

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

СТАХІВ Андрій Віталійович

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
ЕНЕРГОУСТАНОВКИ НА СОНЯЧНИХ БАТАРЕЯХ. /
AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE
POWER PLANT ON SOLAR BATTERIES

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконв: студент групи АКІТм–22
Стахів А. В.

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2024 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2024

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сегін
" ____ " _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Стахіву Андрію Віталійовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система автоматизованого управління електроприводом енергоустановки на сонячних батареях. / Automated control system of the electric drive of the power plant on solar batteries.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від « 12 » грудня 2023 р. № 753

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

2 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз сонячного випромінювання на території України та оцінка його енергетичного потенціалу.

2. Вимоги до технічних характеристик та терміну самоокупності сонячних електростанцій.

3. Забезпечення експлуатаційних характеристик системи автоматизованого управління електроприводом енергоустановки.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Проаналізувати усереднених значень сонячного випромінювання на території України та оцінка його енергетичного потенціалу.

2. Побудувати математичну модель роботи сонячної енергоустановки для перетворення сонячної енергії в електричну.

3. Спроекувати та розрахунок параметрів оптоелектричного датчика.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Карти територій України з оцінкою фотоелектричного потенціалу електроенергії.

2. Структурна схема активної системи контролю орієнтації ФМ.

3. Порівняльні діаграми значень середньомісячної потужності ФМ протягом року з використанням систем контролю та без них.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		
4	Сегін А. І.		
5	Сегін А. І.		

7. Дата видачі завдання 12 грудня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз типів сонячних енергоустановок	01.01. 2024. – 31.01.2024р.	виконано
2	Системи стеження енергоустановки за положенням сонця	01.02. 2024р.– 29.02.2024р.	виконано
3	Пристрої контролю максимального потоку сонячного випромінювання	01.03. 2024. – 31.03. 2024р.	виконано
4	Математична модель роботи сонячної енергоустановки для перетворення сонячної енергії в електричну	01.04. 2024р.– 31.05.2024 р.	виконано
5	Проектування та розрахунок параметрів фотоелектричного датчика	01.06.2024р. – 30.01. 2024 р.	виконано
6	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	01.09.2024р. – 30.11.2024р.	виконано

Студент

_____ (підпис)

Стахів А. В.

Керівник роботи

_____ (підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

АНОТАЦІЯ

Стахів Андрій Віталійович. Система автоматизованого управління електроприводом енергоустановки на сонячних батареях.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2024.

У кваліфікаційній роботі розроблено двоосну систему автоматичного управління електроприводом енергоустановки на сонячних батареях для підвищення коефіцієнта корисної дії протягом року при виробленні електроенергії, за рахунок більш точного орієнтування сонячних панелей під кутом 90° до сонячних променів.

ANNOTATION

Stakhiv A. V. Automated control system of the electric drive of the power plant on solar batteries.

Research for obtaining a master's degree in the specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2024.

In the qualification work, a two-axis system of automatic control of the electric drive of the power plant on solar batteries was developed to increase the efficiency during the year during the generation of electricity, due to more accurate orientation of the solar panels at an angle of 90° to the sun's rays.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. 1 АНАЛІЗ ТИПІВ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК.....	11
1.1 Аналіз сонячного випромінювання на території України та оцінка його енергетичного потенціалу.....	11
1.2 Загальні відомості про сонячні енергоустановки.....	16
1.3 Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі, що використовуються у сонячних енергоустановках.....	20
2 СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ ЗА ПОЛОЖЕННЯМ СОНЦЯ	23
2.1. Аналіз переміщення Сонця над земною поверхнею та визначення кутів його положення у відповідності до періоду року та доби.....	23
2.2 Способи та системи контролю орієнтації ФМ.....	26
2.2.1 Системи ручного наведення ФМ на Сонце.....	27
2.2.2 Пасивні системи контролю.....	27
2.2.3 Активні системи контролю.....	28
3 ПРИСТРОЇ КОНТРОЛЮ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	32
3.1 Датчики для перетворенні сонячної енергії на електричну.....	32
3.1.1 Системи контролю без використання датчика.....	33
3.1.2 Датчик на ефекті Саньяка.....	34
3.1.3 Геліотрекер.....	35
3.1.4 Датчик максимального освітлення.....	40
3.1.5 Датчик сканування небосхилу.....	41
3.1.6 Щілинні сонячні датчики.....	44
3.1.7 Екваторіальний датчик.....	45

3.2 Датчики, що застосовуються для перетворенні сонячної енергії на теплову.....	46
3.2.1 Термотрекер.....	46
3.2.2 Двигун Стірлінга.....	47
3.2.3 Термомеханічна самонавідна система контролю.....	48
3.3 Аналіз способів, методів та датчиків контролю.....	48
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОУСТАВНИКИ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ.....	51
4.1 Розрахунок потужності, що виробляється фотоелектричним модулем.....	51
4.2 Застосування математичної моделі з метою оцінки ефективності систем контролю орієнтації ФМ.....	60
5 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДАТЧИКА.....	63
5.1 Розробка та макет фотоелектричного датчика.....	63
5.2 Оптимізація конструкції фотоелектричного датчика з використанням математичної моделі.....	67
ВИСНОВОКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
ДОДАТКИ.....	82

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з найважливіших світових проблем сучасності є енергетична проблема. У зв'язку зі збільшенням споживання електроенергії та обмеженості запасів традиційних джерел енергії виникає необхідність розробки та використання альтернативних джерел енергії [1-8]. Крім виснаження запасів традиційних вуглеводневих джерел енергії існує ще одна важлива проблема їх використання – забруднення навколишнього середовища речовинами, що викидаються в атмосферу. Наростають побоювання з приводу екологічних змін, викликаних використанням традиційних джерел енергії, у зв'язку з чим виявляється все більший інтерес до освоєння нових відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що мають високу ефективність і не забруднюють довкілля, а також відрізняються повсюдним поширенням.

Спільне використання традиційних та відновлюваних джерел енергії дозволять підвищити надійність енергозабезпечення шляхом створення резервних джерел енергії, знизити шкідливі впливи на навколишнє середовище завдяки використанню екологічно чистих відновлюваних джерел енергії, вирішити проблему енергопостачання споживачів, не підключених до енергосистем близько 22 млн. чоловік [6-8].

Відновлювані джерела енергії слід активно застосовувати в районах, не охоплених системою централізованого енергопостачання, через віддаленість та низьку щільність населення, в районах з дефіцитом потужності, також у місцях масового відпочинку для покращення екологічної обстановки та місцях сезонної роботи тощо [6- 8].

Серед відновлюваних джерел енергії сонячна енергія є найбільш привабливою [3-5]. Сонячна енергетика характеризується максимальною простотою використання, найбільшими ресурсами, умовно екологічною чистотою та поширенням. Повна кількість сонячної енергії, що надходить на поверхню Землі протягом тижня, перевищує енергію всіх світових запасів

нафти, газу, вугілля та урану [6-9]. Ці обставини визначають геліоенергетику як один із найперспективніших напрямів розвитку відновлюваної енергетики.

До серйозних недоліків використання сонячної енергії на сьогоднішній день відноситься висока вартість електроенергії, що одержується, в порівнянні з традиційними джерелами [9-11]. Це викликано невисокою щільністю енергетичних потоків та їх непостійністю у часі, внаслідок чого доводиться використовувати дороге обладнання для збирання, акумулювання та перетворення енергії. Проте останнім часом є тенденція зниження вартості енергії сонячних установок, зумовлена науковими досягненнями у технології їх виготовлення та зростанням масштабів виробництва [9]. Застосування сонячних електростанцій (СЕС) не пропонується як заміщення традиційного енергопостачання, а як додаткове джерело енергії з метою витіснення частини органічного палива.

Мета кваліфікаційної роботи – проектування системи автоматизованого управління електроприводом енергоустановки на сонячних батареях та розрахунок параметрів її компонентів

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати доцільність встановлення СЕС на території України в залежності від сонячного випромінювання та оцінити їх енергетичний потенціал.
2. Проаналізувати різні типи сонячних електроустановок, їх конструкцій та енергоефективності.
3. Аналіз переміщення Сонця над земною поверхнею та визначення кутів його положення у відповідності до періоду року та доби.
4. Дослідження систем та датчиків слідкування за сонячним випромінюванням.
5. Побудова математичної моделі роботи сонячної енергоустановки для перетворення сонячної енергії в електричну.
6. Проектування та розрахунок параметрів оптоелектричного датчика

7. Спроекувати загальну структуру двоосної системи автоматичного управління приводом орієнтації сонячних панелей СЕС.

Об'єкт дослідження. Процес перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію в сонячних електростанціях.

Предмет дослідження. Двоосна система автоматичного управління електроприводом енергоустановки на сонячних батареях.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи спостереження за сонячним випромінюванням, оцінка фотоелектричного потенціалу електроенергії, на території України, вимірювання необхідних параметрів, комплексні методи аналізу та синтезу структурних схем, методи теорії автоматичного управління.

Наукова новизна. Побудовано та досліджено математичну модель фотоелектричного датчика, що складається з трьох фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Розроблено алгоритми роботи системи автоматизованого управління сонячною електростанцією.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що спроектована система автоматичного управління електроприводом орієнтації енергоустановки на сонячних батареях дозволяє приблизно на 40% підвищити вироблену потужність електроенергії протягом року.

Апробація.

1. Петро Головацький, Андрій Сивак, Андрій Завійський, Андрій Біленький, Андрій Стахів. Структура системи управління автоматизованим розливом лако-фарбових матеріалів / Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ – 2024), Тернопіль, 2024. С. 80–84.

2. Сегін А.І., Стахів А. В., Квасниця Р.В. Двоосна система автоматичного управління приводом налаштування орієнтації фотомодулів сонячної електростанції. // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР СМ–2024). Тернопіль, 2024. С. 5–13.

1 АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА ТИПІВ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

1.1 Аналіз сонячного випромінювання на території України та оцінка його енергетичного потенціалу

Застосування СЕС є найбільш актуальним в ізолюваних від енергосистеми населених пунктах та важкодоступних територіях. Заміна дизельних генераторів на СЕС у таких регіонах допоможе полегшити енергетичні та екологічні проблеми, дозволить скоротити обсяги споживання органічного палива, а також є економічно вигідною.

У статті [10] наведено результати комп'ютерного моделювання СЕС, які доводять, що СЕС з коефіцієнтом корисної дії (ККД) фотоелектричного модуля (ФМ) 20 % та зі стороною квадрата 25 км дозволяє виробляти електроенергію 500 ТВт•год цілодобово з 1 квітня по 1 вересня. Це дозволить задовольнити всі потреби України в електроенергії протягом п'яти місяців. У березні та вересні тривалість електропостачання становитиме 12 години на добу. Таким чином, мешканці на 5-7 місяців зможуть практично відмовитися від використання паливних електростанцій та перевести їх у розряд резервних. Авторами також пропонується заощаджені природні ресурси відправляти на експорт. Ця стаття показує перспективність використання сонячної енергії в Україні.

У СЕС перетворювачем сонячної енергії на електричну енергію є фотоелектричний модуль (ФМ). Енергія, отримана ФМ, отже, і вироблена енергія, залежить від кількості сонячної радіації, що попала на його поверхню [12]. Залежно від просторової орієнтації поверхонь ФМ можна регулювати величину одержуваної енергії. Отримувана енергія буде максимальна при падінні сонячних променів перпендикулярно до поверхні ФМ. Застосування системи стеження за Сонцем дозволить постійно спрямовувати ФМ на «найяскравішу пляму» на небі протягом дня, що

дозволить збільшити вироблення енергопотужності [13-14]. Система стеження виконує роль системи контролю раціональної орієнтації ФМ (далі за текстом – системи контролю).

Відповідно до джерела [15], застосування одновісних систем контролю дозволить збільшити вироблену потужність ФМ на 20% у Сіднеї щодо стаціонарно встановленого. Для Каліфорнії приріст потужності становитиме 35 % при введенні одновісної системи та 45 % – при двовісній [16]. Автори статті [17] довели, що застосування двовісної системи контролю дозволить збільшити вироблену потужність ФМ на 34%. Випробування двовісної системи у Франції [18] показали, що стеження за Сонцем по двох осях сприяє збільшенню виробленої потужності на 27% щодо пасивних систем контролю (систем, заснованих на програмуванні алгоритму повороту ФМ) та на 45% щодо фіксованого ФМ.

Застосування систем контролю ФМ є ефективним для всіх географічних положень, котрим було проведено подібні дослідження, системи дають додатковий приріст потужності до 45 %.

Використання геліопотенціалу для енергетичних цілей вважається за доцільне, якщо річний прихід сонячної радіації на горизонтальну поверхню становить не менше $1200 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ (або $3,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ в тиждень) і тривалість сонячного випромінювання більше 2000 год/рік [19]. Розглянемо на території України розподіл протягом року сумарної середньотижневої сонячної радіації на похилу поверхню південної орієнтації з кутом нахилу рівним широті місцевості [20] і визначимо сприятливі регіони, відповідні вимоги доцільності використання сонячної енергії.

На рисунку 1.1 предсталено карту України з розподілом сумарної середньоденної сонячної радіації у відповідності до географічних широк [x2].

Як видно з рисунку 1.1, із півночі на південь країни значення сонячної радіації змінюється від 2,6 до $5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за день. Лише на півдні країни значення сонячної радіації перевищує $3,3 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за день, характеризуючи цю область найбільш сприятливою для використання СЕС.

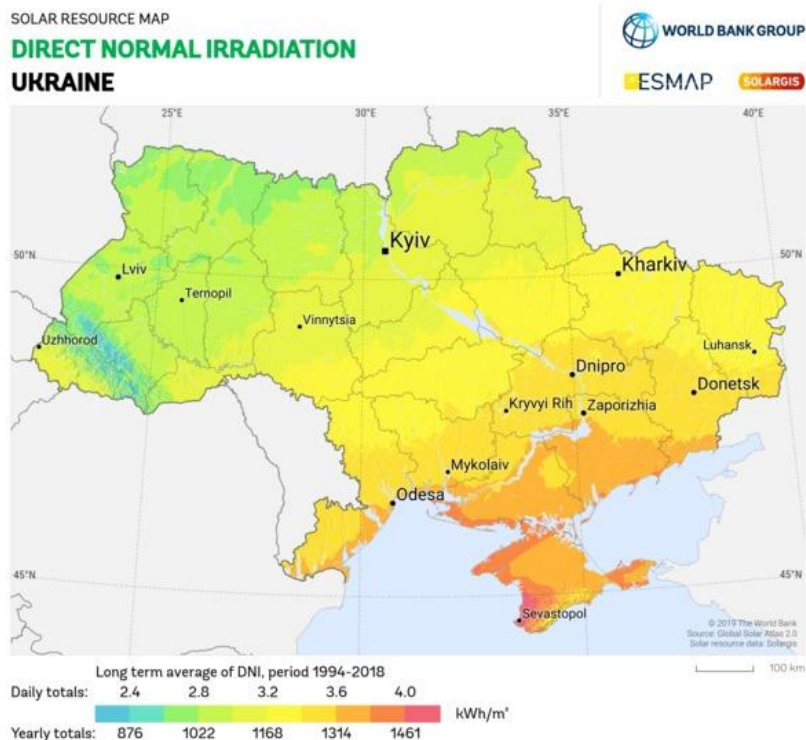


Рисунок 1.1 – Пряма сумарна середньоденна сонячна радіація на похилу поверхню з кутом нахилу рівним широті місцевості (рік)

Значення представлені на рисунку 1.1 враховують тільки пряму середньоденну сонячну радіацію. Застосування системи контролю дозволить знизити показник доцільності використання сонячної енергії, за рахунок збільшення збору потужності протягом дня, що видно з рисунку 1.2.

