у фізичні величини, які можна виміряти: фотострум у напівпровідниках, електричну поляризацію в піроелектричних матеріалах, або тепловий ефект у термопарах, болометрах та фоторезисторах [23].

Для ознайомлення та порівняння ми розглянули актинометр типу ЛІОТ-Н (рис. 1.11), який був одним із перших подібних приладів, а також більш сучасний варіант – актинометр Савінова–Янишевського (рис. 1.9). Це один із найвідоміших прикладів, який використовується для вимірювання прямої сонячної радіації.



Рисунок 1.9 – Актинометр Савінова–Янишевського [24].

Актинометр встановлюється на спеціально підготовленому майданчику метеорологічної станції або на горизонтальній поверхні, правильно орієнтованій за географічною широтою місцевості та напрямком на південь. Важливою умовою для точних вимірювань є правильне розміщення приймального елемента – диска (рис. 1.10), який повинен бути спрямований перпендикулярно до сонячних променів, тобто під прямим кутом до напрямку сонячного випромінювання. Під час експлуатації пристрій реєструє кількість сонячної енергії, що поглинається поверхнею диска. Унаслідок цього центральна частина термобатарей, де знаходяться термоспаї, нагрівається, тоді як периферійні ділянки залишаються відносно холодними, оскільки не зазнають прямої дії сонячного світла. Такий температурний градієнт створює термоелектричний струм. Цей струм передається до гальванометра – високочутливого вимірювального приладу, який фіксує зміну електричного сигналу. На основі цих показників обчислюється інтенсивність сонячної радіації. Таким чином, актинометр здійснює перетворення енергії світла на електричний сигнал, що дозволяє отримувати точні дані для метеорологічного аналізу та кліматичних досліджень [22].

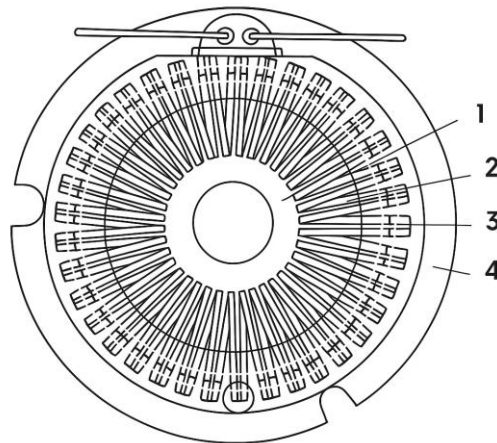


Рисунок 1.10 – Диск актинометра [22].

У рамках подальшого аналізу було розглянуто особливості приладу ЛІОТ-Н, який спочатку розроблявся для задач промислової гігієни, зокрема контролю теплових умов праці. Проте, завдяки своїй універсальній конструкції, цей актинометр знайшов друге життя у сфері сонячної енергетики. ЛІОТ-Н здатен вимірювати інтенсивність теплового випромінювання, що надходить як на горизонтальні, так і на похилі поверхні, що робить його корисним у попередньому аналізі потенціалу сонячної генерації. Незважаючи на дещо обмежену точність у порівнянні з сучасними радіометрами, прилад виявляється надзвичайно корисним у польових умовах, особливо коли доступ до високотехнологічного обладнання обмежений.

Його можна ефективно застосовувати на етапах планування розміщення фотоелектричних модулів, під час експрес-оцінки сонячного ресурсу на місцевості або при моніторингу змін кліматичних умов з метою довгострокового енергетичного прогнозування. Таким чином, ЛІОТ-Н виступає як доступний, простий у використанні інструмент для первинних вимірювань у галузі відновлюваної енергетики.

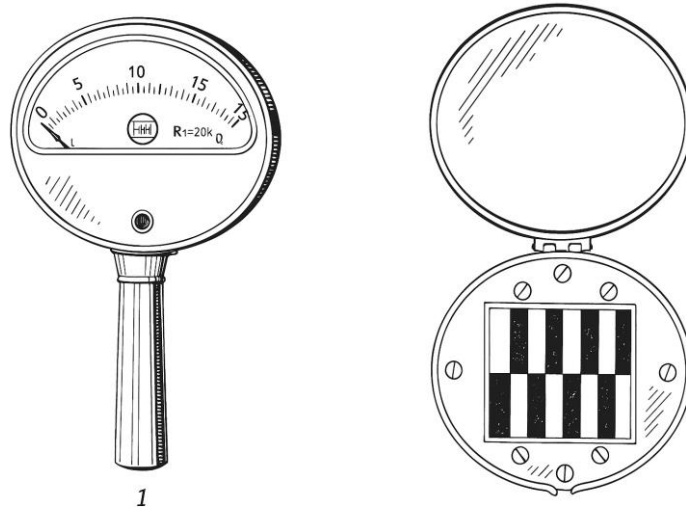


Рисунок 1.11 – Актинометр ЛІОТ-Н [25].

Основним елементом чутливої частини актинометра є спеціальна металева пластина, на поверхні якої чергуються смуги з різними оптичними властивостями: одні мають високий коефіцієнт відбиття (дзеркальні), інші – високу здатність до поглинання світла (темні, матові). Таке контрастне чергування створює умови для нерівномірного нагрівання під дією сонця: чорні смуги акумулюють більше тепла, тоді як світлі відбивають більшу частину енергії та залишаються холоднішими.

До кожної з цих смуг під'єднані пристрої термопари, що генерують електричну напругу внаслідок різниці температур між з'єднаними точками. Всі термопари з'єднані в термобатарей, яка створює сумарний термоелектричний сигнал. Цей сигнал подається на гальванометр який дозволяє з високою точністю реєструвати інтенсивність сонячного потоку.

Прилад оснащено шкалою, відградуваною в калоріях на квадратний сантиметр за хвилину, що дає змогу проводити кількісну оцінку сонячної енергії, яка надходить на поверхню. У сфері сонячної енергетики це дозволяє не лише оцінити ресурс конкретної місцевості, а й прогнозувати орієнтовний рівень електрогенерації сонячної електростанції в майбутньому.

Варто підсумувати що актинометри дозволяють окремо вимірювати пряму, розсіяну та загальну сонячну радіацію, більшість сучасних актинометрів можуть працювати в автоматичному режимі та зберігати дані тривалий час, проте такі прилади є дорогішими та потребують частого правильного калібрування та

складної установки. Отож, коли мова йде про прогнозування роботи сонячної електростанції, найкращим вибором для вимірювання сонячного випромінювання є піранометр. Його основна перевага полягає в тому, що він фіксує не тільки пряме, а й розсіяне сонячне світло – тобто загальну кількість енергії, яка надходить на поверхню. Це дуже важливо, адже погодні умови можуть змінюватися, і сонце не завжди світить напряду. Порівняно з піргеліометром, який реєструє лише пряме випромінювання, або з актинометром, що складніший у використанні й менш точний, піранометр забезпечує більш повну картину. Саме тому він найкраще підходить для задач, пов'язаних із розрахунком продуктивності СЕС, і вже давно використовується в цій сфері.

1.3 Постановка задачі дослідження

У подальшому дослідженні планується зосередити увагу на вдосконаленні підходів до оцінювання та вибору засобів вимірювальної техніки для реєстрації рівня сонячної радіації. Запропонована постановка задачі враховує як технічні, так і метрологічні аспекти, а також необхідність впровадження сучасних алгоритмічних та програмних рішень для підвищення ефективності вимірювального процесу. Основні напрями роботи охоплюють такі ключові положення:

1. Провести аналіз технічних і метрологічних характеристик піранометрів;
2. Оцінити інтегральний показник якості піранометрів;
3. Розробити алгоритм вимірювання рівня сонячної радіації;
4. Створити програмний інструмент для підтримки прийняття рішень при виборі ЗВТ;

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПІРАНОМЕТРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КВАЛІМЕТРІЇ

2.1 Аналіз піранометрів. Основні характеристики. Поділ піранометрів.

Для визначення найбільш придатного піранометра для вимірювання сонячної радіації в конкретних умовах необхідно здійснити аналіз ряду доступних приладів, беручи до уваги їх основні технічні характеристики, які можуть суттєво впливати на якість та точність отриманих результатів. Об'єктивність такого аналізу забезпечується шляхом попередньої класифікації піранометрів відповідно до їх конструкційних особливостей та вартості, що дозволяє здійснити коректне порівняння між різними типами пристроїв.

У межах дослідження варто зробити умовний поділ піранометрів на дві групи. До першої належать моделі піранометрів, соляриметрів, та схожих приладів (таблиця 2.1), які, окрім основної функції вимірювання сонячної радіації, також можуть реєструвати додаткові параметри, наприклад температуру навколишнього середовища, кут нахилу та інші фізичні характеристики. Друга група (таблиця 2.2) включає давачі, які потребують підключення до зовнішніх пристроїв щоб отримати кінцевий результат вимірювання.

Порівняння піранометрів із різних груп передбачає врахування ряду ключових параметрів. Насамперед, точність вимірювань, яка є критично важливою для забезпечення достовірності отриманих даних. Крім того, слід брати до уваги вартість кожного пристрою, що може бути критичним фактором при прийнятті рішення щодо його придбання. Ще одним важливим аспектом є діапазон вимірювань, який визначає функціональні можливості приладу та його придатність до застосування в різних умовах. Таким чином, комплексний підхід до аналізу та порівняння піранометрів дозволяє обрати найбільш ефективний пристрій для вимірювання сонячної радіації відповідно до поставлених завдань.

Таблиця 2.1 – Порівняння основних показників цифрових піранометрів

| Модель | Точність вимірювання, % | Діапазон вимірювання, Вт/м² | Вартість, \$ | Час відгуку, с | Гарантійний термін, міс. |
|-------------------------------------|--|---|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| EVOMEX TM750 | ±5 | 0-2000 | 220 | <1 | 12 |
| PCE-SPM 1 | ±4 | 0-2000 | 400 | <0,5 | 12 |
| FLK-IRR1- SOL | ±5 | 0-1400 | 400 | <1 | 16 |
| Sonel IRM-1 MPI | ±5 | 100-1400 | 300 | <2 | 12 |
| Solar Power Meter 634btu | ±5 | 0-2000 | 130 | <2 | 10 |
| Benning SUN 2 | ±5 | 100-1250 | 180 | <3 | 12 |
| Solar Power Meter SM206 | ±5 | 100-1500 | 120 | <2 | 12 |

Проаналізувавши характеристики цифрових засобів для фіксації рівня сонячної радіації, які доступні у продажі [26]–[32], варто відзначити, що більшість із них мають однакову точність вимірювань та схожий час відгуку, проте кардинально різняться за діапазоном вимірювання та вартістю. Саме ці два показники можуть стати ключовими при виборі ЗВТ такого типу. Крім того, варто враховувати умови експлуатації пристрою, зокрема стійкість до зовнішніх впливів (температурні коливання, пил, волога), потребу в калібруванні, а також доступність сервісного обслуговування. У проектах з обмеженим бюджетом економічна доцільність може переважати над максимальною точністю

Таблиця 2.2 – Порівняння основних показників піранометрів - давачів

| Модель | Точність вимірювання, % | Діапазон вимірювання, Вт/м2 | Вартість, \$ | Час відгуку, с | Гарантійний термін, міс. |
|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Campbell Scientific CMP10-L | ±2 | 285 - 2800 | 1800 | <5 | 48 |
| MS-60 Pyranometer | ±2 | 285-3000 | 1200 | <18 | 36 |
| Fieldpro FMP3 | ±2 | 300-2800 | 800 | <16 | 36 |
| RS485 Modbus Pyranometer | ±3 | 300-2800 | 350 | <18 | 24 |
| Campbell Scientific CS301 | ±5 | 360-1120 | 500 | <3 | 26 |
| SMART-MAC | ±5 | 300-1200 | 300 | <3 | 36 |
| Датчик сонячної радіації Davis | ±3 | 300-1600 | 350 | <5 | 24 |

Аналіз сенсорів, розглянутих у джерелах [33] - [39], доводить те, що вони характеризуються вищою точністю порівняно з цифровими піранометрами та солариметрами. Водночас ці пристрої є значно дорожчими, що зумовлено їх конструктивною складністю, вищими метрологічними характеристиками та відповідністю суворішим стандартам. Таким чином, подібні засоби вимірювальної техніки буде доцільно застосовувати в задачах, які потребують більшої точності та стабільності вимірювань. Наступним кроком дослідження буде оцінка якості розглянутих груп піранометрів.

2.2 Кваліметрія. Оцінювання комплексного показника якості піранометрів різних груп

Кваліметрія – це галузь наукової та прикладної діяльності, що спрямована на розробку теоретичних засад і методів кількісного вимірювання якості об'єктів. Комплексна оцінка якості продукції базується на визначенні сукупності її окремих (здебільшого простих) характеристик, які відображають функціональні, технічні або споживчі властивості. Для цього необхідно мати достовірні значення абсолютних показників кожної з оцінюваних властивостей, що, як правило, отримуються шляхом інструментальних вимірювань. У зв'язку з цим кваліметрія безпосередньо спирається на досягнення метрології – науки про вимірювання, забезпечення їх єдності та точності. Метрологічні дані слугують основою для формування об'єктивних критеріїв оцінки якості та побудови відповідних математичних моделей у кваліметричних дослідженнях [40].

Щоб здійснити кваліметричну оцінку піранометрів, необхідно пройти кілька послідовних етапів. На першому етапі визначаються основні критерії оцінки якості приладів. Ці параметри дозволяють всебічно охарактеризувати кожну модель з техніко-економічної точки зору. Далі здійснюється збирання вихідних даних за кожним критерієм для усіх моделей. Після цього слід визначити, які критерії мають зростаючу (чим більше – тим краще), а які – спадну (чим менше – тим краще) залежність. Наприклад, для зростаючого критерію використовується формула:

$$K_i = p_i / p_{i \text{ баз}} , \quad (2.1)$$

А для спадного:

$$K_i = p_{i \text{ баз}} / p_i , \quad (2.2)$$

Після нормалізації кожному критерію визначається ваговий коефіцієнт, який розраховується на основі опитування експертів. На завершальному етапі для кожної моделі обчислюється інтегральний коефіцієнт (IQ):

$$K = \sum q_i K_i, \quad (2.3)$$

Після обчислення інтегральних показників усі моделі впорядковуються за спаданням IQ. Модель з найвищим значенням вважається найкращою з урахуванням усіх обраних критеріїв.

За даними з таблиці 2.1 проведемо кваліметричну оцінку якості першої групи піранометрів, базовою моделлю оберемо FLK-IRR1-SOL (виділено жовтим).