Завдяки системам контролю більшість країни стала сприятливою використання геліоенергетики, виключаючи райони крайньої півночі. У період із квітня по вересень приходить сумарна сонячна радіація на поверхню, що стежить, настільки висока, що на всій території Росії доцільно використання СЕС. На рисунку 1.2 видно, що значення сонячної радіації змінюється від 3 до 4 кВт·год/м² день. Для визначення можливостей отримання електроенергії в залежності від регіону, зручно представити карту у оцінці сонячного випромінювання в фотоелектричному потенціалі (рисунок 1.3).

З рисунку 1.3. можна оцінити можливість отримання електроенергії в залежності від розташування певної території країни у відповідності до

географічної широти та інших особливостей.

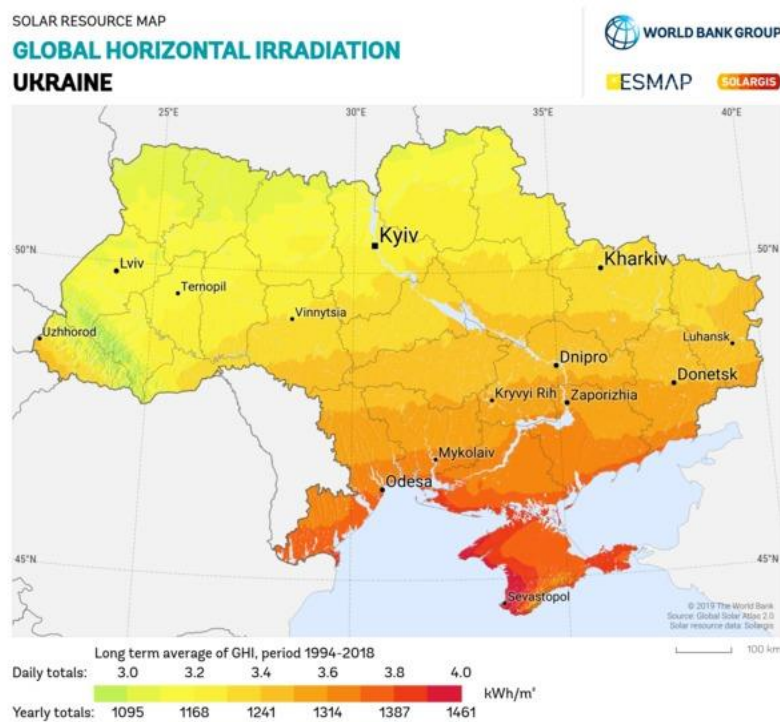


Рисунок 1.2 – Середньоденна сонячна радіація на поверхню, що стежить за Сонцем (рік) – Глобальне горизонтальне опромінення.

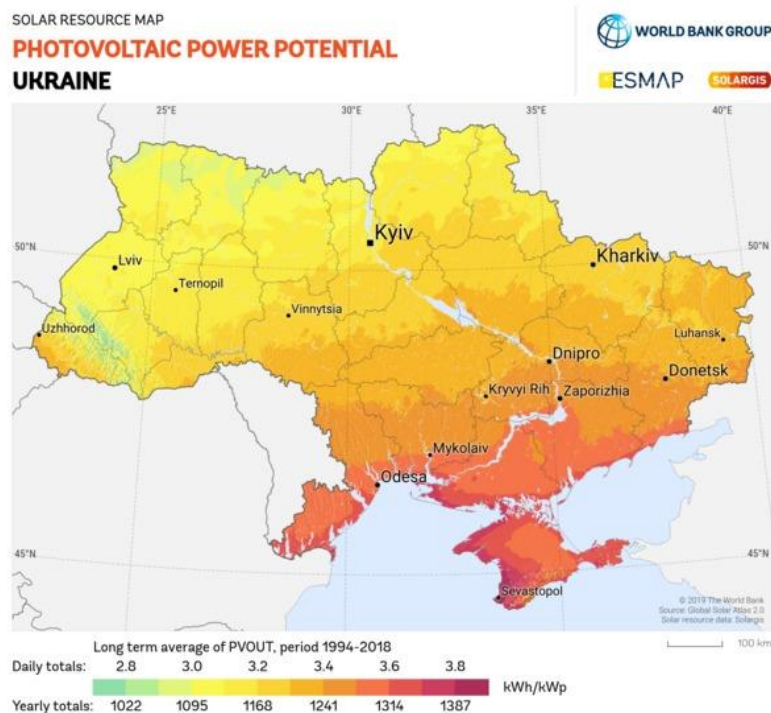


Рисунок 1.3 – Фотоелектричний потенціал електроенергії.

Представлені карти мають важливе значення при оцінці доцільності використання СЕС. Вони не втрачають своєї актуальності при швидкому розвитку ФМ, які в перспективі будуть вдосконалюватися, а їхній ККД зростати. Тим не менше представлені карти теж необхідно оновлювати через зміну кліматичних умов, активності Сонця та інших причин, щоб правильно оцінювати фотоелектричний потенціал відповідних територій. Споживачу при вирішенні доцільності використання СЕС і розрахунку кількості ФМ слід враховувати, що застосування систем контролю дозволить значно збільшити отримувану потужність, що призведе до зменшення кількості застосовуваних ФМ.

Актуальність робіт, націлених на розробку та впровадження систем контролю для СЕС, не викликає сумнівів. Вивченням, розробкою та активним використанням систем контролю займаються у різних країнах. Дані дослідження відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки і дозволяють збільшити відбір потужності ФМ, зменшити термін їхньої окупності, і, як наслідок, збільшити конкурентоспроможність СЕС, розширити традиційну географію використання СЕС у регіонах України, де раніше сонячна енергетика слабо використовувалася. До цих регіонів в основному відносяться північні області країни, в тому числі і Тернопільська область. Проте навіть там все частіше встановлюються СЕС через дотаційність «зеленого» тарифу на електроенергію з відновлювальних джерел до яких відноситься і сонячна енергетика.

Проектуючи СЕС, споживач розраховує необхідну кількість ФМ, виходячи із значення середньоденної сонячної радіації для даної місцевості, розміру та ККД ФМ, вказаного виробником у паспорті.

Такий підхід не дозволяє зробити точний прогноз отриманої потужності з таких причин. Згідно з ДСТУ EN 60904–2:2018. – на заміну ДСТУ EN 60904–2:2009. [21], ККД ФМ обчислюється як відношення потужності ФМ до сонячної енергії, що надійшла на його поверхню. Виробник вказує ККД за нормальних умов: щільність потоку сонячної енергії

1000 Вт/м² та температури сонячних елементів 25°C. При вимірі ККД у нормальних умовах напрямок потоку сонячної енергії перпендикулярно площині ФМ. При такому взаємному розташуванні джерела та ФМ вихідна потужність буде максимальною. Однак у реальних умовах джерелом світла є Сонце, яке безперервно переміщається небозводом протягом дня. При стаціонарно встановленому ФМ на південь під кутом до горизонту, що дорівнює широті місцевості, напрям сонячних променів буде перпендикулярно лише опівдні. Таким чином, використання значення ККД ФМ при розрахунку очікуваної отриманої потужності не дасть реальної картини і введе в оману споживача.

У деяких джерелах літератури [22, 23] використовується термін «ефективність використання сонячної енергії» різними сонячними установками, у тому числі водонагрівальними, концентраторами та іншими. Часто авторами цей термін застосовується як синонім ККД. Введення систем контролю дає змогу максимально ефективно використовувати сонячну енергію. Системи контролю є одним із найдоступніших способів підвищення ефективності використання сонячної енергії. Крім того, даний спосіб застосовується для вже діючих СЕС, для яких необхідно змінити тільки опорну конструкцію. Системи контролю підвищують вироблення в ранковий і вечірній годинник і дозволяють зробити більш рівномірною генерацію енергії протягом дня.

1.2 Загальні відомості про сонячні енергоустановки

Пристрої, що перетворюють сонячну енергію на електричну або теплову, називають геліоустановками.

Сонячна батарея – один із генераторів альтернативних видів енергії, що перетворюють сонячне випромінювання на електрику. Найпростіша сонячна енергоустановка складається із батареї сонячних елементів у вигляді ФМ, які

спільно з іншими елементами становлять напівпровідниковий фотоелектричний генератор. Дія ФМ ґрунтується на використанні явища внутрішнього фотоефекту. Внаслідок роботи ФМ генерують постійний струм. Енергія може використовуватися як безпосередньо різними приладами, так і запасатися в акумуляторних батареях для подальшого використання або перетворюватися на змінний струм напругою 220 В.

Модульний тип конструкції дозволяє створювати установки практично будь-якої потужності та робить їх досить перспективними (рисунок 1.4). Установки мають малу масу та відрізняються простотою обслуговування.

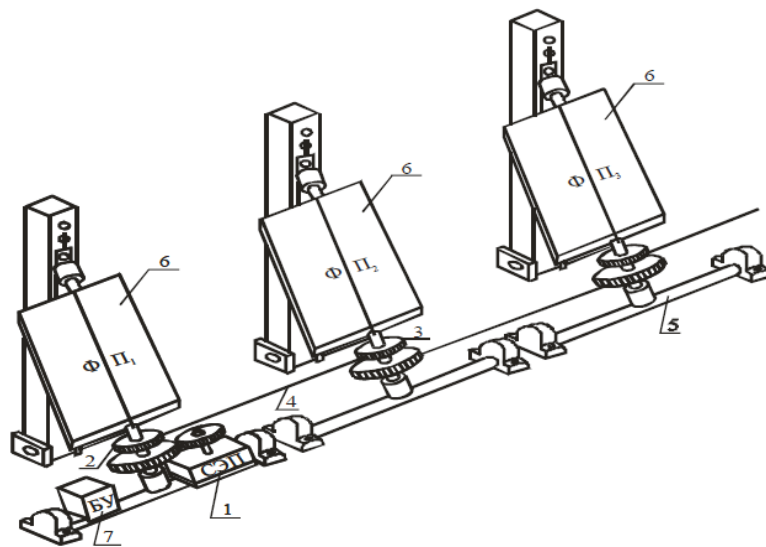


Рисунок 1.4 – Конструкція модульної енергетичної фотоелектричної станції.

Недоліком фотоелектричного перетворювача є висока вартість та низький ККД. Фотоелектричний ефект виникає у сонячному елементі при його освітленні світлом у ближній інфрачервоній області спектра. У сонячному елементі напівпровідникового кремнію товщиною 50 мкм поглинаються фотони, і їх енергія перетворюється в електричну за допомогою р-п з'єднання. Перехід на гетеросполуку типу арсеніду галію та алюмінію, застосування концентраторів сонячної радіації з кратністю концентрації 50-100 дозволяє підвищити ККД до 35%. Однак вартість елементів на базі сполуки арсеніду галію та алюмінію значно вища, ніж на

базі кремнію [27].

Нині ККД перетворення сонячної енергії фотоелементів з урахуванням монокристалічного кремнію сягає 12-15 %. Тим не менш, витрати на створення геліоустановок, навіть якщо враховувати при цьому тільки витрати на виробництво фотоелементів, за своєю питомою вартістю все ще перевершують витрати на створення атомних тепло-гідроелектростанцій. Це низькою щільністю сонячного випромінювання. Необхідно збирати сонячне випромінювання із великих площ, покриваючи їх дорогими напівпровідниковими фотоелементами. Вартість одержуваної електроенергії значно перевищує вартість електроенергії, що виробляється традиційними методами. З часом відбувається зниження вартості сонячних елементів, головним чином, за рахунок зниження вартості напівпровідникових матеріалів. На даний момент собівартість сонячних елементів становить приблизно 2-3 дол/Вт. Вартість фотоелектричних геліоустановок у складанні сягає 3-4 дол/Вт за вартості електроенергії 0,25-0,56 дол/Вт [27].

Як один із способів зниження вартості сонячної електроенергії може розглядатися застосування концентраторів випромінювання [28, 29]. У цьому випадку необхідна площа сонячних елементів, отже, і їх вартість можуть бути знижені пропорційно до кратності концентрування сонячного випромінювання дзеркалами або лінзами. Однак у цьому випадку виникає низка проблем. Перш за все, при підвищенні потужності випромінювання збільшується щільність фотоструму, що генерується, що вимагає ускладнення конструкції сонячних елементів для зменшення омичних втрат. По-друге, збільшується теплове навантаження на сонячні елементи, що може вимагати створення ефективної системи тепловідведення. По-третє, потрібна розробка високоефективних та дешевих концентраторів випромінювання. І, по-четверте, потрібно порівняно точніше наведення на Сонце. Таким чином, доцільність застосування концентраторів необхідно визначати як різницю економії коштів за рахунок зменшення площі фотоперетворювача та витрат, спрямованих на вирішення вищезазначених проблем [30-32].

Сонячні електростанції із застосуванням теплових двигунів нині переважно будують або як СЕС баштового типу, або як СЕС турбогенераторного типу. У баштових СЕС використовується центральний приймач з полем геліостатів, що забезпечує високий рівень концентрації сонячного випромінювання [33-35]. Керування системою, як правило, здійснюється за допомогою комп'ютера. Як робоче тіло в тепловому двигуні зазвичай використовується водяна пара з температурою до повітря та інші гази до низькокиплячих органічних рідин (у тому числі фреони) – до рідкометалевих теплоносіїв – до 8000 °С [36, 37].

У СЕС модульного типу використовується велика кількість модулів, кожен з яких включає параболоциліндричний концентратор сонячного випромінювання і приймач, розташований у фокусі концентратора і використовуваний для нагрівання робочої рідини, що подається в тепловий двигун, з'єднаний з електрогенератором (рисунок 1.5).

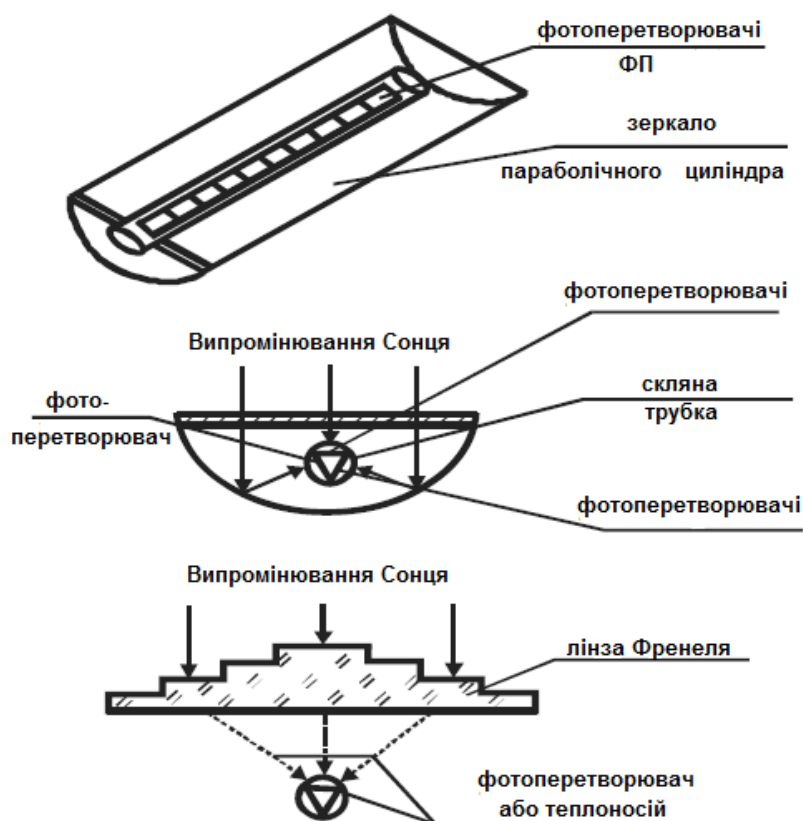


Рисунок 1.5 – Оптичні концентратори сонячної енергії.

1.3 Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі, що використовуються у сонячних енергоустановках

Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі – це прилади, принцип дії яких ґрунтується на фотогальванічному ефекті – явище виникнення фото-ЕРС в електричному р-п переході при опроміненні світловим потоком. Широке застосування знаходять сонячні фотоелементи із кремнію та арсеніду галію. Основними параметрами є вихідна потужність P та коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_{\phi} = \frac{P_{MAX}}{P_{CB}}$$

де P_{MAX} – максимальна потужність, яку можна отримати від фотоелемента, Вт; P_{CB} – потужність потоку випромінювання, що падає на фотоелемент, Вт.

У найкращих монокристалічних кремнієвих сонячних фотоелементів ККД досягає 10-15%. Такий відносно низький ККД пов'язаний з недосконалістю сонячного фотоелемента як перетворювального пристрою, в якому одночасно з корисним перетворенням відбуваються процеси, що супроводжуються марним розсіюванням.

Усі види втрат у сонячному фотоелементі можна поділити на три групи:

- втрати енергії, пов'язані з процесами, коли енергія, що перетворюється, має вигляд променистої енергії – втрати випромінювання;
- Втрати енергії, генерованої випромінюванням електронів і дірок, що відбуваються під час їх руху всередині напівпровідника;
- Електричні втрати.

Втрати першої групи відбуваються внаслідок відображення падаючого випромінювання від поверхні фотоелемента, проходження випромінювання на глибину більше дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду

(поглинання випромінювання в неробочій області), нефотоелектричне поглинання випромінювання у провіднику, поглинання без утворення пари нерівноважних носіїв заряду.

Для сонячного елемента з кремнію до нефотоелектричного поглинання відноситься вся довгохвильова частина сонячного спектру з довгою хвилі понад 1,09 мкм. Ця частина випромінювання у діапазоні Сонця становить 12-20 % за потужністю [40]. Для зменшення втрат, пов'язаних із нефотоелектричним поглинанням випромінювання Сонця, розробляються гетеропереходи між напівпровідниками з різною шириною забороненої зони. Розширення області спектральних характеристик сонячних фотоелементів може бути досягнуто при використанні систем з шириною забороненої зони, що плавно змінюється, [41].

Втрати другої групи відбуваються за рахунок:

- рекомбінації генерованих випромінюванням пар носіїв заряду, що супроводжується передачею енергії решітки;
- розсіювання енергії нерівноважними носіями заряду при взаємодії їх із ґратами;
- наявність внутрішнього, послідовного опору фотоелемента, що зменшує напругу на навантаження;
- витоку фотоструму, обумовленого опором резистора, що шунтує перехід.

Для зниження втрат рекомбінацію необхідно, щоб товщина шару, де утворюються пари нерівноважних носіїв заряду, не перевищувала дифузійної довжини неосновних носіїв заряду. Однак у тонкому зовнішньому шарі напівпровідника випромінювання поглинається незначно. Для задоволення обох вимог сонячні елементи необхідно виготовляти з матеріалів з великою довжиною дифузійної неосновних носіїв заряду, що залежить від чистоти напівпровідника і регулярності його структури. Крім того, слід звести до мінімуму швидкість поверхневої рекомбінації.

На рисунку 1.6 представлено спрощену еквівалентну електричну схему фотоперетворювача.

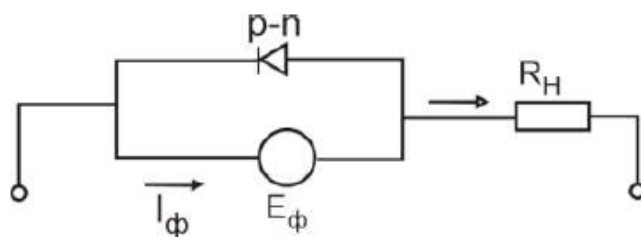


Рисунок 1.6 – Спрощена еквівалентна схема фотоперетворювача

Недоліком сонячних фотоелементів на базі монокристалів є неможливість одержання великих робочих поверхонь, низьке відношення вихідної потужності до маси, а також висока вартість. За цими показниками вони поступаються плівковим фотоелементам [42].

Плівкові фотоелементи з сульфїду кадмію і телуриду кадмію характеризуються значно вищим ставленням вихідної потужності до маси (різниця більш ніж у чотири рази), дешевшими за монокристалічні кремнієві фотоелементи, мають досить високу радіаційну стійкість і більший термін служби. Але при цьому їх ККД поступається монокристалічним фотоперетворювачам.

Сонячні фотоелементи, змонтовані та електрично з'єднані за певними схемами, утворюють сонячну фотобатарею. Фотобатареї мають нижчий порівняно з окремими фотоелементами ККД за рахунок комутаційних втрат та неідентичності вольтамперних характеристик фотоелементів, що призводить при з'єднанні їх у батарею до порушення оптимального режиму роботи кожного фотоелемента.

2 СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ ЗА ПОЛОЖЕННЯМ СОНЦЯ

2.1. Аналіз переміщення Сонця над земною поверхнею та визначення кутів його положення у відповідності до періоду року та доби.

Для максимальної ефективності роботи ФМ, тобто, перетворення сонячної енергії на електричну, необхідно, щоб сонячні промені були спрямовані перпендикулярно поверхні модуля, тобто, необхідно стежити за положенням Сонця на небосхилі. У такому разі освітленість поверхні ФМ буде максимальною [44–46]. Для цього необхідно, щоб система контролю максимуму освітленості протягом дня періодично змінювала положення ФМ для збереження прямого кута між напрямком променів та його площиною.

Система, що забезпечує поворот ФМ протягом дня на максимальний потік сонячного випромінювання називається системою контролю максимуму освітленості ФМ.

Переміщення Сонця небом протягом року і дня є вхідною характеристикою системи контролю. Система контролю відповідає за орієнтування ФМ на Сонце протягом дня та року, тому розглянемо геометричні співвідношення між положенням Сонця та поверхнею Землі.

Протягом року Земля описує еліптичний шлях навколо Сонця (рисунок 2.1). Цей рух є причиною зміни сезонів року та тривалості світлового дня. Зміна висоти Сонця на небосхилі протягом року визначається прецесією земної осі (рисунок 2.2), що відповідає за відмінювання осі Землі щодо площини екліптики протягом року. Протягом дня Земля також обертається навколо своєї осі, описуючи повне коло, що обумовлює рух Сонця від сходу до заходу по відношенню до земної поверхні над певною територією [47].

За добу земля повертається навколо своєї осі на 360° , проте ФМ генеруватиме енергію лише протягом світлового дня. Тривалість дня змінюється в залежності від широти та місця встановлення ФМ. Необхідно

простежити за двома умовами зміни висоти Сонця: протягом дня та умови зміни висоти Сонця по порах року [48-50].

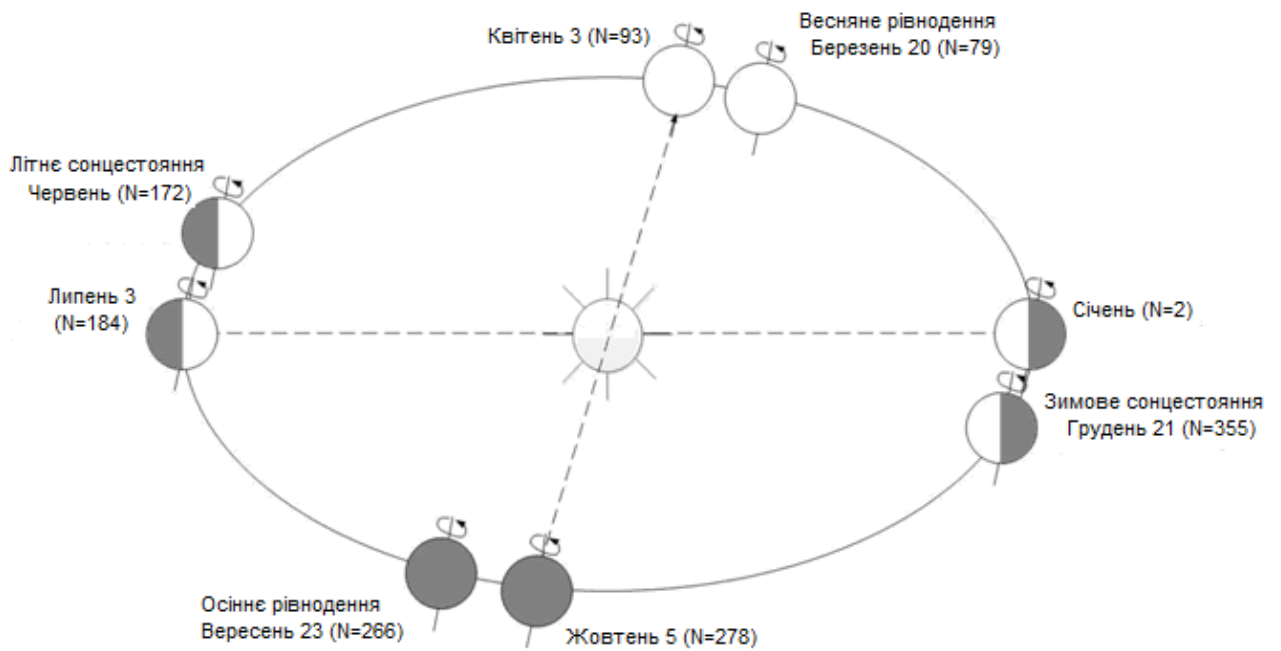


Рисунок 2.1 – Обертання Землі навколо Сонця протягом року



Рисунок 2.2 – Схематичне зображення прецесії земної осі

Положення Сонця на небосхилі може бути описано двома кутами: азимут і зеніт. Азимут – кут між справжнім напрямом півночі та проекцією Сонця на горизонтальну площину Землі. Зенітний кут характеризує висоту сонцестояння. Азимут змінює значення протягом дня через обертання Землі навколо своєї осі (його називають годинниковий кут), а зенітний кут змінюється через прецесію земної осі. Отже, при проектуванні системи контролю необхідно брати до уваги два обертальні рухи Сонця: щоденний рух (переміщення по осі азимуту) та щорічної прецесії земної осі (переміщення по осі екліптики) [51-52].

Існує два способи контролю положення Сонця: по одній осі та по двох. Кількість осей визначає механізм системи контролю: одновісна та двовісна (рисунок 2.3).

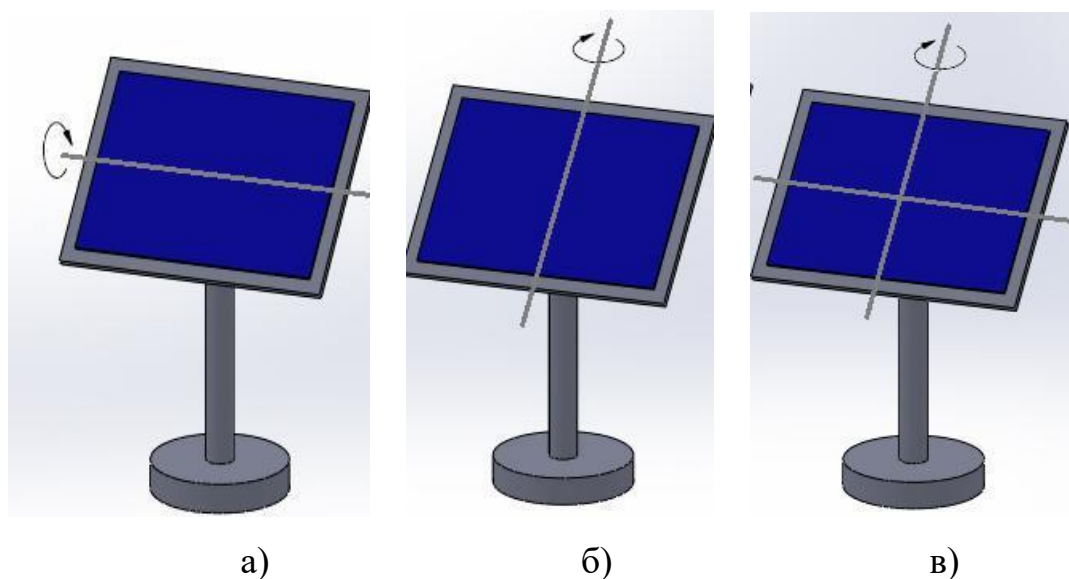


Рисунок 2.3 – Системи контролю: а – одновісна азимутальна, б – одновісна зенітальна, в – двовісна

Одновісні системи обертають ФМ лише в одній площині, що здійснюють контроль при переміщенні Сонця за азимутом або екліптикою. Насправді системи контролю за осі екліптиці не застосовуються, т.к. переміщення Сонця протягом дня осі азимуту значніше.

Досягнення більшої ефективності при одновісному стеженні з

екліптиці другу вісь виставляють паралельно осі Землі [52], тобто. на південь під кутом до горизонту, що відповідає широті місцевості (рис. 2.4).

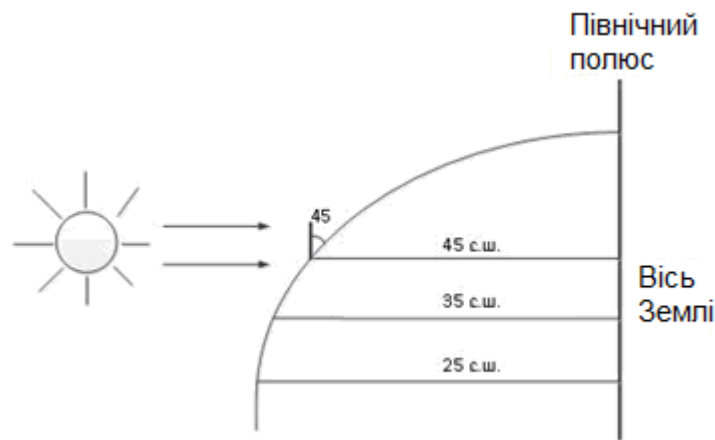


Рисунок 2.4 – Розташування ФМ щодо горизонту

Двохосні системи контролюють положення Сонця у двох площинах (азимуті та екліптиці Сонця), що забезпечує точне відстеження сонячного переміщення протягом дня.

Двохосні системи мають більшу ефективність порівняно з одновісними, проте вартість їх набагато вища у зв'язку з ускладненням їх конструкції та блоку контролера. Тому частіше використовують системи з однією віссю контролю, а другу вісь, як говорилося раніше, виставляють паралельно осі Землі або досягнення більшої ефективності виставляють вручну 3-4 рази у рік найбільш ефективний кут.

2.2 Способи та системи контролю орієнтації ФМ

Існує три способи контролю орієнтації ФМ [53]:

- ручний спосіб, у якому наведення на Сонці проводиться оператором;
- пасивний спосіб, у якому поворот ФМ протягом дня проводиться у разі заданому алгоритму управління;
- Активний спосіб, що забезпечує постійну орієнтацію на

максимальний потік сонячного випромінювання.

Варто зазначити, що розглянуті на чолі способи, методи, датчики та системи на їх основі також застосовні для концентраторів сонячного випромінювання та гібридних теплосонячних установок. Однак у рамках тематики дисертації вони розглядаються контролю орієнтації ФМ.

Розглянемо системи, засновані на даних методах контролю. Системи контролю на основі ручного способу називаються системи ручного наведення на Сонці, а використовують пасивний та активний спосіб контролю – пасивні системи контролю та активні системи контролю.

2.2.1 Системи ручного наведення ФМ на Сонце.

У системах з ручним наведенням ФМ на Сонці контроль здійснюється оператором. Для орієнтації великої кількості ФМ використовується пульт керування загальним приводом. Точність, а, як наслідок, і вироблена протягом дня потужність безпосередньо залежить від роботи оператора: його вибору кута нахилу ФМ, кількості поворотів ФМ протягом дня і часу роботи поворотного пристрою [13].

Системи ручного наведення на Сонці набули найменшого поширення. Однак цей спосіб дозволяє оператору швидко відстежити наявність поломки у разі виникнення. Ручний спосіб найчастіше використовується як резервний для великої кількості ФМ, керованих одним приводом. Також до ручного наведення вдаються при використанні активного способу контролю, у разі відмови з будь-якої причини датчика системи контролю. Деякі фірми використовують ручний спосіб спільно з активним для орієнтування ФМ вранці на сонце, що сходить, якщо в датчику, що використовується, не вирішена проблема запуску вранці.