Таблиця 2.3 – Відносні значення показників якості для групи 1 (цифрові піранометри та солариметри)

| Модель | Точність вимірювання, % | Діапазон вимірювання, Вт/м2 | Вартість, \$ | Час відгуку, с | Гарантійний термін, міс. |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|--------------------------|
| EVOMEX TM 750 | 1 | 1,42 | 1,8 | 1 | 0,75 |
| PCE-SPM 1 | 1,25 | 1,42 | 1 | 2 | 0,75 |
| FLK-IRR1-SOL | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Sonel IRM-1 MPI | 1 | 0,92 | 1,3 | 0,5 | 0,75 |
| Solar Power Meter 634btu | 1 | 1,42 | 3 | 0,5 | 0,6 |
| Benning SUN 2 | 1 | 0,82 | 2,2 | 0,3 | 0,75 |
| Solar Power Meter SM206 | 1 | 1 | 3,4 | 0,5 | 0,75 |

Таблиця 2.4 – Опитування експертів для визначення коефіцієнта вагомості для групи 1 (цифрові піранометри та солариметри)

| Показники якості | Кількість експертів | Сума балів | qі |
|------------------|---------------------|------------|------|
| Точність | 10 | 42 | 0,28 |
| Діапазон | | 34 | 0,22 |
| Вартість | | 32 | 0,21 |
| Час відгуку | | 16 | 0,11 |
| Гарантія | | 26 | 0,11 |

Таблиця 2.5 - Комплексні показники якості для групи 1 (цифрові піранометри та солариметри)

| Модель приладу | Комплексні показники якості (К) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| EVOMEX TM 750 | 1,215 |
| PCE-SPM 1 | 1,227 |
| FLK-IRR1-SOL | 1 |
| Sonel IRM-1 MPI | 1,37 |
| Solar Power Meter 634btu | 1,38 |
| Benning SUN 2 | 1,09 |
| Solar Power Meter SM206 | 1,4 |

Провівши дослідження показників якості для пристроїв, що входять до групи 1, було виявлено, що найкращим приладом за такою оцінкою є піранометр Solar Power Meter SM206. Цей результат може бути зумовлений надзвичайно низькою вартістю цього пристрою у порівнянні з аналогами, що значно підвищує

його конкурентоспроможність за даним критерієм. Попри певні обмеження у функціональності або точності вимірювання, економічна доцільність використання SM206 робить його оптимальним вибором для застосувань, де пріоритетом є бюджетні обмеження.

Для загального враження варто за аналогічним принципом проаналізувати показники для групи 2. За даними з таблиці 2.2 проведемо кваліметричну оцінку якості іншої групи піранометрів, базовою моделлю оберемо датчик Fieldpro FMP3 (виділено жовтим).

Таблиця 2.6 – Відносні значення показників якості для групи 2 (датчик-піранометри)

| Модель | Точність вимірювання, % | Діапазон вимірювання, Вт/м ² | Вартість, \$ | Час відгуку, с | Гарантійний термін, міс. |
|--------------------------------|-------------------------|---|--------------|----------------|--------------------------|
| Campbell Scientific CMP10-L | 1 | 1 | 0,44 | 3,2 | 1,33 |
| MS-60 Pyranometer | 1 | 1,1 | 0,66 | 0,88 | 1 |
| Fieldpro FMP3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| RS485 Modbus Pyranometer | 0,66 | 1 | 2,3 | 0,88 | 0,66 |
| Campbell Scientific CS301 | 0,4 | 0,54 | 1,6 | 5,3 | 0,72 |
| SMART-MAC | 0,4 | 0,6 | 2,6 | 5,3 | 1 |
| Датчик сонячної радіації Davis | 0,66 | 0,86 | 2,3 | 3,2 | 0,66 |

Таблиця 2.7 – Опитування експертів для визначення коефіцієнта вагомості для групи 2 (даваі-піранометри)

| Показники якості | Кількість експертів | Сума балів | qі |
|------------------|---------------------|------------|------|
| Точність | 10 | 42 | 0,28 |
| Діапазон | | 34 | 0,22 |
| Вартість | | 32 | 0,21 |
| Час відгуку | | 16 | 0,11 |
| Гарантія | | 26 | 0,11 |

Таблиця 2.8 - Комплексні показники якості для групи 2 (давачі - піранометри)

| Модель приладу | Комплексні показники якості (К) |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Campbell Scientific CMP10-L | 1,183 |
| MS-60 Pyranometer | 0,937 |
| Fieldpro FMP3 | 1 |
| RS485 Modbus Pyranometer | 1,103 |
| Campbell Scientific CS301 | 1,279 |
| SMART-MAC | 1,553 |
| Датчик сонячної радіації Davis | 1,363 |

За підсумками дослідження показників якості для пристроїв, що входять до групи 2, було виявлено що найоптимальнішим давачем є **SMART-MAC**, зважаючи на свою привабливу ціну, що є одним із найважливіших факторів для клієнтів, а також на швидкий час відгуку. В цілому, кожен показник є важливий для тих чи інших задач в сонячній енергетиці. Наприклад точність є визначальним параметром для достовірності результатів. Чим вища точність, тим менше похибок і вищий рівень довіри до отриманих даних.

Діапазон вимірювання визначає, в яких межах може працювати прилад – від низького до високого рівня сонячної радіації. Широкий діапазон дозволяє використовувати засіб як у звичайних умовах, так і в екстремальних, тим самим забезпечує гнучкість у застосуванні.

Ціна завжди є важливим фактором, насамперед у випадках масового впровадження приладів або при обмеженому бюджеті. Доступна вартість при збереженні базових вимог дозволяє ефективно використовувати засіб, проте в залежності від задач.

Гарантія в свою чергу є показником надійності пристрою та рівня довіри з боку виробника. Тривалий гарантійний термін не лише зменшує ризики, але й може свідчити про якісне виготовлення та довговічність, що є особливо важливим для приладів, які часто експлуатуються для важливих завдань.

Завершальним критерієм у проведеному дослідженні є час відгуку, що характеризує швидкість реакції приладу на зміну рівня освітлення. Швидший відгук забезпечує точніше відображення змін сонячної радіації, що особливо важливо для застосування в системах із режимом реального часу. Відтак, при виборі засобу вимірювальної техніки для визначення рівня сонячного випромінювання необхідно дотримуватись оптимального співвідношення між технічними параметрами, фінансовими можливостями та умовами майбутньої експлуатації.

2.3. Опитування фахівців щодо основних критеріїв вибору ЗВТ для вимірювання рівня сонячної інсоляції

Щоб визначити, які саме характеристики найбільше впливають на вибір засобів вимірювальної техніки для оцінки сонячної радіації на практиці, було проведено опитування серед кількох фахівців, які працюють у сфері відновлюваної енергетики. Їх опитано за допомогою платформи Google Forms. Участь взяли особи, які мали досвід вимірювання сонячної радіації при роботах із електростанціями. Результати опитування наведені на рисунках 2.1 - 2.6.

1. Який тип ЗВТ ви переважно використовуєте для вимірювання сонячної радіації?

7 відповідей

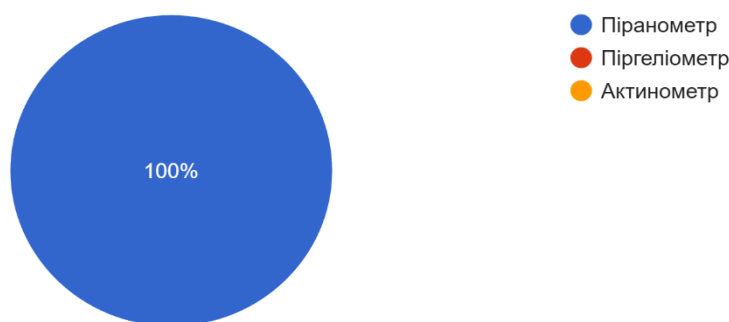


Рисунок 2.1 – Статистика опитування №1.

2. Який досвід використання ЗВТ для вимірювання сонячної радіації ви маєте?