2.2.2 Пасивні системи контролю.

Усі пасивні системи контролю мають один принцип роботи – управління швидкістю обертання ФМ, з урахуванням розрахунково-

постійних характеристиках даного географічного становища ФМ.

Вихідні величини розробки алгоритму роботи системи контролю є постійними: географічна широта місцевості, тривалість дня даної місцевості, зміна висоти сонцестояння протягом дня і протягом року.

Кут та швидкість повороту ФМ визначається виходячи з даних метеослужби про тривалість дня, висоти Сонця вранці, максимальної висоти опівдні та ввечері у визначений час, координат розташування ФМ [54].

Пасивні системи мають ряд недоліків, що є причиною їхньої непопулярності на сьогоднішній день.

Для використання таких систем необхідні дані метеослужби для кожного конкретного розташування ФМ та вимагають перерахунку кута та швидкості повороту ФМ, а отже, зміни програми. Для перерахунку та перепрограмування мікроконтролера необхідна робота фахівців, що позбавляє її універсальності та збільшує вартість установки.

При використанні пасивної системи контролю необхідна точна установка ФМ по сторонах світла, що можливе при використанні додаткових приладів та потребує досвіду роботи.

До того ж, робота з алгоритму неспроможна забезпечити орієнтування ФМ на максимальний потік сонячного випромінювання, який може відповідати становищу Сонця при хмарному небі.

Незважаючи на рівень сонячної радіації і погодні умови, пасивна система працює за заданим алгоритмом, що призводить до неефективного використання в похмурі дні, двигун споживатиме електроенергію за відсутності необхідності орієнтування. Іноді це вирішується з допомогою датчика освітленості, що зумовлює використання систем з датчиком, тобто. активних, про які буде розказано у наступному пункті.

2.2.3 Активні системи контролю.

Активні системи контролю набули найбільшого розвитку та поширення на сьогоднішній день. На відміну від пасивних систем активні орієнтують

поверхню ФМ на максимальний потік сонячного випромінювання, тобто на найяскравішу пляму на небі, яка часом не відповідає становищу Сонця на небі.

Активні системи беруть до уваги не тільки пряме сонячне випромінювання, але також, наприклад, світло, що відбивається від снігу, води або каменю світлого кольору (рисунок 2.5 а), дифузне сонячне випромінювання (рисунок 2.5 б, в), яке проникає через хмари, і робить це індивідуально кожної системи (рисунок 2.5 г). Оцінити математично приріст потужності залежно від цих факторів не просто, проте численні натурні випробування ФМ підтверджують, що вплив описаних факторів на потужність, вироблену ФМ, суттєвий [55].

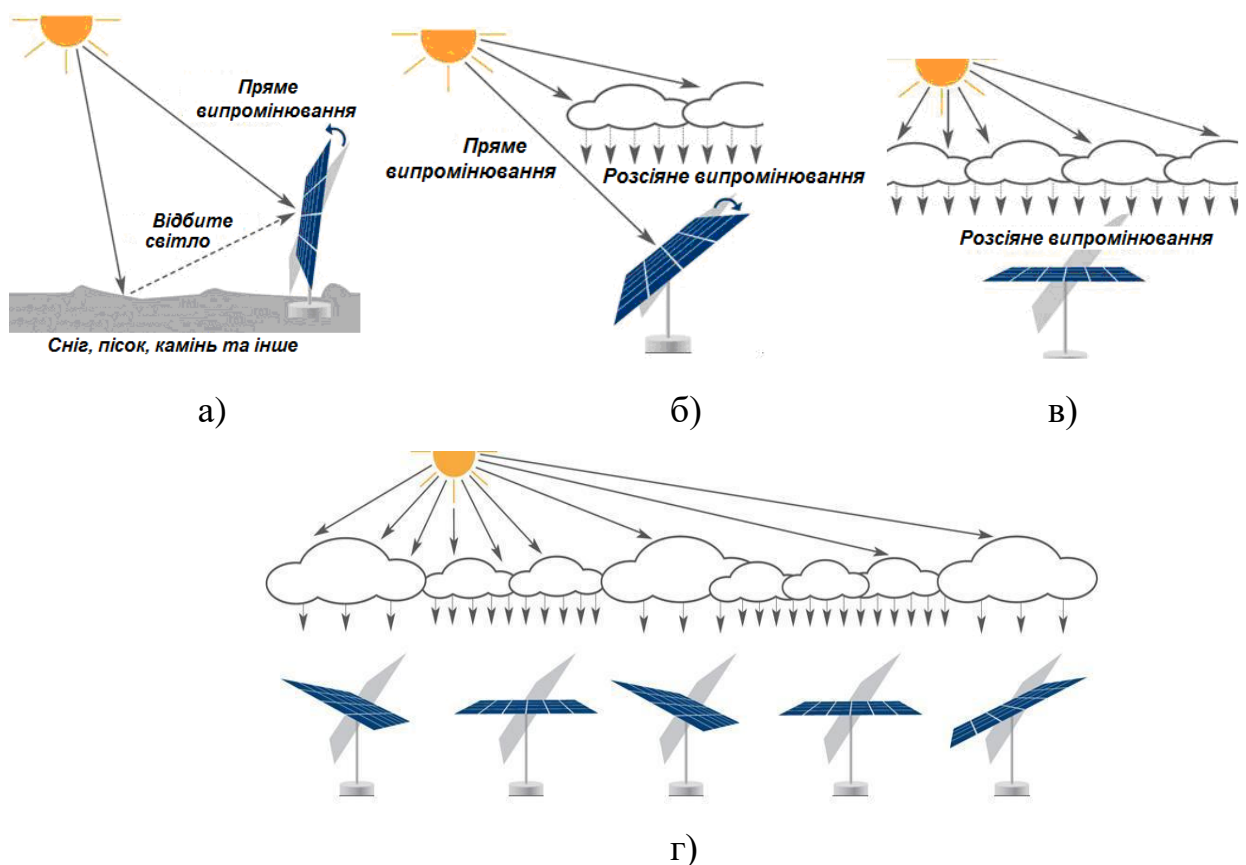


Рисунок 2.5 – Орієнтація на яскраву пляму за різних погодних умов

В активних системах важливо те, що виробляються ті рухи модуля, які призведуть до збільшення виробленої потужності.

На сьогоднішній день існує велика кількість способів реалізації активних систем контролю та принципів їхньої роботи. Активні системи складаються з трьох основних блоків: датчик, блок обробки сигналу датчика та вироблення керуючого сигналу для поворотного пристрою та самого поворотного пристрою. Винятки становлять системи на основі термочутливих елементів, які є датчиком, і поворотним пристроєм, а блок контролю відсутній. Докладніше про такі системи буде розказано пізніше.

У загальному вигляді всі активні системи мають однаковий принцип роботи та блок схему, зображену на рисунку 2.6.

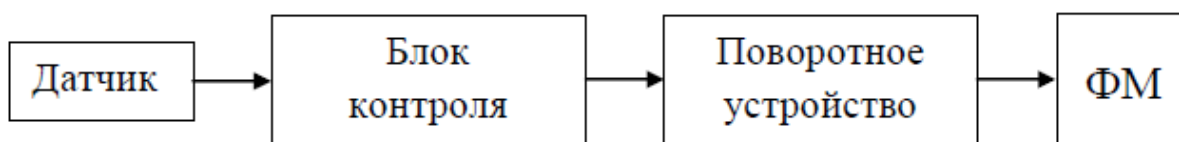


Рисунок 2.6 – Структурна схема активної системи контролю орієнтації ФМ

Принцип роботи активних систем полягає в наступному: датчик реагує на зміну положення яскравої плями на небі і подає сигнал блоку контролю, який його обробляє за заданим алгоритмом і при необхідності видає команду поворотного пристрою.

Основна проблема реалізації схеми - формування керуючого сигналу від датчика до блоку контролю та алгоритм управління системою контролю.

Блок контролю може бути реалізований у будь-якому варіанті: від дискретних елементів до програмованих мікроконтролерів. Датчик є найважливішим елементом системи, т.к. саме від нього залежить точність орієнтування та адаптованість до природних явищ. Тому актуальна розробка датчика, реагує зміну становища яскравого плями у небі, чи, за відсутності такого, здатного подати сигнал про відсутність необхідності орієнтуватися.

До датчика системи контролю висуваються такі вимоги: похибка визначення положення яскравої плями на небі не більше 10° , температурна

стабільність, можливість роботи в польових умовах, зручність встановлення та експлуатації.

3 ПРИСТРОЇ КОНТРОЛЮ МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Датчики, що застосовуються у перетворенні сонячної енергії на електричну

Пристрої контролю максимального потоку сонячного випромінювання залежить від фізичних властивостей потоку сонячного випромінювання. Потік сонячного (оптичного) випромінювання, що падає на поверхню будь-якого тіла, частково відбивається, частково проходить через тіло і частково поглинається ним.

Поглинена частина енергії оптичного випромінювання перетворюється на тепло, підвищуючи температуру тіла, що є перетворення сонячної енергії на теплову. Інший вид перетворення енергії оптичного випромінювання - фотоефект (фотоелектронна емісія), фотолюмінесценція, фотохімічні перетворення та ін., Що являє собою перетворення сонячної енергії на електричну [56].

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що пристрої контролю слід розробляти, ґрунтуючись на двох властивостях випромінювання Сонця – підвищення температури освітленого тіла та поглинання ним променистої енергії. Розглянемо пристрої, засновані на перетворенні сонячної енергії на електричну та теплову.

Усі датчики оптичного випромінювання можна поділити на такі основні групи:

- системи без використання датчиків;
- скануючий датчик;
- щілинні сонячні датчики;
- датчики на ефекті Саньяка;
- Геліотрекер.

3.1.1 Системи контролю без використання датчика

Найпростішою активною системою контролю є система, без застосування додаткових датчиків [57]. Як чутливі елементи використовують кілька ФМ, кількість яких залежить від кількості осей стеження.

Одновісні системи мають два однакових ФМ, розташованих на одній з осей: Захід-Схід для контролю за становищем яскравої плями по осі азимуту або на осі Північ-Південь – для контролю за осі екліптики. Двовісні системи мають додаткові ФМ, розташовані по другій осі (рисунок 3.1).

Сигнали (значення струму чи напруги) з обох ФМ надходять у блок контролю. Сигнали порівнюються і, якщо одне зі значень більше, поворотного пристрою (або кільком, в залежності від конструкції) надходить сигнал для повороту поверхонь у бік ФМ з великим значенням вихідного сигналу.

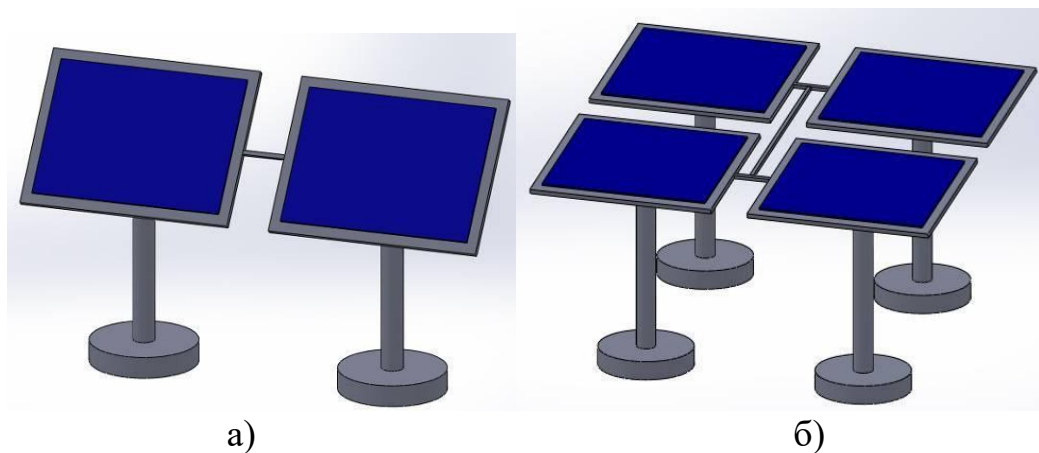


Рисунок 3.1 – Активні системи контролю без використання датчика:
а – одновісна, б – двовісна.

До недоліків описаної системи відносяться низька точність та чутливість. Це пояснюється розподіленістю чутливих елементів, і, як наслідок, їх нерівномірним нагріванням, яке, як відомо, впливає на вихідний сигнал [58]. Крім того, такий спосіб контролю підходить тільки для двох і більше ФМ.

Система контролю без використання датчика може бути використана лише ФМ. Переважно мати систему з датчиком у вигляді малогабаритного окремого блоку, який може бути освоєний у виробництві та придатний для використання з будь-яким типом та кількістю сонячних модулів (теплових колекторів, концентраторів сонячного випромінювання або ФМ).

3.1.2 Датчик на ефекті Саньяка

Датчиком є оптичний гіроскоп, принцип дії якого ґрунтується на ефекті Саньяка. Через розщеплювач сонячний промінь розповсюджується у двох напрямках на поверхню ФМ, потім два промені відбиваються від неї та підсумовуються в розщеплювачі. Якщо при цьому площина ФМ спрямована на Сонце, два промені мають однакову довжину, і при складанні їх немає фазового зсуву. Коли Сонце знаходиться під деяким кутом до площини ФМ, між двома світловими хвилями виникає різниця фаз. Це називається ефектом Саньяка. Вимірявши різницю фаз, можна визначити положення джерела світла. Оскільки частота світла становить кілька сотень терагерц, навіть її незначні зміни дозволяють виміряти різницю частот, тому даний датчик характеризується високою чутливістю і роздільною здатністю порядку $0,001^\circ / \text{год}$. Головними джерелами похибок для датчика ефект Саньяка є дрейф нуля, викликаний зміною температур, магнітними полями тощо [59].

На сьогоднішній день існує низка невирішених проблем використання даного датчика: нелінійність вихідного сигналу, дрейф вихідного сигналу, зміна довжини оптичного шляху під впливом теплового розширення, тиску та механічних деформацій.

Крім описаних проблем, датчик, заснований на ефекті Саньяка, відрізняється складністю конструкції та дорожнечою його виконання. До того ж така висока точність орієнтування на Сонці не обґрунтована ФМ. Тому датчики, які працюють за цим принципом не знайшли практичної реалізації для наземних ФМ.

3.1.3 Геліотрекер

Геліотрекер є невеликою платою з укріпленими на ній чотирма елементами, що є фотодатчиками (фоторезисторами, фотодіодами або ін.) [60]. Елементи розділені між собою хрестоподібною перегородкою (рисунок 3.2). При орієнтації на Сонце або яскрава пляма висвітлено всі чотири елементи. При зміні положення яскравої плями на небі зміниться освітленість геліотрекера, деякі елементи виявляться в тіні, що відстежить схему управління.