7 відповідей

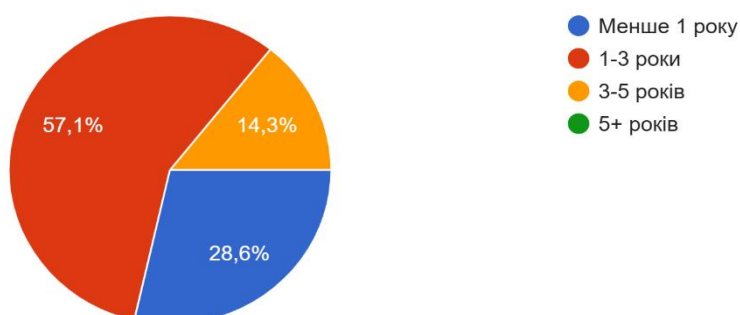


Рисунок 2.2 – Статистика опитування №2.

3. Які критерії є для вас ключовими при виборі ЗВТ? (Оберіть два найважливіші)?

7 відповідей

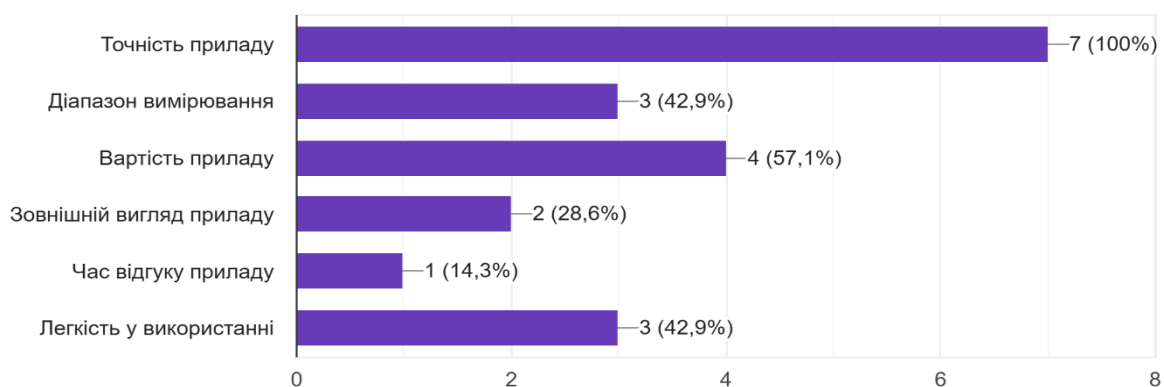


Рисунок 2.3 – Статистика опитування №3.

4. Вкажіть оптимальний діапазон вартості ЗВТ для вимірювання сонячної радіації на вашу думку

7 відповідей

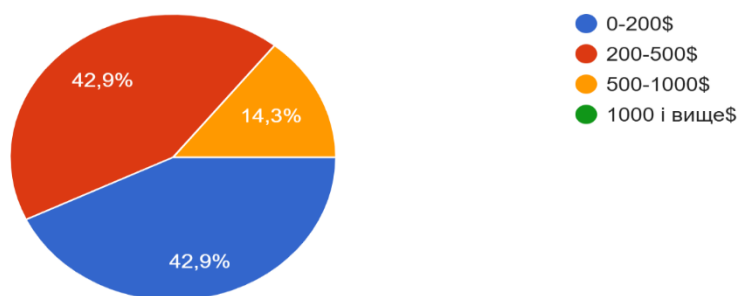


Рисунок 2.4 – Статистика опитування №4.

5. Які складнощі виникали при використанні ЗВТ у вашій практиці?

7 відповідей

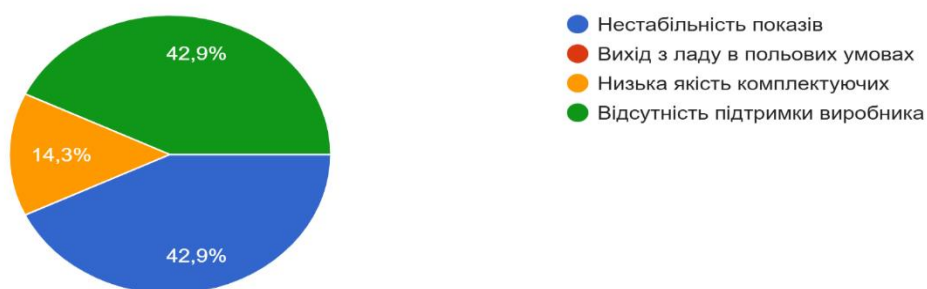


Рисунок 2.5 – Статистика опитування №5.

6. Який вплив точності вимірювання інсоляції ви спостерігаєте на загальний прогноз виробітку СЕС?
7 відповідей

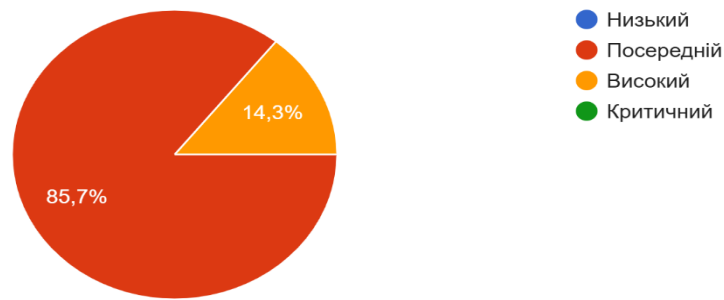


Рисунок 2.6 – Статистика опитування №6.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що серед усіх засобів вимірювання сонячної радіації фахівці найчастіше обирають саме піранометри. Основним критерієм для них є висока точність приладу, адже від цього напряму залежить якість зібраних даних. Також багато спеціалістів надають перевагу обладнанню з помірною вартістю – до 1000 доларів. Більше того, учасники опитування зазначили низку проблем, з якими їм доводилось зіштовхнутися у практиці, зокрема нестабільність вимірювань та відсутність належної технічної підтримки з боку виробників. Аналіз відповідей дозволив виділити ключові фактори, які впливають на вибір ЗВТ, і закласти основу для створення алгоритму прогнозування продуктивності сонячних електростанцій.

Окрім анкетного опитування, було проведено серію коротких інтерв'ю з представниками галузі відновлюваної енергетики. До участі залучено керівника проектного відділу однієї з компаній, що спеціалізується на впровадженні сонячних енергетичних систем, а також викладача вищого навчального закладу з багаторічним досвідом підготовки фахівців у цій сфері. Проведення таких інтерв'ю надало змогу отримати глибше розуміння аспектів застосування таких ЗВТ та їх проблем, з якими зіштовхувалися спеціалісти в реальних умовах.

Як зазначав спеціаліст-викладач із багаторічним стажем у сфері сонячної енергетики Андрій Вікторович: “Однією з основних характеристик піранометра є діапазон вимірювання в межах 0–2000 Вт/м², що відповідає рівню глобальної сонячної радіації на земній поверхні. Спектральний діапазон приладу має

становити 350–1100 нм. Важливою є також швидкодія, особливо за умов змінного освітлення. Вихідний сигнал може бути аналоговим (напруга або струм) чи цифровим, що забезпечує зручну інтеграцію у системи збору даних. Конструкція повинна передбачати надійний корпус з можливістю кріплення, а також відповідний рівень пиловологозахисту для роботи в різних кліматичних умовах. Крім того, пристрій має функціонувати в широкому діапазоні температур, що дозволяє його використання навіть в екстремальному середовищі”.

В свою чергу керівник проектного відділу однієї із місцевих компаній Максим заявляє: “З власного досвіду та з практичної точки зору, під час вибору ЗВТ для вимірювання сонячної радіації, зазвичай вибір припадає на статичні піранометри. Якщо звертати увагу на параметри, то звичайно в першу чергу цікавить діапазон вимірювань та якість виконання корпусу, оскільки для встановлення на довготривалий час матеріали мають бути зносостійкими, УФ-стійкими, тощо.”

Таким чином, за словами експертів, при виборі піранометра першочергову увагу слід звертати на діапазон вимірювання, спектральні характеристики та швидкодію приладу, а також на якість конструкції – зокрема надійність корпусу, його захист від зовнішніх впливів та здатність працювати в широкому температурному діапазоні.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено порівняльний аналіз піранометрів використовуючи метод кваліметрії, що дозволило об'єктивно оцінити якість приладів щодо їх метрологічних та експлуатаційних характеристик. У рамках дослідження проведено поділ засобів вимірювання: на автономні цифрові пристрої та сенсори, що інтегруються у вимірювальні системи.

Для кожної групи визначено найбільш важливі критерії якості (точність, діапазон, час відгуку, вартість, гарантія), які надалі проаналізовано відповідно до експертної оцінки. Результатом дослідження стали комплексні показники якості, що дозволили впорядкувати прилади щодо їх придатності для конкретних задач.

Застосування методу кваліметрії не лише надало підґрунтя для вибору ЗВТ, але й виявило суперечності між комерційною доступністю та технічною перевагою приладів, що вказує на необхідність врахування сценаріїв застосування при ухваленні рішень підбираючи той чи інший ЗВТ.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ ТА ЙОГО ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1. Умови розроблення алгоритму для вибору засобу вимірювання сонячної радіації.

З огляду на широкий асортимент засобів для вимірювання сонячної радіації виникає необхідність у розробці системного підходу до їх вибору. Такий підхід має враховувати комплекс технічних характеристик, економічну доцільність, а також специфіку умов експлуатації. Вибір оптимального пристрою потребує ретельного аналізу численних параметрів, зокрема точності вимірювання, стабільності роботи в різних умовах та вартості. На даному етапі дослідження розглянуто умови, які необхідні споживачеві для підбору приладу, а також концепцію побудови алгоритму, що автоматизує процес прийняття рішення щодо вибору найбільш придатного засобу вимірювання. Крім того, наведено опис програмної реалізації зазначеного алгоритму, що дозволяє забезпечити гнучкість у налаштуванні критеріїв вибору та адаптивність до змін умов експлуатації або вимог користувача. Розроблення такого алгоритму потребує врахування ряду вихідних умов, які потрібні споживачеві для подальшого вибору пристрою

Одним із ключових факторів є характеристика об'єкта – тип і масштаб СЕС. Для малопотужних приватних систем можуть бути достатніми засоби з базовою точністю, тоді як для промислових установок або станцій, інтегрованих у загальну енергосистему, необхідне застосування високоточних приладів, здатних забезпечити надійний моніторинг у реальному часі.

Наступним етапом є визначення очікуваного рівня виробництва або споживання енергії. Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки критичною є похибка вимірювання – для високопродуктивних об'єктів навіть незначні відхилення можуть призвести до суттєвих економічних втрат. Важливою умовою є також оцінювання необхідної точності вимірювань, яке здійснюється на основі

аналізу кліматичних даних, режимів експлуатації та вимог до подальшої обробки інформації. У процесі розроблення алгоритму точність розглядається як базовий критерій, що визначає перелік потенційно придатних ЗВТ.

Фінальним кроком є вибір конкретного типу вимірювального пристрою з-поміж доступних моделей. При цьому враховуються не лише метрологічні характеристики, а й такі чинники, як вартість, надійність, доступність сервісного обслуговування, тип вихідного сигналу, енергоспоживання, а також можливість інтеграції в існуючу інформаційну інфраструктуру. Узагальнення наведених умов допомагає створити зрозумілу логіку вибору і перетворити її на алгоритм. Цей алгоритм можна використати для створення програми, яка допомагає обирати прилад для вимірювання сонячної радіації.

В цілому, алгоритм підбору ЗВТ (рис. 3.1) включає наступні кроки: спочатку відбувається створення графічного інтерфейсу користувача з використанням бібліотеки Tkinter, у якому реалізовано вибір значень за шістьма критеріями: точність вимірювання, тип об'єкта, тип покриття, географічне розташування, призначення сонячної електростанції та розмір площі для встановлення. Для кожного параметра користувач обирає одне з доступних значень за допомогою елементів керування RadioButton. Після цього натискається кнопка «Отримати результат», що ініціює зчитування введених даних, підрахунок голосів відповідно до обраних характеристик та визначення найвідповідніших моделей піранометра. На основі результатів формується текстова відповідь, яка відображається на екрані у вигляді узагальненої інформації про вибір користувача та рекомендовану модель пристрою. За потреби користувач може змінити свій вибір, після чого процес повторюється.

3.2 Формування програми в Python по спрощеному підбору ЗВТ.

З метою реалізації автоматизованого підходу до вибору засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) для оцінки рівня сонячної радіації в заданих умовах було обрано мову програмування Python як базове середовище розробки. На основі проведеного аналізу технічних характеристик сформовано перелік із

шести типових моделей піранометрів, кожна з яких має певні переваги в контексті окремих експлуатаційних параметрів, таких як точність вимірювання, цінова доступність, стабільність роботи та ресурс експлуатації.

Розроблений підхід базується на відборі параметрів, починаючи з визначення ключового критерію – точності вимірювання. Відповідно до обраного значення цього параметра формується первинна група піранометрів, які відповідають заданому рівню точності. Далі користувач послідовно задає додаткові експлуатаційні умови (вартість, надійність, умови застосування тощо), на основі яких система здійснює фільтрацію доступних варіантів. У результаті обробки введених даних програма визначає пристрій, який найчастіше задовольняє задані вимоги, що дозволяє обґрунтовано рекомендувати його як найбільш відповідний для конкретного випадку застосування. Для впорядкування логіки вибору було побудовано алгоритмічну схему (рис. 3.1), яка відображає послідовність прийняття рішень на основі вхідних критеріїв.

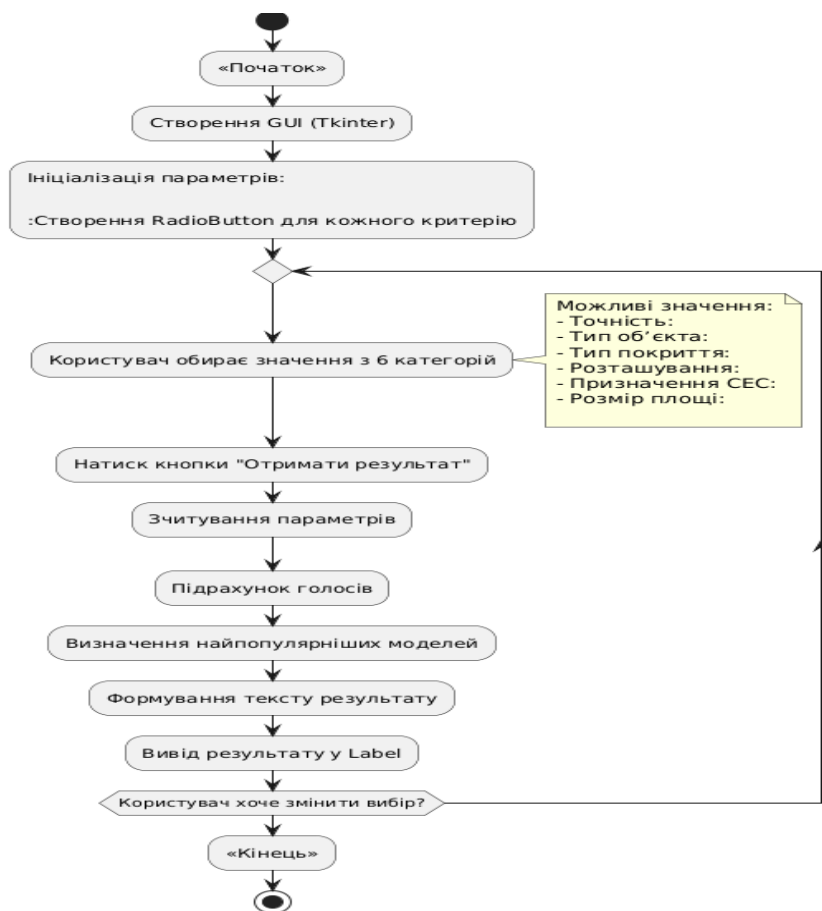


Рисунок 3.1 – Блок схема алгоритму вибору засобу вимірювання сонячної радіації.