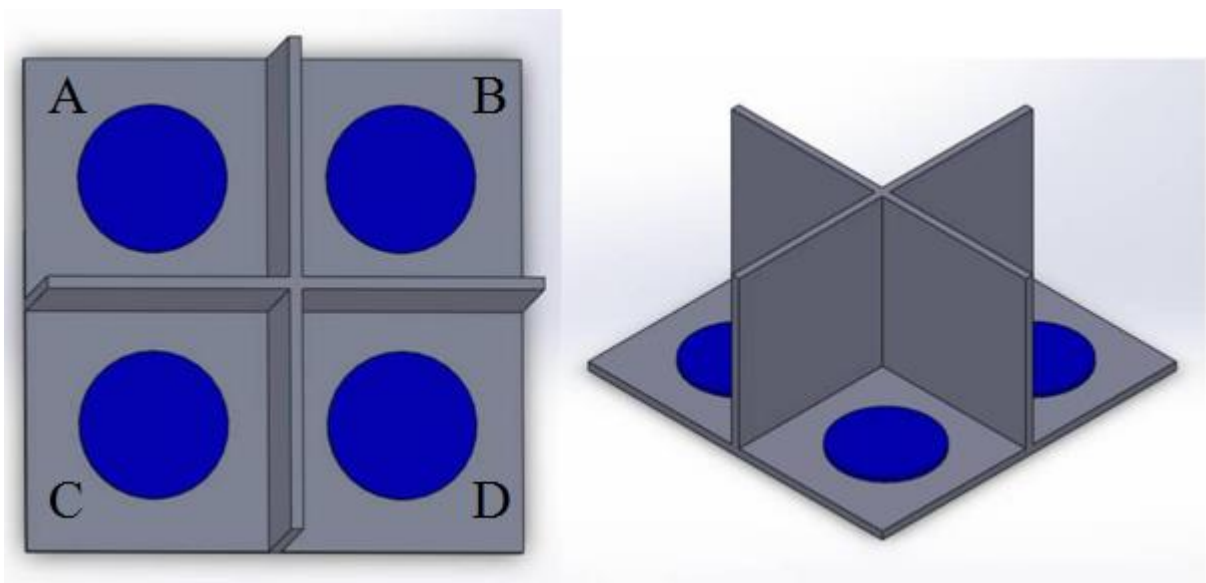


Рисунок 3.2 – Геліотрекер

Можливі варіанти освітлення геліотрекера відображені в таблиці 3.1, "1" означає, що елемент освітлений, "0" – елемент у тіні. Можлива кількість положень геліотрекера – 9, будь-які комбінації з A=«1» та C=«1», так само як B=«1» та D=«1» неможливі. Кожна комбінація сигналів, що надійшла на блок контролера, відповідає команда для поворотного пристрою (таблиця 3.1).

Одновісний геліотрекер є двоосною модифікацією і складається з двох елементів, розділених перегородкою. Такий датчик використовується для контролю положення яскравої плями протягом дня по осі азимуту. Можливі варіанти освітлення одновісного геліотрекера представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Можливі варіанти освітлення двовісного геліотрекера

Елемент А	1	0	1	0	0
Елемент В	0	1	1	0	0
Елемент С	0	0	0	1	0
Елемент D	0	0	0	0	1
Положення яскравої плями	вище і західніше	вище і східніше	вище	нижче і східніше	нижче і західніше
Команда поворотному пристрою по осі екліптики	вверх	вверх	вверх	вниз	вниз
Команда поворотному пристрою по осі азимута	на захід	на схід	стояти	на схід	на захід
Елемент А	1	1	0	0	1
Елемент В	1	0	1	0	1
Елемент С	0	0	1	1	1
Елемент D	0	1	0	1	1
Положення яскравої плями	вище	західніше	східніше	нижче	точно
Команда поворотному пристрою по осі екліптики	вверх	стояти	стояти	вниз	стояти
Команда поворотному пристрою по осі азимута	стояти	на захід	на схід	стоять	стоять

Таблиця 3.2 – Можливі варіанти освітлення одновісного геліотрекера

Елемент А	1	1	0	0
Елемент В	1	1	1	0
Положення яскравої плями	точно	західніше	східніше	ніч
Команда поворотному пристрою	стояти	на захід	на схід	на схід до кінця

Якщо обидва елементи одновісного геліотрекера або всі двоосні елементи не освітлені, то подається команда розвороту ФМ на схід в очікуванні сходу Сонця.

Принцип роботи геліотрекера найпоширеніший. На сьогоднішній день існує безліч варіантів виконання, що відрізняються чутливими елементами, формою перегородки або кутом нахилу чутливих елементів (рисунок 3.3).

На рисунках 3.3 а, б зображені геліотрекери з перегородкою перпендикулярної основи, що відрізняються між собою розташуванням чутливих елементів: на рисунку 3.3 а – елементи знаходяться на підставі, на 3.3 б – на сторонах перегородки. Датчик на рисунку 3.3, а орієнтований на яскраву пляму, коли обидва елементи освітлені, мають максимальні та однакові значення вихідних сигналів. Для датчика рисунку 3.3 б навпаки, коли обидва датчика мають мінімальні й однакові значення вихідних сигналів, система орієнтована яскраве пляма.

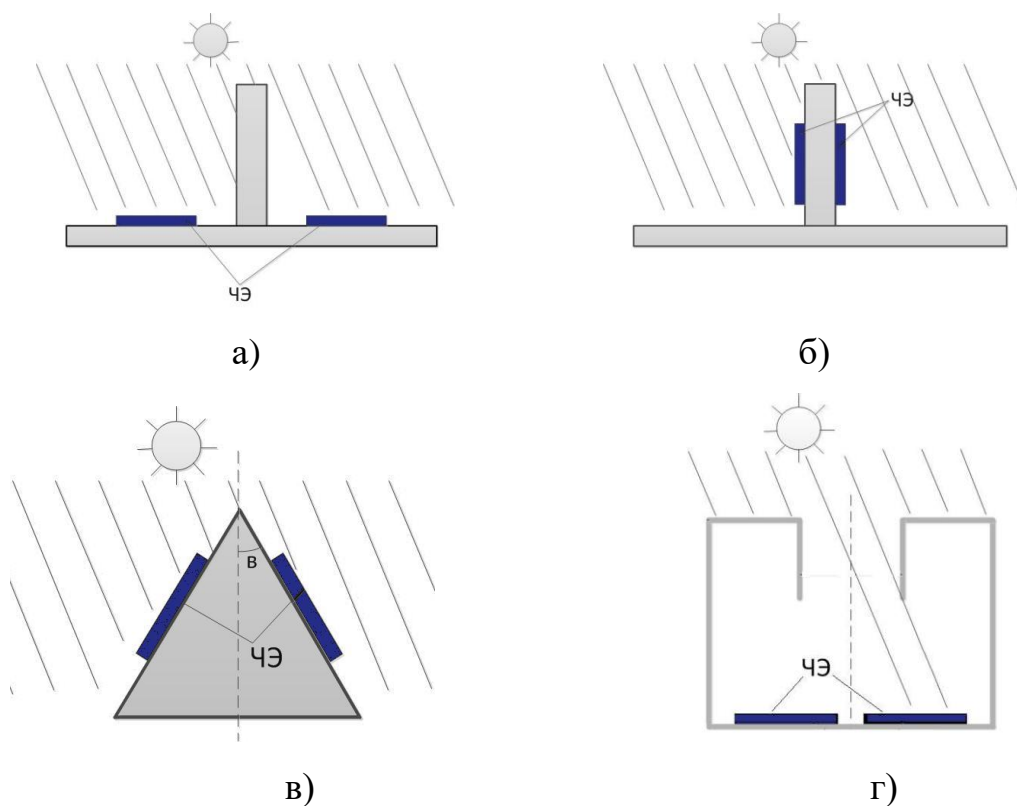


Рисунок 3.3 – Варіанти конструкції одновісного геліотрекера.

На рисунку 3.3 зображено геліотрекер з перегородкою у вигляді призми, на сторонах якої розташовані чутливі елементи. Коли датчик буде орієнтований на яскраву пляму, значення вихідних сигналів чутливих елементів будуть однаковими.

На рисунку 3.3 г зображено датчик, який відрізняється від попередніх варіантів, проте використовує принцип роботи геліотрекера. Він має форму куба із прямокутним отвором на верхній стороні. Чутливі елементи розташовані на дні куба таким чином, що при орієнтації на яскраву пляму вони обидва освітлені однаково. При зміні становища яскравої плями один із елементів опиняється в тіні, як видно на малюнку, а другий – освітлений.

Таким чином, систему необхідно повертати у бік неосвітленого датчика. Можливі варіанти освітлення одновісного геліотрекера, зображеного рисунку 3.3, г, представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Можливі варіанти освітлення одновісного геліотрекера, представленого на рисунку 3.3 г)

Елемент А	1	1	0	0
Елемент В	1	0	1	0
Положення яскравої плями	точно	східніше	західніше	ніч
Команда поворотному пристрою	стояти	на схід	на захід	на схід до кінця

На рисунку 3.4 зображено одновісну систему контролю з датчиком, заснованим на принципі роботи геліотрекера і є аналогом датчика, зображеного на малюнку 3.3 ст. Тільки в даному випадку елементи А та В рознесені на різні сторони поверхні ФМ. Як чутливі елементи в даному випадку використовуються ФЕП, розташовані під кутом 45° до поверхні ФМ.

При орієнтуванні ФМ на яскраву пляму значення сигналів елементів А та Б однакові [61].

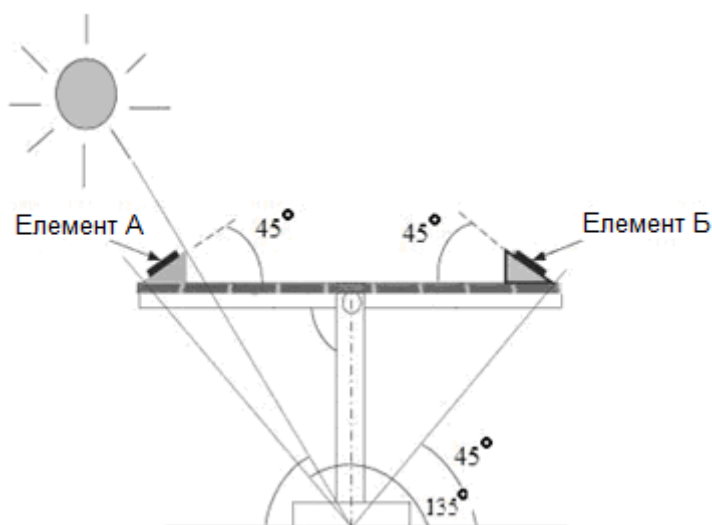


Рисунок 3.4 – Геліотрекер із рознесеними чутливими елементами

На рисунку 3.5 представлені деякі практичні реалізації геліотрекера [62-64].



Рисунок 3.5 – Варіанти виконання геліотрекера

Незважаючи на поширеність принципу роботи геліотрекера серед сучасних датчиків, вони мають ряд недоліків. При хмарній погоді під час затінення всіх елементів хмарою блок контролера передасть поворотному пристрою команду повороту "на схід до кінця". Таким чином, коли хмара припинить затінювати геліотрекер, всі елементи будуть відвернуті від Сонця, жоден елемент не буде освітлений, і ФМ день, що залишився, не вироблятиме енергію.

Датчики типу геліотрекера часто мають температурну нестабільність, що призводить до похибки орієнтування.

3.1.4 Датчик максимального освітлення

Варіантом конструкції одновісного датчика, представленого малюнку 3.6, є MLD-sensor (Maximum Light Detection) німецької фірми «DEGER energie» (рисунок 3.6).

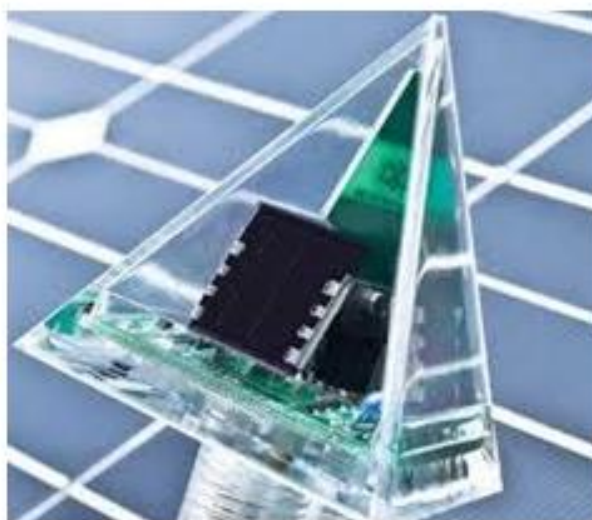


Рисунок 3.6 – MLD-sensor

Датчик складається із трьох елементів, розташованих на сторонах трикутної піраміди. В основі піраміди розташована плата блоку контролю. Блок контролю безперервно вимірює інтенсивність сонячного випромінювання та визначає положення яскравої плями, при необхідності подає команду поворотному пристрої змінити нахил ФМ [13].



Рисунок 3.7 – Встановлення MLD-sensor

Недоліками представленого датчика є проблема визначення необхідності орієнтування, система постійно в режимі пошуку яскравої плями, що може призвести до зайвих рухів ФМ. Також не вирішено проблему запуску системи вранці. Крім того, кут між елементами 60 не є максимально ефективним. Фірмою пропонується використовувати два таких датчики для двовісної системи контролю, що призводить до таких незручностей, як використання двох незалежних кріплень на різних сторонах ФМ (рисунок 3.8) та необґрунтоване використання двох блоків контролю.

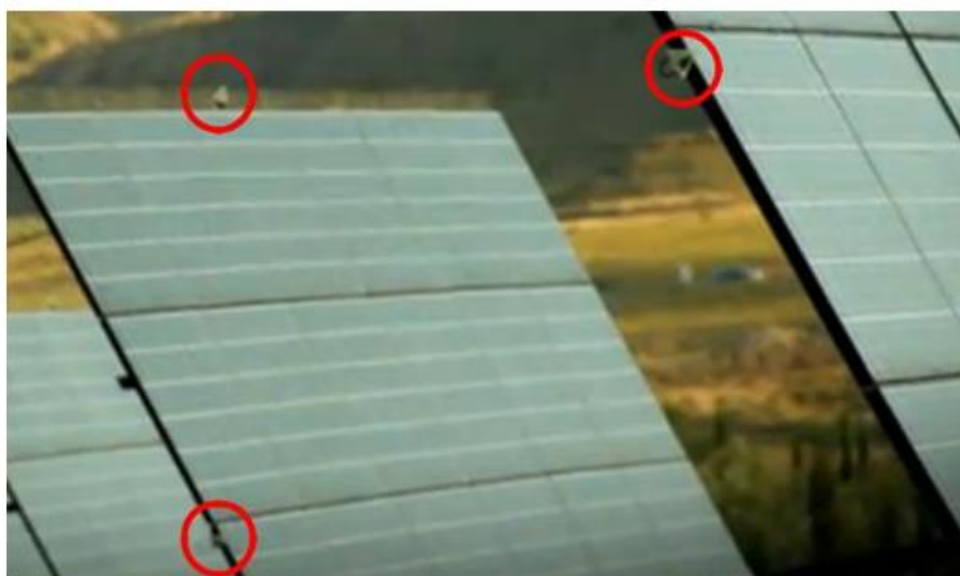


Рисунок 3.8 – Кріплення MLD-sensor для двовісної системи контролю

3.1.5 Датчик сканування небосхилу.

Скануючим небосхил називають датчик, який при включенні «сканує» небо за заданим алгоритмом з певним кроком і фіксує значення сонячної радіації в кожному положенні. Блок контролера виявляє точку з максимальним значенням та подає команду повороту ФМ на відповідний кут. Таким чином, проводиться орієнтація на найяскравішу пляму.

Існує кілька способів реалізації датчиків. Один з них є аналогом геліотрекера, описаного раніше (рисунок 3.9) [65].

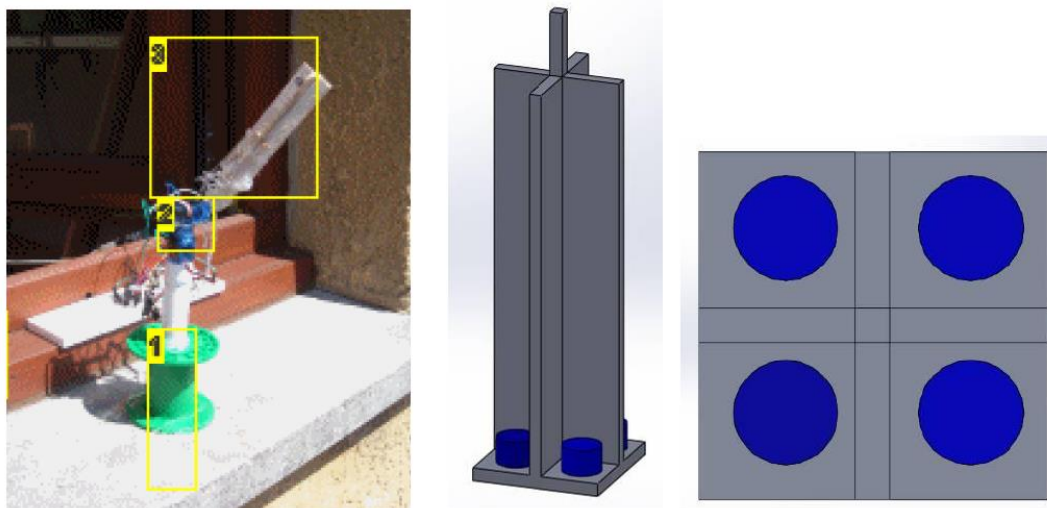


Рисунок 3.9 – Датчик, що сканує небосхил (варіант 1)

Датчик складається із чотирьох чутливих елементів, розділених між собою перегородкою. Розташовується він у безпосередній близькості до ФМ на окремій нерухомій платформі. При включенні датчик сканує небосвід, записуючи значення вихідних сигналів чутливих елементів у кожному положенні. Кут, при якому всі чотири датчики максимально освітлені, характеризує положення Сонця (або найяскравішої плями) на небі. Блок контролера подає команду повороту ФМ на кут. Далі система працює за принципом геліотрекера.

При низькій освітленості чутливих елементів датчика система перезапускається, тобто. знову сканує небо і знаходить найяскравішу пляму. У похмурі дні та вночі блок контролера після сканування не виявляє максимального значення та подає команду переходу системи в «сплячий режим» на час, що відповідає заданому алгоритму. Інший варіант скануючого датчика зображено рисунку 3.10.

Датчик складається з трьох чутливих елементів, рознесених та розташованих на поверхні ФМ. Елемент 1 розташований у непрозорому циліндрі на поверхні ФМ. Вісь циліндра розташована під прямим кутом до поверхні ФМ. Таким чином, елемент 1 освітлений тільки за орієнтування ФМ на Сонце. Коли Сонце змінить положення, елемент 1 в тіні стінок циліндра і вихідний сигнал елемента стане рівним нулю.

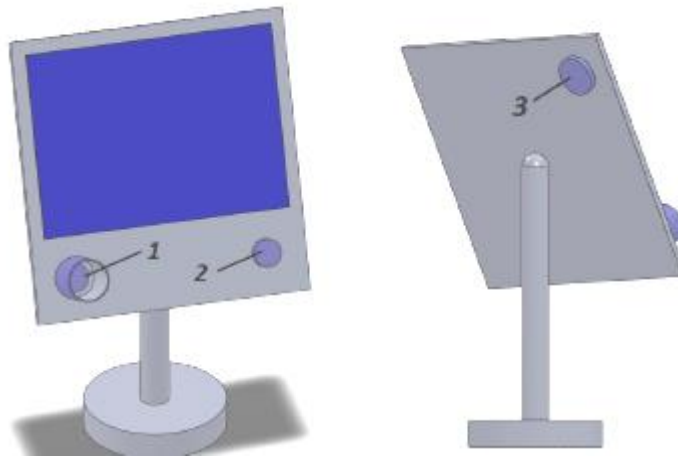


Рисунок 3.10 – Датчик, що сканує небосхил (варіант 2)

Елемент 2 розташований поверхні ФМ і служить визначення необхідності орієнтування. Якщо сигнал елемента 2 вище порогового значення спрацьовування і сигнал елемента 1 дорівнює нулю, то блок контролера запускає «режим сканування неба» у пошуках сонця. Коли елемент 1 буде висвітлено, тобто. площина ФМ стане перпендикулярною до сонячних променів, блок контролера подає команду зупинки поворотному механізму.

У похмурі дні та вночі сигнал елемента 2 нижче порогового значення і блок контролера робить висновок про відсутність необхідності орієнтування і переходить у «сплячий режим» на час, визначений алгоритмом управління.

Елемент 3 розташований на звороті поверхні ФМ. Протягом усього дня він відвернуто від сонця, тому його сигнал дорівнює нулю. Він потрібний для запуску системи вранці. Увечері ФМ повернутий на захід і в такому становищі переходить у «сплячий режим». Вранці елемент 1 і 2 виявляються відвернутими від Сонця, в той час як елемент 3 направлений до нього. Наявність сигналу елементі 3 є ознакою сходу, і блок контролера подає команду повороту системи на схід.

Далі блок контролера визначає сигнали з елементів 2 і 3 і за необхідності орієнтування запускає "режим сканування".

Одним з головних недоліків скануючих датчиків щодо представлених вище є споживання поворотного пристрою протягом дня для визначення положення яскравої плями на небі. Це особливо невиправдано в похмуру погоду, коли сканувати небосхил доводиться кілька разів на день. Для варіанту датчика, зображеного на рисунку 3.9, потрібен окремий нерухомий майданчик поблизу ФМ.

3.1.6 Щілинні сонячні датчики

Щілинні сонячні датчики набули широкого поширення в космічній галузі для орієнтування на Сонці ФМ та концентраторів сонячної енергії для космічних апаратів [66].

Один з варіантів виконання сонячного щілинного датчика представлений на малюнку 3.11. Чутливими елементами є кремнієві фотодіоди, розташовані на півкруглій основі, кожен у своїй щілині.

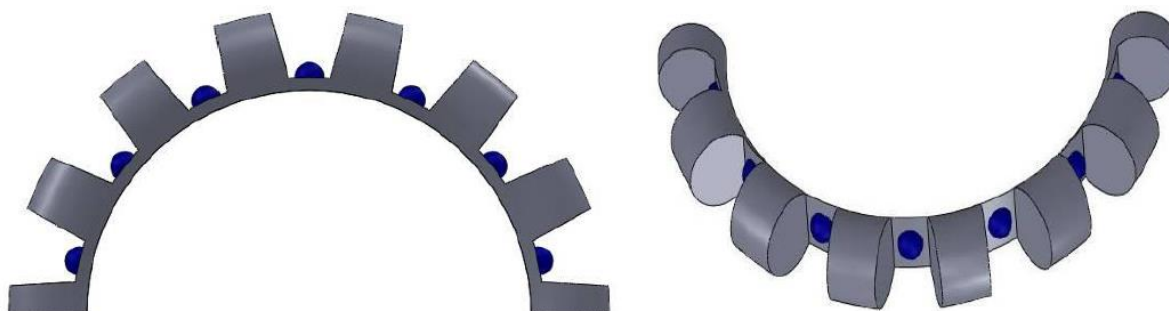


Рисунок 3.11 – Щілинний сонячний датчик

Принцип роботи датчика заснований на порівнянні сигналів, що надходять з фотодіодів, та виявлення максимального сигналу. Датчик розташований так, щоб за будь-якого положення Сонця один з фотодіодів був освітлений, а інші знаходилися в тіні перегородок. Блок контролю визначає положення фотодіода з максимальним сигналом та подає команду повороту ФМ на кут, що відповідає положенню цього фотодіода. Чим більша кількість фотодіодів, тим більша чутливість та точність орієнтації. Щілинні датчики можуть бути одновісними та двовісними.

Основними недоліками щілинних датчиків є їх великі розміри, дорожня та складність конструкції. З іншого боку, принцип роботи даних датчиків виключає можливість розміщення лежить на поверхні ФМ, тобто. вимагає додаткової нерухокої поверхні поблизу ФМ.

3.1.7 Екваторіальний датчик

Ознаки геліотрекера та щілинних датчиків поєднує в собі екваторіальний датчик [67].

Датчик і двох однакових панелей, з'єднаних під прямим кутом. На кожній панелі розміщені чутливі елементи, що є кремнієвими фотоелектричними перетворювачами (рисунок 3.12). Чутливі елементи кожної панелі послідовно з'єднані.

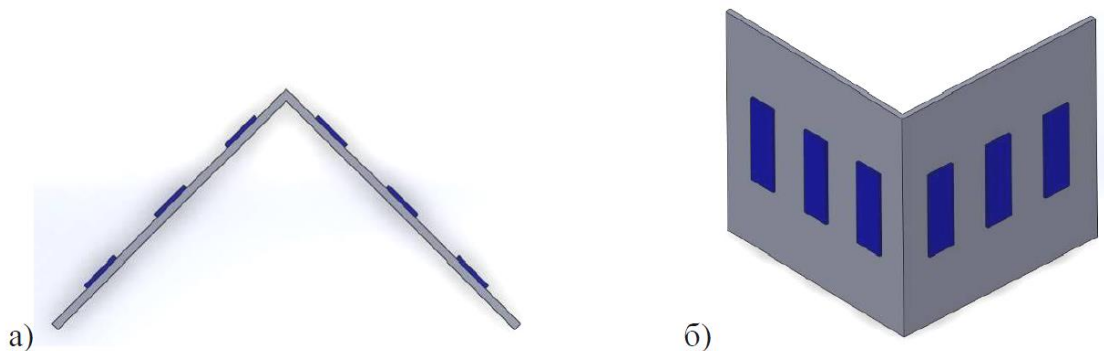


Рисунок 3.12 – Екваторіальний датчик

Датчик встановлюється таким чином, щоб опівдні стик панелей був направлений на Сонце. Завдяки такому положенню, від світанку і до заходу сонця одна з частин пристрою буде освітлена. Отже, на виході датчика завжди вироблятиметься електричний сигнал незалежно від положення Сонця на небосхилі.

При достатніх розмірах елементів датчик може бути джерелом живлення блоку контролера. Отже, вирішується питання необхідності орієнтації ФМ. Якщо рівня освітлення замало роботи блоку контролю (наприклад, вночі, за наявності туману чи хмарності), отже рівень сигналу менше порога спрацьовування, система не включається, ФМ стоїть нерухомо.

Коли з'явиться Сонце, один із елементів буде освітлений, і виробленої ним напруги буде достатньо для включення блоку контролера.

Блок контролера порівнює сигнали двох панелей та подає команду для повороту ФМ у бік більшого. Для визначення кута повороту необхідно використовувати два додаткові фотодатчики (наприклад, фоторезистори), розташовані безпосередньо на поверхні ФМ на протилежних сторонах. Як тільки освітленість додаткових фотодатчиків зрівняється, блок контролера подасть команду зупинки роботи поворотного пристрою. Таким чином, площина ФМ буде спрямована на Сонце (або яскраву пляму). Як тільки Сонце зміститься, освітленість додаткових фотодатчиків стане різною, і блок контролера запустить поворотний механізм, поки знову не відновиться потрібний напрямок ФМ на Сонці.

До недоліків даного датчика можна віднести зайву кількість чутливих елементів (мінімум 6 на панелях датчика та 2 на площині ФМ), низьку чутливість датчика. Аналогічно щілинним датчикам екваторіальний пристрій вимагає стаціонарної горизонтальної поверхні для встановлення. Як і системах без використання датчика, на вихідні сигнали чутливих елементів впливатиме температура їх нагрівання, що може збільшити похибку орієнтування ФМ. Авторами також не сказано як розташувати два чутливі елементи на поверхні або сторонах ФМ, а від цього залежить чутливість і точність орієнтування.

3.2 Датчики, що застосовуються у перетворенні сонячної енергії на теплову

3.2.1 Термотрекер

За принципом роботи геліотрекера, описаного раніше, можна створити датчик контролю на основі перетворювачів температур. Конструкція датчика аналогічна конструкції геліотрекера, лише чутливими елементами є термоперетворювачі. При орієнтації на яскраву пляму освітлені всі чотири

елементи, отже, температура їх нагрівання однакова. При переміщенні Сонця (або яскравої плями) деякі чутливі елементи виявляться в тіні, і їхня температура зменшиться, що відстежить блок контролю і подасть команду повороту ФМ у бік елемента з максимальною температурою. Аналогічно геліотрекеру, можлива реалізація одно- та двовісних термотрекерів.

Недоліками описаного термотрекера є температурна нестабільність, що виникає через вплив вітру. Крім того, не вирішено проблеми необхідності орієнтування та запуску системи вранці.

3.2.2 Двигун Стірлінга

Двигун Стірлінга - тепловий двигун, що використовує для переміщення поршнів газ (робоче тіло), що розширюється, яким може бути гелій або водень [68]. Якщо на поршні встановити ФМ, то двигун Стірлінга буде і датчиком, і поворотним механізмом системи контролю. Робоче тіло знаходиться в замкнутому просторі – у двох циліндрах із поршнями, на яких розташований ФМ. Освітлена область циліндра нагрівається, що призводить до розширення газу та переміщення поршня. Неосвітлена область має нижчу температуру і низьке положення поршня. Таким чином, змінюється кут нахилу ФМ, щоб поверхня його була орієнтована на яскраву пляму. При зміні положення яскравої плями, змінюється нагрівання циліндрів, отже, положення поршнів, і як результат кут нахилу ФМ. Таким чином відбувається контроль максимуму освітленості ФМ.

Одним з важливих недоліків даного способу контролю є складність та дорожня конструкція. До того ж, подібна конструкція не може забезпечити високу точність орієнтування протягом усього року. Також можуть виникнути проблеми з робочим тілом у циліндрах. Гелій – летючий газ, через що його обсяг згодом може зменшитися, що призведе до великої похибки орієнтування. Водень є вибухонебезпечним газом, використання його потребує великої обережності та досвіду. Для встановлення та

обслуговування систем типу двигуна Стірлінга будуть потрібні досвідчені робітники, що призведе до подорожчання системи.

3.2.3 Термомеханічна самонавідна система контролю

У термомеханічній системі контролю, що самонаводиться, чутливими елементами і поворотним пристроєм є термочутливі елементи (ТЧЕ) з великим температурним коефіцієнтом лінійного розширення. Кожен ТЧЕ є смугою твердого матеріалу, що має плоску зачорнену поверхню [69].

Принцип роботи системи ґрунтується на зміні довжини ТЧЕ залежно від їхньої температури. При однаковій освітленості всіх ТЧЕ температури їх, отже, і довжини однакові, у разі ФМ орієнтований горизонтально. Якщо освітленість одного ТЧЕ відрізняється від рівня освітленості іншого, виникає необхідність орієнтування ФМ. Найбільш освітлений ТЧЕ під дію більшої температури подовжується, що призводить до нахилу площини ФМ у бік положення Сонця (або яскравої плями). При переміщенні Сонця протягом дня змінюється освітленість ТЧЕ, їх температура, як наслідок їх довжина та кут нахилу ФМ. Описана система контролю може бути виконана в одновісному та двовісному варіанті.

Основним недоліком термомеханічної системи самонаведення є теплова інерційність нагріву ТЧЕ при сході Сонця і в умовах змінної хмарності. Крім того, на точність орієнтації ФМ впливатиме температура навколишнього повітря, швидкість і напрям вітру.

3.3 Аналіз способів, методів та датчиків контролю

В результаті аналізу способів контролю виявлено три способи: ручний, пасивний та активний. Аналіз показав, що в системах з ручним наведенням на Сонці точність орієнтування, а значить і вироблена потужність безпосередньо залежить від роботи оператора: вибору оптимального кута

нахилу ФМ, кількості досконалих поворотів. Однак цей спосіб дозволяє оператору швидко відстежити наявність поломки у разі виникнення. Ручний спосіб найчастіше використовується як резервний для великої кількості ФМ, керованих одним приводом. Також до цього способу вдаються при використанні активного способу контролю у разі відмови з якої-небудь причини датчика системи контролю. Деякі фірми використовують ручний спосіб спільно з активним для орієнтування ФМ вранці на сонце, що сходить, якщо в датчику, що використовується, не вирішена проблема запуску вранці.