Згодом ця схема стала основою для написання програмного коду (див. додаток А), що дозволяє реалізувати процес підбору ЗВТ у автоматичному режимі, враховуючи задані користувачем параметри.

The screenshot shows a software window titled "Вибір піранометра" (Pyranometer Selection). It contains six columns of selection criteria, each with radio button options:

- 1. Необхідний рівень точності вимірювання:** Низька (selected), Середня, Висока
- 2. Вибір об'єкта:** Дім (selected), Офіс, Наземна конструкція, Промисловий об'єкт
- 3. Тип покриття:** Плоский дах, Скатний дах (selected), Відкрита територія
- 4. Географічне розташування:** Місто, Село (selected), Гори, Рівнина
- 5. Призначення сонячної електростанції:** Для власного споживання (selected), Для продажу в мережу, Гібридна система, Автономна система
- 6. Розмір площі для встановлення:** Менше 20 м², 20-50 м² (selected), 50-100 м², Більше 100 м²

Below the options is a button "Отримати результат" (Get result). Underneath, the selected options are summarized:

Ви обрали:
 1. Необхідний рівень точності вимірювання: Низька
 2. Вибір об'єкта: Наземна конструкція
 3. Тип покриття: Відкрита територія
 4. Географічне розташування: Село
 5. Призначення сонячної електростанції: Для власного споживання
 6. Розмір площі для встановлення: 20-50 м²

Рекомендований піранометр:
 Benning SUN 2

Рисунок 3.2 – Приклад визначення піранометра для набору даних №1.

The screenshot shows the same software window "Вибір піранометра" with different selection criteria:

- 1. Необхідний рівень точності вимірювання:** Низька, Середня (selected), Висока
- 2. Вибір об'єкта:** Дім (selected), Офіс, Наземна конструкція, Промисловий об'єкт
- 3. Тип покриття:** Плоский дах, Скатний дах (selected), Відкрита територія
- 4. Географічне розташування:** Місто, Село, Гори (selected), Рівнина
- 5. Призначення сонячної електростанції:** Для власного споживання, Для продажу в мережу (selected), Гібридна система, Автономна система
- 6. Розмір площі для встановлення:** Менше 20 м², 20-50 м², 50-100 м², Більше 100 м² (selected)

Below the options is a button "Отримати результат" (Get result). Underneath, the selected options are summarized:

Ви обрали:
 1. Необхідний рівень точності вимірювання: Середня
 2. Вибір об'єкта: Дім
 3. Тип покриття: Скатний дах
 4. Географічне розташування: Гори
 5. Призначення сонячної електростанції: Для продажу в мережу
 6. Розмір площі для встановлення: Більше 100 м²

Рекомендований піранометр:
 PCE-SPM 1

Рисунок 3.3 – Приклад визначення піранометра для набору даних №2.

Вибір піранометра

1. Необхідний рівень точності вимірювання:

Низька

Середня

Висока

2. Вибір об'єкта:

Дім

Офіс

Наземна конструкція

Промисловий об'єкт

3. Тип покриття:

Плоский дах

Скатний дах

Відкрита територія

4. Географічне розташування:

Місто

Село

Гори

Рівнина

5. Призначення сонячної електростанції:

Для власного споживання

Для продажу в мережу

Гібридна система

Автономна система

6. Розмір площі для встановлення:

Менше 20 м²

20-50 м²

50-100 м²

Більше 100 м²

Отримати результат

Ви обрали:

1. Необхідний рівень точності вимірювання: Висока
2. Вибір об'єкта: Промисловий об'єкт
3. Тип покриття: Плоский дах
4. Географічне розташування: Місто
5. Призначення сонячної електростанції: Для власного споживання
6. Розмір площі для встановлення: 50-100 м²

Рекомендований піранометр:
Fieldpro FMP3

Рисунок 3.4 – Приклад визначення піранометра для набору даних №3.

Запропоноване середовище виконує роль допоміжного інструменту для вибору відповідного засобу вимірювальної техніки, що значно полегшує процес прийняття рішень для кінцевих користувачів. Система спрямована на оптимізацію процесу підбору обладнання відповідно до заданих технічних параметрів. Програмне забезпечення було створене відносно нещодавно й наразі перебуває на етапі тестування, тому поки що не представлено у відкритому доступі. Проте візуальні приклади функціонування програми наведені на рисунках 3.2 – 3.4, та демонструють ключові елементи інтерфейсу, логіку взаємодії користувача з системою, а також основні функціональні можливості, які вона пропонує.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі реалізовано прикладну частину дослідження, де на основі попереднього аналізу сформульовано послідовні рекомендації для споживача щодо вимірювання рівня сонячної радіації для сонячних електростанцій. Також сформовано програму для спрощення вибору ЗВТ під конкретні задачі. Особливістю підходу стало впровадження послідовної фільтрації за ключовими експлуатаційними та метрологічними параметрами з урахуванням пріоритетів користувача.

На базі розробленого алгоритму створено програмний продукт з використанням мови Python та бібліотеки Tkinter, що виконує автоматизований підбір ЗВТ відповідно до заданих умов. Програма не лише скорочує час прийняття рішення, а й зменшує ймовірність помилкового вибору завдяки логіці обробки параметрів.

Запропоноване програмне рішення не дублює класичні інструменти підбору, а формує нову програму вибору, яка поєднує об'єктивні технічні критерії з гнучким урахуванням практичних обмежень. Це дозволяє адаптувати вибір ЗВТ до широкого спектра реальних ситуацій у проектуванні та моніторингу сонячних електростанцій.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було здійснено всебічне дослідження методів вимірювання сонячної радіації, орієнтованих на підвищення точності прогнозування генерації сонячними електростанціями. Проаналізовано основні принципи функціонування СЕС, будову та типи фотоелектричних модулів, а також визначено вплив показників інсоляції на їхню продуктивність.

Особлива увага приділялась аналізу вимірювальних приладів: піранометрів, актинометрів і піргеліометрів. Після проведення їх порівняння, було визначено найоптимальнішу групу – піранометри, оскільки вони здатні фіксувати як пряму, так і дифузну складові сонячного випромінювання. Для них проводилось дослідження ключових параметрів – точності, діапазону дії, швидкості реагування, вартості й експлуатаційної зручності. На основі кваліметричної оцінки встановлено найкращі варіанти серед них за співвідношенням показників.

З огляду на зібрані дані, було створено алгоритм вибору засобів вимірювання. Його реалізовано у вигляді програмного продукту на Python, що автоматизує процес підбору пристроїв відповідно до заданих умов і вимог. Це програмне рішення істотно спрощує прийняття обґрунтованих рішень при проектуванні СЕС.