На пасивному методі орієнтування засновані системи, використовують заданий алгоритм повороту ФМ протягом дня. Пасивні системи не забезпечують орієнтування площини ФМ на максимальний потік сонячного випромінювання, що призводить до втрати потужності, що виробляється в порівнянні з активними системами. У похмурі дні робота по заданому алгоритму призводить до необґрунтованої роботи двигуна, а отже, і його енергоспоживання. Істотним недоліком пасивних систем є необхідність коригування алгоритму кожного конкретного розташування ФМ з урахуванням даних метеослужб. Через це дані системи є універсальними для будь-якого ФМ.

Активний спосіб контролю найпоширеніший у існуючих системах. На відміну від ручного та пасивного способу активні системи дозволяють орієнтувати поверхню ФМ на максимальний потік сонячного випромінювання, який у ряді випадків не збігається з положенням Сонця на небі. Таке орієнтування дозволяє найефективніше використовувати сонячну енергію. Важливою частиною активної системи є датчик, розробкою нових конструкцій якого досі займається багато вчених, що говорить про актуальність цих досліджень.

Реалізація датчиків активних систем можлива з урахуванням різних методів. Однак проведений аналіз показав, що для орієнтації ФМ найбільш підходящим є оптичний метод. Це пов'язано з тим, що робота ФМ заснована

на фотоефект, а значить, датчик, який використовує той же метод, буде найбільш ефективним для цієї мети.

Аналіз показав, що датчики на основі теплового методу відрізняються більшою інерційністю, меншою точністю визначення положення яскравої плями, а системи типу двигуна Стірлінга та термомеханічної системи самонаведення відрізняються складністю конструкції та обслуговування.

В результаті аналізу датчиків, робота яких ґрунтується на оптичному методі, виявлено такі недоліки: складність конструкції; температурна залежність; проблема визначення потреби орієнтації; проблема запуску системи вранці.

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ

4.1 Розрахунок потужності, що виробляється фотоелектричним модулем

У цій роботі розглянуто режим роботи сонячної енергії для перетворення сонячної енергії в електричну енергію. Розглянемо математичну модель роботи сонячної енергоустановки для перетворення сонячної енергії на електричну.

Проведемо розрахунок вироблюваної потужності енергоустановки шляхом розрахунку потужності одного ФМ. Для цього спочатку визначимо кількість сонячної радіації, що надходить протягом дня.

Потік прямої сонячної радіації S_{np} на поверхню, розташовану під кутом β до цього потоку дорівнює [70-74]:

$$S_{np} = S_{r_{max}} \cdot K_{am} \cdot \cos \beta, \quad (4.1)$$

де $S_{r_{max}}$ – кількість радіації, що надходить від Сонця на Землю;

K_{am} – коефіцієнт поправки на повітряну масу, яку необхідно пройти променю;

β – наведений кут падіння сонячних променів на поверхню інсоляції.

Величина радіації є сонячною константою, що дорівнює 1325 Вт/м^2 . При розрахунках слід враховувати, що 30-35 % цієї енергії відбивається у космос, тому візьмемо $S_{r_{max}} = 925 \text{ Вт/м}^2$.

$$K_{am} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin h_c}; \quad (4.2)$$

$$\cos \beta = \sin h_c \cdot \cos \alpha + \cos h_c \cdot \sin \alpha, \quad (4.3)$$

де h_c – кут, що визначає висоту Сонця над горизонтом у час; α – кут нахилу площини ФМ до горизонту.

Вісь Землі відхиляється від перпендикуляра до площини екліптики на кут $23^\circ 27'$, тому половину року кожне географічне розташування нахилено у бік Сонця, іншу половину – від Сонця (рисунок 4.1).

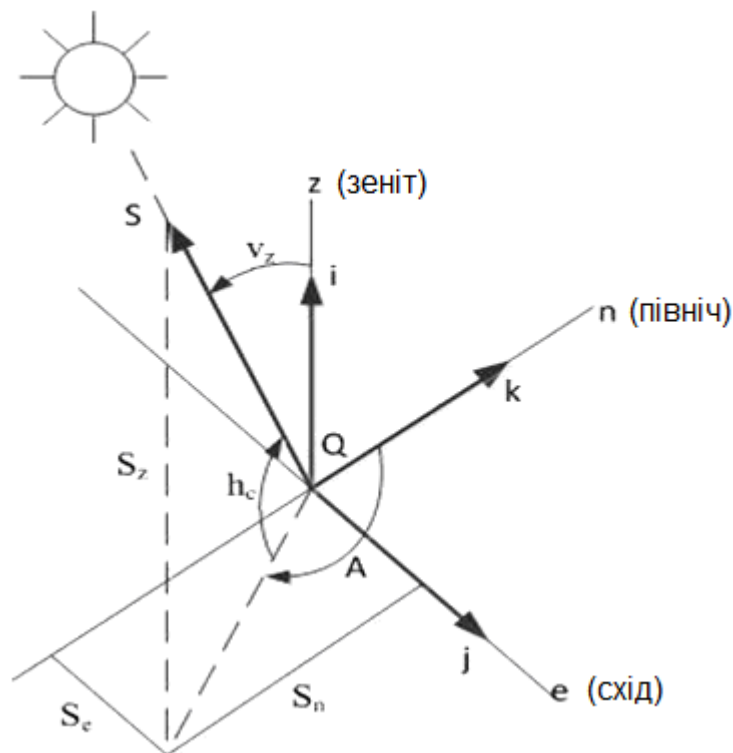


Рисунок 4.1 – Сонячний кут для спостерігача

Опівдні весняного рівнодення висота сонцестояння дорівнює $\varphi = 90^\circ - \Theta$, де θ – географічна широта. Опівдні літнього сонцестояння висота відповідає найбільшому значенню $h_{max} = 90^\circ - \Theta + 23^\circ 27'$ і тривалість світлового дня максимальна. Коли Сонце знаходиться в точці осіннього рівнодення, тривалості дня і ночі рівні, а висота сонцестояння опівдні дорівнює $h = 90^\circ - \Theta$, як і в день весняного рівнодення. Опівдні зимового сонцестояння висота сонцестояння відповідає найменшому значенню

$h_{min} = 90^\circ - \Theta - 23^\circ 27'$ і тривалість світлового дня мінімальна. В інші дні року висота сонцестояння опівдні змінюється від h_{min} до h_{max} , де h_{min} і h_{max} – граничні значення кута нахилу ФМ протягом року [73].

Визначимо вираз для висоти сонцестояння h_c . Сонячний зенітний кут – кут між напрямком вектора сонячних променів S та зенітною віссю щодо спостерігача (рисунок 4.1). Зенітний кут ν_z характеризує висоту сонцестояння h_c [70-74].

$$\nu_z = 90^\circ - h_c.$$

У векторних позначеннях S можна записати у вигляді:

$$S = S_z \cdot i + S_e \cdot j + S_n \cdot k, \quad (4.5)$$

де i, j і k – одиничні вектори вздовж осей Зеніт (z), Схід (e) та Північ (n).

З точки зору сонячного азимуту та висоти, S можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} S_z = \sin(h_c); \\ S_e = \cos(h_c) \cdot \sin(A); \\ S_n = \cos(h_c) \cdot \cos(A). \end{cases} \quad (4.6)$$

У геоцентричній системі координат, показаній на рисунку 4.2, вісь m перетинає центр Землі та точку перетину між місцевим меридіаном та екваторіальною площиною. Вісь e перпендикулярна до осі m і лежить в екваторіальній площині. Вісь p – нормаль екваторіальної площини, що перетинає Північний полюс. Новий сонячний вектор S' може бути описаний за допомогою кута сонячного відмінювання та годинного кута:

$$\begin{cases} S' = S'_m \cdot i + S'_e \cdot j + S'_n \cdot k; \\ S'_m = \cos(\delta) \cdot \cos(\tau); \\ S'_e = \cos(\delta) \cdot \sin(\tau); \\ S'_n = \sin(\delta). \end{cases} \quad (4.7)$$

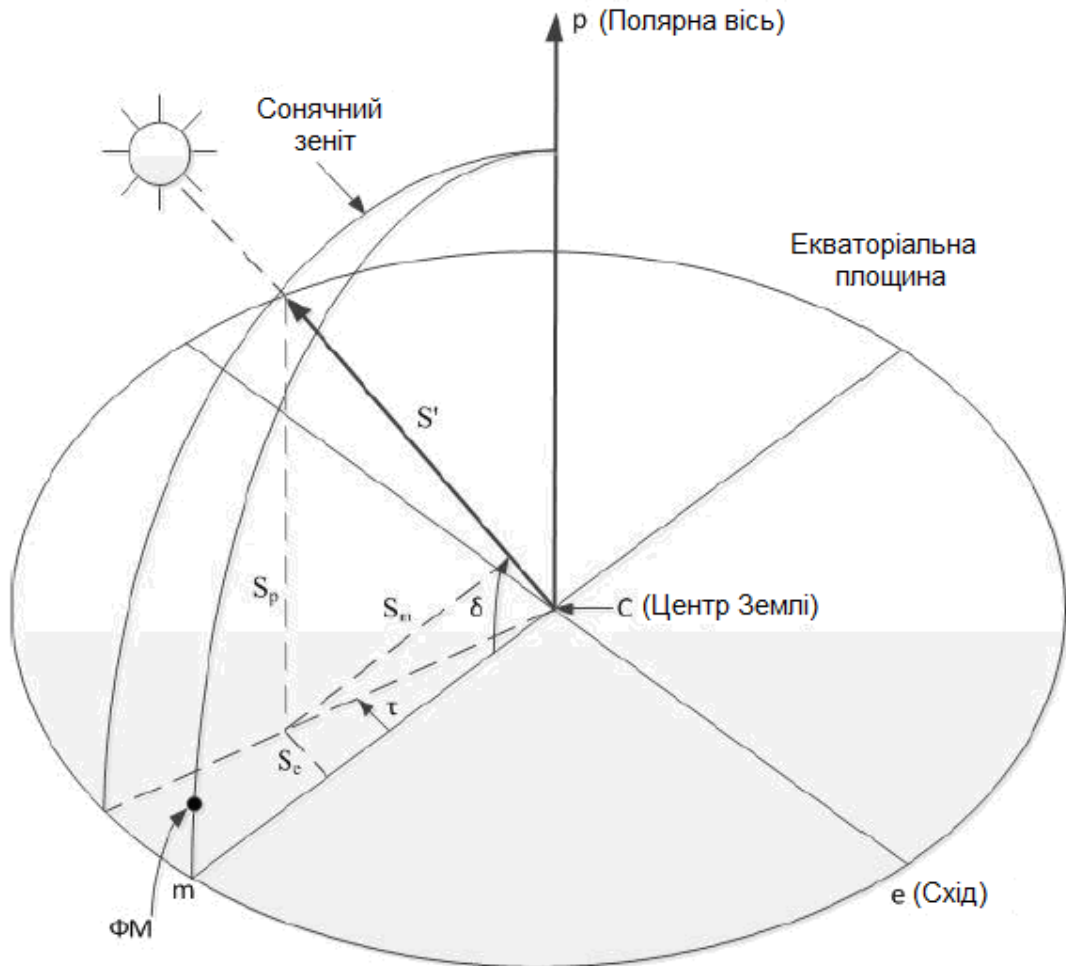


Рисунок 4.2 – Геометрія визначення сонячного кута

Топоцентричні і геоцентричні координати зв'язані між собою обертанням навколо осі e через кут широти (θ).

$$\begin{vmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} S'_m \\ S'_e \\ S'_n \end{vmatrix}. \quad (4.8)$$

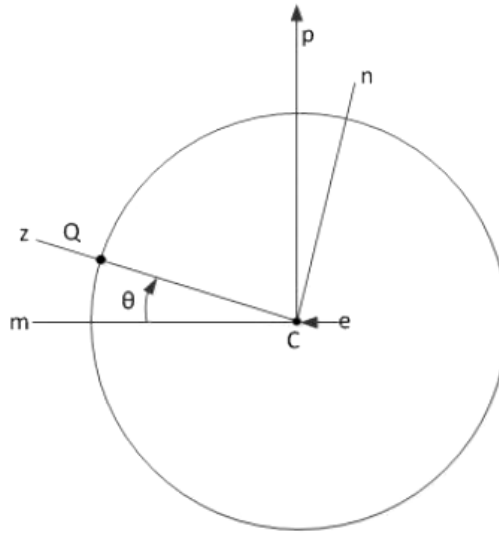


Рисунок 4.3 – Схема перетворення геоцентричних координат в топоцентричні.

Розв'язавши рівняння 4.8 і підставивши результат в 4.5 і 4.7, отримаємо:

$$\begin{cases} \sin(h_c) = \sin(\delta) \cdot \sin(\theta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\theta); \\ \cos(h_c) = \sin(A) = -\cos(\delta) \cdot \sin(\tau); \\ \cos(h_c) \cdot \cos(A) = \sin(\delta) \cdot \cos(\theta) - \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) \cdot \sin(\theta). \end{cases}$$

(4.9)

З системи рівнянь 4.9 виразимо h_c :

$$h_c = \arcsin(\sin(\delta) \cdot \sin(\theta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) \cdot \cos(\theta)). \quad (4.10)$$

Таким чином, висота сонцестояння h_c залежить від величини схилу Сонця, годинного кута τ і широти місцевості θ . Широта місцевості відповідає географічному розташування ФМ. Визначимо дві величини, що залишилися.

Побудуємо графік зміни кута відмінювання Сонця опівдні протягом року (рисунок 4.3). Для цього скористаємося формулою Буржаса [51]:

$$\delta = 0,372 + \sum_{k=1}^3 [A_k \cdot \sin(kD) + B_k \cdot \cos(kD)], \quad (4.11)$$

де коефіцієнти k , A_k та B_k відповідають значенням, представленим у таблиці 4.1, коефіцієнт D можна визначити за формулою:

$$D = \frac{360}{365,25} (N - 79,346), \quad (4.12)$$

де N – порядковий номер дня у році.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнтів k , A_k та B_k .

k	A	B
1	23,2567	-0,758
2	0,1149	0,3656
3	-0,1712	0,0201

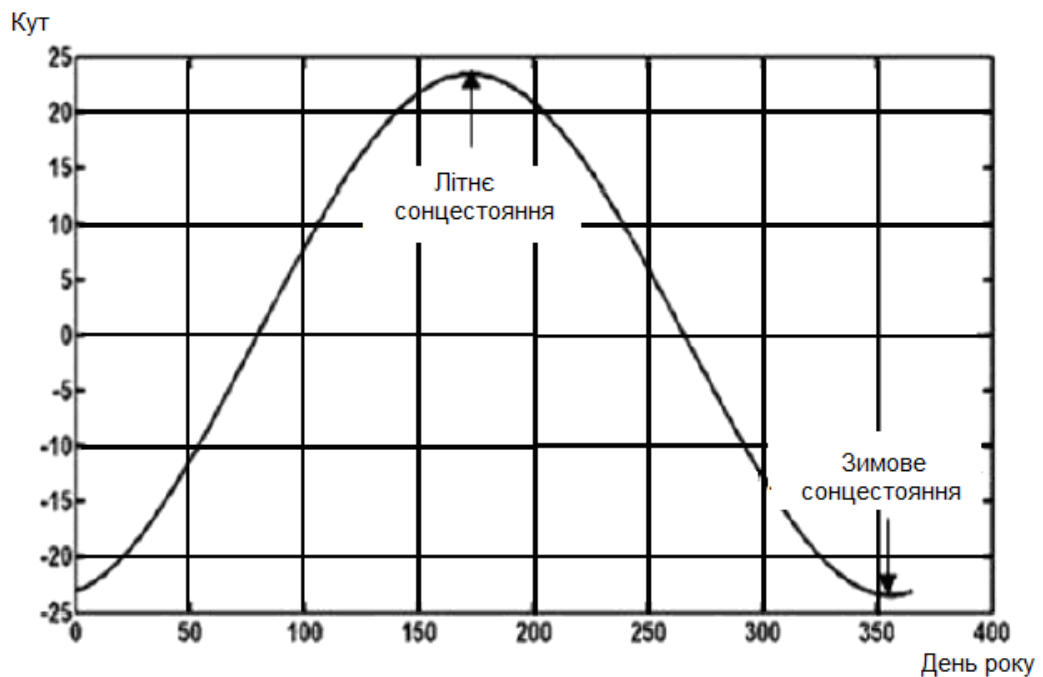


Рисунок 4.4 – Зміна кута схилу Сонця протягом року.