Загалом поставлені в роботі завдання виконано повною мірою. Отримані результати мають прикладну цінність для спеціалістів, які працюють із відновлюваними джерелами енергії, а також становлять підґрунтя для подальших досліджень у сфері метрології та автоматизації вимірювальних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячні електростанції: що це, принцип роботи, переваги та недоліки - Atmosfera. Професійні енергетичні рішення для дому та бізнесу - Atmosfera. URL: <https://www.atmosfera.ua/media/vse-pro-sonyachni-batareyi-ta-stanciyi> (дата звернення: 05.05.2025).
2. Схема роботи сонячної електростанції [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sonergia.com.ua/shema-roboty-sonyachnoyi-elektrostantsiyi/> (дата звернення: 01.05.2025).
3. LibreTexts. 6.5: Сонячні батареї. LibreTexts - Ukrayinska. URL: <https://surl.li/gxfunl> (дата звернення: 07.05.2025).
4. Все про сонячні панелі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://130.com.ua/uk/vse-o-solnechnyh-panelyah/> (дата звернення: 08.05.2025).
5. Як вибрати оптимальну потужність сонячної електростанції для вашого будинку [Електронний ресурс] Generacia Energy. – Режим доступу: <https://generacia.energy/zelenyj-tarif/jak-vibrati-optimalnu-potuzhnist-sonjachnoi-elektrostantsii-dlja-vashogo-budinku/>
6. Як вибрати оптимальне місце для сонячної електростанції: аналіз ландшафту та кліматичних умов [Електронний ресурс] Generacia Energy. – Режим доступу: <https://generacia.energy/zelenyj-tarif/jak-vibrati-optimalne-misce-dlja-sonjachnoi-elektrostantsii-analiz-landshaftu-ta-klimatichnih-umov/>
7. Electro-Tech Online [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.electro-tech-online.com>
8. Пояснювальна записка до навчального посібника «Фотовольтаїчні електростанції» / ХНУМГ ім. О.М. Бекетова [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/> (дата звернення: 08.05.2025).
9. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. Фотоенергетика: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 162 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://eprints.kname.edu.ua]

10. Сонячні панелі 2022: огляд ринку та технологічні тенденції [Електронний ресурс] Avenston. – Режим доступу: <https://avenston.com/articles/solar-panels-2022/>
11. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2011.
12. Агропрогноз: усе, що треба знати про сонячну радіацію та урожай [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kurkul.com/blog/686-agroprognoz-vse-scho-treba-znati-pro-sonyachnu-radiatsiyu-ta-urojay> (дата звернення: 12.05.2025).
13. Victoria M. (ed.). Fundamentals of Solar Cells and Photovoltaic Systems Engineering. Oxford: Academic Press, 2024. 560 с.
14. Інсоляція: що це, якою вона буває та від чого залежить [Електронний ресурс] Atmosfera. – Режим доступу: <https://www.atmosfera.ua/media/insolyaciya-sho-ce-yakoyu-vona-buvaye-ta-vid-chogo-zalezhit-atmosfera>
15. Brotzge J., Richardson S. Pyranometer Handbook. U.S. Department of Energy, Atmospheric Radiation Measurement Program, 2004. 29 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.arm.gov/publications/tech_reports/handbooks/pyra_handbook.pdf (дата звернення: 14.05.2025).
16. Hukseflux Thermal Sensors B.V. What is a Pyranometer? – Technical Note. Delft, Netherlands, 2006. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.hukseflux.com/uploads/inline/notewhat_is_a_pyranometer_v2006.pdf (дата звернення: 19.05.2025).
17. Піранометр SMP21 – технічні характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data-lufft.prom.ua/ua/p911990789-smp21-piranometr.html> (дата звернення: 13.05.2025).
18. Посудін Ю. І. Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища. – К.: НаУКМА, 2008. – 352 с.
19. Pyranometer ML-01 SI – EKO Instruments [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ekoinstruments.com/in/categories/products/pyranometers/ml-01-si-pyranometer> (дата звернення: 17.05.2025).

20. Піргеліометр: довідка [Електронний ресурс] Alive Internet. – Режим доступу: <https://alive-internet.pp.ua/pirgeliometr-dovidka-l-uk/>
21. Піргеліометр – Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Піргеліометр> (дата звернення: 20.05.2025).
22. Нетробчук І. М. Вимірювання метеорологічних величин : наоч. посіб. / Ірина Марківна Нетробчук. – Луцьк : Вежа-Друк, 2015. – 128 с.
23. Галік О. Ш. Метеорологічні прилади і методи спостережень. Рівне : НУВГП, 2008. 134 с.
24. Актинометр Савінова-Янишевського 1982 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://violity.com/ru/115638920-aktinometr-savinova-yanishevskogo-1982-g> (дата звернення: 22.05.2025).
25. Актинометрія [Електронний ресурс] // Медична енциклопедія. – Режим доступу: <http://www.medical-enc.ru/1/aktinometry.shtml> (дата звернення: 24.05.2025).
26. Sonel IRM-1 MPI – набір для вимірювання сонячної радіації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://promsystem.com.ua/product/sonel-irm-1-mpi-nabir-dlya-vymiryuvannya-sonyachnoyi-radiacziyi/> (дата звернення: 25.05.2025).
27. PCE-SPM 1 – піранометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pragmatic.com.ua/pce-spm-1-piranometr.html?srsltid=AfmBOopbPR7jXNekC3AfVorcjN0WU9T1qHd8h-EAPGNxaFROtcXAKwSZ> (дата звернення: 25.05.2025).
28. Fluke IRR1-SOL – тестер для вимірювання сонячної радіації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tme.eu/ua/details/flk-irr1-sol/testeri-ta-vimir-priladi-pv-i-evse-ust/fluke/?brutto=0¤cy=USD> (дата звернення: 04.06.2025).
29. Evomex TM750 – прилад для вимірювань [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pragmatic.com.ua/ru/evomex_tm750 (дата звернення: 25.05.2025).

30. Pyranometer – вимірювач сонячної радіації (ebay) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ebay.com/itm/364056416687?utm_source (дата звернення: 25.05.2025).
31. Benning SUN 2 – пристрій для вимірювання інсоляції та температури для фотоелектричних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://promsystem.com.ua/product/benning-sun-2-prystrij-dlya-vymiryuvannya-insolyacziyi-ta-temperatury-dlya-fotoelektrychnyh-system/> (дата звернення: 25.05.2025).
32. Вимірювач сонячної енергії (VIPMART) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vipmart.com.ua/ua/p13828350-izmeritel-solnechnoj-energii.html> (дата звернення: 25.05.2025).
33. Campbell Scientific CS301 – піранометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.campbellsci.eu/cs301?utm_source (дата звернення: 25.05.2025).
34. FieldPro FMP3 – пристрій вимірювання сонячної радіації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://fieldpro.jp/en/product/fmp3/?utm_source (дата звернення: 25.05.2025).
35. ЕКО MS-60 – піранометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eko-asia.com/us/categories/products/pyranometers/ms-60-pyranometer?utm_source (дата звернення: 25.05.2025).
36. Campbell Scientific CMP10-L – піранометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.campbellsci.asia/cmp10-l> (дата звернення: 25.05.2025).
37. Linovision RS485 Modbus – сенсор сонячної радіації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://global.linovision.com/products/rs485-modbus-pyranometer-solar-radiation-sensor?utm_source (дата звернення: 25.05.2025).
38. Датчик рівня сонячної радіації (Solar Garden) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/obladnannya/datchyk-rivnya-sonyachnoyi-radiatsiyi/> (дата звернення: 25.05.2025).
39. Датчик сонячної радіації – піранометр (Tech Farming Shop) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tech-farmingshop.com/datchik-sonyachnoi-radiatsii-piranometr/> (дата звернення: 25.05.2025).

40. Кваліметрія: опорний конспект лекцій [Електронний ресурс] / уклад. В. І. Шаповалов. – Харків: Харківський державний біотехнологічний університет, 2020. – 72 с. – Режим доступу: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8183/1/Opornij_konsp_lekcij_KVALIMETRIYa_2020.pdf

ДОДАТОК А

Таблиця для кваліметричної оцінки експертів

Таблиця 1 – Визначення вагових коефіцієнтів методом експертної оцінки показників якості

| № | Показники | Експ. 1 | Експ. 2 | Експ. 3 | Експ. 4 | Експ. 5 | Експ. 6 | Експ. 7 | Експ. 8 | Експ. 9 | Експ. 10 | Сума балів | q _i |
|---|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|---------------|----------------|
| 1 | Точність | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 | 4 | 42 | 0,28 |
| 2 | Діапазон | 3 | 2 | 5 | 4 | 3 | 4 | 1 | 4 | 3 | 5 | 34 | 0,22 |
| 3 | Вартість | 4 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 1 | 32 | 0,21 |
| 4 | Час відгуку | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 16 | 0,11 |
| 5 | Гарантія | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 5 | 4 | 2 | 2 | 2 | 26 | 0,18 |

ДОДАТОК Б

Опитування щодо основних критеріїв вибору ЗВТ для вимірювання рівня сонячної інсоляції

vmedvid77@gmail.com [Змінити обліковий запис](#)

Бачите тільки ви

1. Який тип ЗВТ ви переважно використовуєте для вимірювання сонячної радіації?

Піранометр

Піргеліометр

Актинометр

Інше: _____

2. Який досвід використання ЗВТ для вимірювання сонячної радіації ви маєте?

Менше 1 року

1-3 роки

3-5 років

5+ років

Рисунок 1 – Запитання опитувальника №1 та №2

3. Які критерії є для вас ключовими при виборі ЗВТ? (Оберіть два найважливіші)?

Точність приладу

Діапазон вимірювання

Вартість приладу

Зовнішній вигляд приладу

Час відгуку приладу

Легкість у використанні

4. Вкажіть оптимальний діапазон вартості ЗВТ для вимірювання сонячної радіації на вашу думку

0-200\$

200-500\$

500-1000\$

1000 і вище\$

Рисунок 2 – Запитання опитувальника №3 та №4

5. Які складнощі виникали при використанні ЗВТ у вашій практиці?

- Нестабільність показів
- Вихід з ладу в польових умовах
- Низька якість комплектуючих
- Відсутність підтримки виробника
- Інше: _____

6. Який вплив точності вимірювання інсоляції ви спостерігаєте на загальний прогноз виробітку СЕС?

- Низький
- Посередній
- Високий
- Критичний

Рисунок 3 – Запитання опитувальника №5 та №6

ДОДАТОК В

Програмний код Python

```

import tkinter as tk

class PyranometerSelectorApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Вибір піранометра")

        self.zs = [
            {
                "z": "1. Необхідний рівень точності вимірювання:",
                "v": {
                    "Низька": ["Benning SUN 2", "FLK-IRR1-SOL"],
                    "Середня": ["Davis", "PCE-SPM 1"],
                    "Висока": ["Fieldpro FMP3", "Campbell Scientific CMP10-L"]
                }
            },
            {
                "z": "2. Вибір об'єкта:",
                "v": {
                    "Дім": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
                    "Офіс": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-IRR1-SOL"],
                    "Наземна конструкція": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
                    "Промисловий об'єкт": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-IRR1-SOL"]
                }
            },
            {
                "z": "3. Тип покриття:",
                "v": {
                    "Плоский дах": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],

```

```

"Скатний дах": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
"Відкрита територія": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning
SUN 2"]
    }
  },
  {
    "z": "4. Географічне розташування:",
    "v": {
      "Місто": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
      "Село": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
      "Гори": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"],
      "Рівнина": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    }
  },
  {
    "z": "5. Призначення сонячної електростанції:",
    "v": {
      "Для власного споживання": ["Fieldpro FMP3", "Davis",
"Benning SUN 2"],
      "Для продажу в мережу": ["Campbell Scientific CMP10-L",
"PCE-SPM 1", "FLK-IRR1-SOL"],
      "Гібридна система": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN
2"],
      "Автономна система": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning
SUN 2"]
    }
  },
  {
    "z": "6. Розмір площі для встановлення:",
    "v": {
      "Менше 20 м²": ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"],
      "20-50 м²": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1",
"FLK-IRR1-SOL"],
      "50-100 м²": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1",
"FLK-IRR1-SOL"],
      "Більше 100 м²": ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM
1", "FLK-IRR1-SOL"]
    }
  }
}

```

```

        }
    }
]
self.a_v = []
for q in self.zs:
    first_option = next(iter(q["v"]))
    self.a_v.append(tk.StringVar(value=first_option))
self.c_w()
def c_w(self):
    self.frame = tk.Frame(self.root, padx=10, pady=10)
    self.frame.pack()
    for col, q in enumerate(self.zs): # Виправлено en -> enumerate
        z_label = tk.Label(self.frame, text=q["z"], font=("Arial", 11,
"bold"), justify="left", wraplength=160)
        z_label.grid(row=0, column=col, sticky="w", padx=10)
        for row, option_text in enumerate(q["v"], start=1): # Виправлено
en -> enumerate
            rb = tk.Radiobutton(
                self.frame,
                text=option_text,
                variable=self.a_v[col],
                value=option_text,
                anchor="w",
                justify="left"
            )
            rb.grid(row=row, column=col, sticky="w")
        self.r_b = tk.Button(self.root, text="Отримати результат",
command=self.show_result)
        self.r_b.pack(pady=15)
        self.result_label = tk.Label(self.root, text="", justify="left",
font=("Arial", 11))
        self.result_label.pack(padx=10, pady=10)
def show_result(self):
    s_c = {}
    for i in range(len(self.zs)):
        s_o = self.a_v[i].get()

```

```

ms = [] # ініціалізуємо порожній список
if i == 0:
    if s_o == "Низька":
        ms = ["Benning SUN 2", "FLK-IRR1-SOL"]
    elif s_o == "Середня": # Виправлено тут
        ms = ["Davis", "PCE-SPM 1"]
    elif s_o == "Висока":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Campbell Scientific CMP10-L"]
elif i == 1:
    if s_o == "Дім":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Офіс":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]
    elif s_o == "Наземна конструкція":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Промисловий об'єкт":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]

elif i == 2:
    if s_o == "Плоский дах":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Скатний дах":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Відкрита територія":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
elif i == 3:
    if s_o == "Місто":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Село":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Гори":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]
    elif s_o == "Рівнина":

```

```

        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
elif i == 4:
    if s_o == "Для власного споживання":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Для продажу в мережу":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]

    elif s_o == "Гібридна система":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "Автономна система":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
elif i == 5:
    if s_o == "Менше 20 м²":
        ms = ["Fieldpro FMP3", "Davis", "Benning SUN 2"]
    elif s_o == "20-50 м²":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]

    elif s_o == "50-100 м²":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]

    elif s_o == "Більше 100 м²":
        ms = ["Campbell Scientific CMP10-L", "PCE-SPM 1", "FLK-
IRR1-SOL"]

# Підрахунок моделей
for m in ms:
    if m in s_c:
        s_c[m] += 1
    else:
        s_c[m] = 1
max_count = max(s_c.values())
best_ms = [m for m, count in s_c.items() if count == max_count]

ss = "Ви обрали:\n"
for i in range(len(self.zs)):
    ss += f"{self.zs[i]['z']} {self.a_v[i].get()}\n"
ss += "\nРекомендований піранометр:\n" + ", ".join(best_ms)

```

```
        self.result_label.config(text=ss)
if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = PyranometerSelectorApp(root)
    root.mainloop()
```