Як очевидно з графіка вище, кут схилю Сонця змінюється протягом року від $-23,5^\circ$ до $23,5^\circ$. Кут схилю Сонця можна визначити, використовуючи простішу формулу:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin\left(\frac{284 + N}{365}\right), \quad (4.13)$$

де N – порядковий номер дня у році.

Місцевий годинник знаходиться в лінійній залежності від місцевого сонячного часу [75]:

$$\tau = 15 \cdot (T_s - 12), \quad (4.14)$$

де T_s – місцевий час, год.

Різниця між середнім та справжнім сонячним часом називається рівнянням часу [76]. Різниця виникає з двох причин:

- через еліптичну орбіту Землі та нерівномірний рух по ній, з максимальною швидкістю в перигелії та з мінімальною в афелії;
- Через нахилу екліптики до екватора поблизу рівнодення проекція швидкості Сонця на екватор менше, ніж у період сонцестоянь, коли воно рухається паралельно екватору [77].

Обидва відхилення мають вигляд синусоїд (рисунок 4.5). Сума цих двох графіків є графіком рівняння часу [78].

Як видно з рисунку 4.5, справжній сонячний час може зміщуватись на 17 хвилин від середнього сонячного часу.

Вираз визначення рівняння часу ЕОТ матиме вид:

$$EOT = 60 \cdot \sum_{k=1}^6 \left(A_k \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot k \cdot n}{365,25}\right) + B_k \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot k \cdot n}{365,25}\right) \right), \quad (4.15)$$

де n – порядковий номер у циклі високосного року (від 1 до 1461), k , A та B – константи, значення яких наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення коефіцієнтів k , A_k і B_k

k	A	B
1	$2,0870 \cdot 10^{-4}$	0
2	$9,2869 \cdot 10^{-3}$	$-1,2229 \cdot 10^{-1}$
3	$-5,2258 \cdot 10^{-2}$	$-1,5698 \cdot 10^{-1}$
4	$-1,3077 \cdot 10^{-3}$	$-5,1602 \cdot 10^{-3}$
5	$-2,1867 \cdot 10^{-3}$	$-2,9823 \cdot 10^{-3}$
6	$-1,5100 \cdot 10^{-4}$	$-2,363 \cdot 10^{-4}$

Відхилення, хв

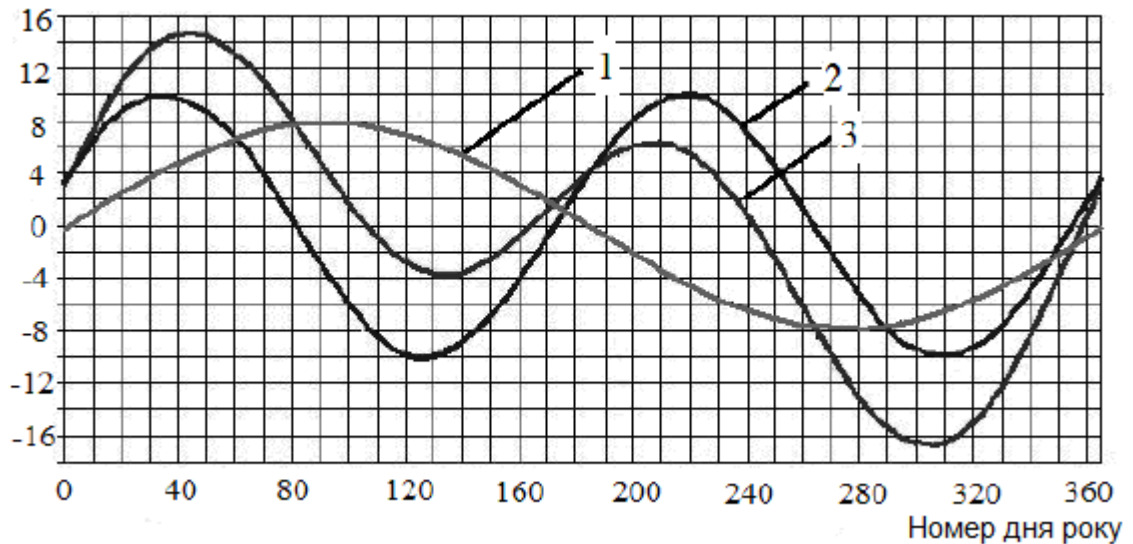


Рисунок 4.5 – Графіки поправок часу та рівняння часу: 1 – поправка, спричинена еліптичністю земної орбіти, 2 – поправка, спричинена нахилом екліптики, 3 – графік рівняння часу

Залежність справжнього значення сонячного часу та місцевого часу має вигляд:

$$T_s = T_L - \frac{EOT}{60} - P - LC, \quad (4.16)$$

де T_L – місцевий час, P – поправка на перехід на літній час ($P=1$ після переходу на літній час та $P=0$ після переходу на зимовий час).

Для України $P=1$.

LC можна визначити за формулою [51]:

$$LC = \frac{M.\delta. - Д.ст.м.}{15}, \quad (4.17)$$

де. - Місцева довгота, Д.ст.м. - Довгота стандартного меридіана.

Таким чином, визначені вирази для всіх величин, що впливають на потік прямої сонячної радіації, що приходить на поверхню, розташовану під деяким кутом до цього потоку.

Визначимо формули для потоку прямої сонячної радіації приходить на поверхню ФМ із застосуванням одно- та двовісної систем контролю.

При використанні двовісної системи контролю поверхня ФМ спрямована на Сонце, отже, кут між нормаллю поверхні і сонячними променями дорівнює 0, тоді:

$$S_r = S_{r\max} \cdot K_{am}. \quad (4.18)$$

Вираз прихідної потужності сонячного випромінювання для ФМ з одновісною системою контролю матиме вигляд:

$$S_r = S_{r\max} \cdot K_{am} \cdot \cos(\theta - h_c). \quad (4.19)$$

В даному випадку враховано кут нахилу поверхні до горизонту по другій осі (зазвичай кут дорівнює широті розташування ФМ).

Розрахувати потужність сонячного випромінювання на нерухому поверхню, встановлену під кутом до горизонту, можна за формулою:

$$S_r = S_{r\max} \cdot K_{am} \cdot \cos(\theta - h_c) \cdot \cos(90 - \tau). \quad (4.20)$$

Формули 4.18 – 4.20 відображають залежність прихідної потужності сонячного випромінювання на поверхню ФМ із застосуванням двовісної та одновісної системи контролю, а також на поверхню стаціонарно встановленого ФМ під кутом до горизонту.

Для оцінки ефективності систем контролю необхідно порівняти потужність ФМ, вироблену із застосуванням систем контролю, потужністю стаціонарно встановленого ФМ. Для цього необхідно визначити залежність вихідної потужності ФМ від потужності сонячного випромінювання, що надходить на його поверхню.

Найбільш проста модель розрахунку потужності ФМ - це спосіб, при якому виробляється потужність вважається шляхом множення ККД ФМ на сонячне випромінювання, що прийшло на поверхню ФМ [79-80].

$$P_{\Phi M} = S_{r_{np}} \cdot \text{ККД} \cdot S_{\Phi M}, \quad (4.21)$$

де $P_{\Phi M}$ – вироблена потужність ФМ; ККД – коефіцієнт корисної дії ФМ; $S_{\Phi M}$ – площа ФМ.

Сукупність формул 4.1 – 4.21 складає математичну модель роботи ФМ протягом дня. Описана модель може бути використана при моделюванні роботи СЕС з метою попередньої оцінки потужності, що виробляється, і розрахунку необхідної кількості ФМ.

4.2 Застосування математичної моделі з метою оцінки ефективності систем контролю орієнтації ФМ

На основі математичної моделі роботи ФМ, обчислено потужність, вироблену ФМ у кожному місяці року. Розрахунки проведені для ФМ встановлених горизонтально, під кутом до горизонту, що відповідає широті місцевості, із застосуванням одно- та двовісної систем контролю.

Як очевидно з формул (4.18 – 4.21), впливовими величинами на потужність ФМ є місцевий час, номер дня, широта місцевості, ККД ФМ і просторова орієнтація площині ФМ стосовно горизонту.

Для визначення виробленої потужності ФМ протягом місяця розрахунки проведено протягом дня з інтервалом часу 5 хвилин. З метою отримання середнього значення протягом місяця для розрахунків використовувалися номери днів 15 числа кожного місяця (для січня номер дня – 15, лютого – 30 тощо.).

Розрахунки проведені на прикладі ФМ, встановленого в Тернополі, географічні координати якого відповідають 49°34' пн. ш. 25°36' сх. д. [76]. Найбільш ефективним кутом нахилу площини ФМ по осі екліптики буде кут, що відповідає географічній широті розташування, тобто, для Тернополя – 48°.

95% всіх ФМ у світі виготовлено з кремнію [81]. На сьогоднішній день ККД кремнієвого ФМ варіюється від 11% до 18%. Для розрахунків будемо використовувати найпоширеніші кремнієві ФМ з ККД 15% [80].

Використовуючи зазначені вище значення величин, розраховані середні значення потужності ФМ протягом року з використанням систем контролю та без них, та побудовано графіки залежності середньомісячної потужності ФМ на прикладі Тернополя (рисунок 4.6).

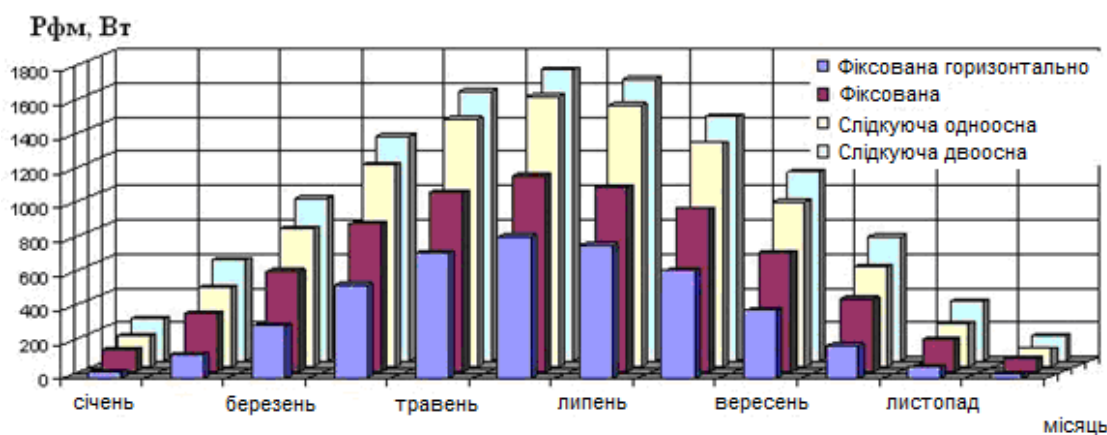


Рисунок 4.6 – Значення середньомісячної потужності ФМ протягом року з використанням систем контролю та без них

Отримані дані дозволяють зробити висновок ефективності використання систем контролю. На рисунку 4.7 представлена залежність виграшу у відсотках виробленої потужності ФМ із застосуванням одно- та двовісної систем щодо виробленої потужності ФМ, встановленого під кутом 49° , який є найбільш ефективним для Тернополя.

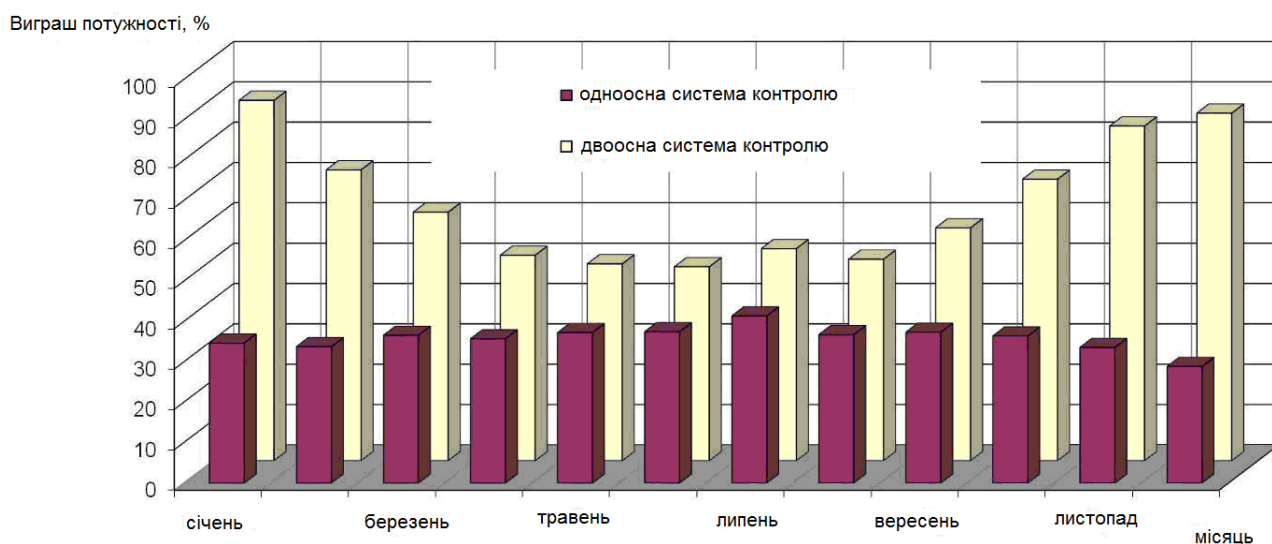


Рисунок 4.7 – Залежність виграшу потужності ФМ із застосуванням одно- та двовісної систем встановленого під кутом 49° .

З рисунку вище видно, що застосування систем контролю дають відчутний виграш виробленої потужності ФМ. Одновісна система у різні місяці приносить додатково від 28 до 41% потужності ФМ, а двовісна – від 48 до 89%.

Згідно з розрахунками, застосування одновісної системи принесуть додатково 37% на рік, а двовісна система контролю збільшить вироблену потужність ФМ на 56%.

5 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ДАТЧИКА

5.1 Розробка та макет фотоелектричного датчика

На основі проведеного аналізу датчиків систем контролю розроблено фотоелектричний датчик (ФЕД), що дозволяє виключити вплив фонового випромінювання, вирішити проблему запуску системи вранці, що відрізняється низькою ціною, простотою конструкції і використання. Розроблений датчик дозволяє визначати положення яскравої плями протягом дня однієї осі, т.к. одновісні системи визнані рентабельнішими за двовісні, що було доведено вище.

Геліотрекер і MLD-sensor, описані в третьому розділі, взяті як прототип для розробки датчика. Принцип роботи обох прототипів заснований на порівнянні показань двох чутливих елементів, цей принцип ліг в основу ФЕД. Для визначення положення «яскравої плями» на небосхилі по одній осі достатньо двох елементів, розташованих на різних сторонах перегородки. Також для виключення недоліків прототипів, а саме для визначення необхідності орієнтування та запуску системи вранці, введено третій елемент, розташований з тильного боку ФЕД.

Аналіз методів контролю виявив оптичний метод, як найкращий для орієнтації ФМ, тому як чутливі елементи розглянуті тільки фоточутливі елементи. Як фоточутливі елементи обраний кремнієвий фотоелектричний перетворювач (ФЕП), т.к. 95% всіх ФМ у світі виготовлено з кремнію [81].

Як вихідний сигнал в датчиках часто використовують напругу ФЕП, однак через вплив температури навколишнього середовища на значення напруги підвищується похибка датчика. При нагріванні елемента однією градус понад 25 °З він втрачає у напрузі 0,002 У, тобто. 0,4%/°. На рисунку 5.1 наведено сімейство кривих ВАХ для температур 25°C і 60°C [82].

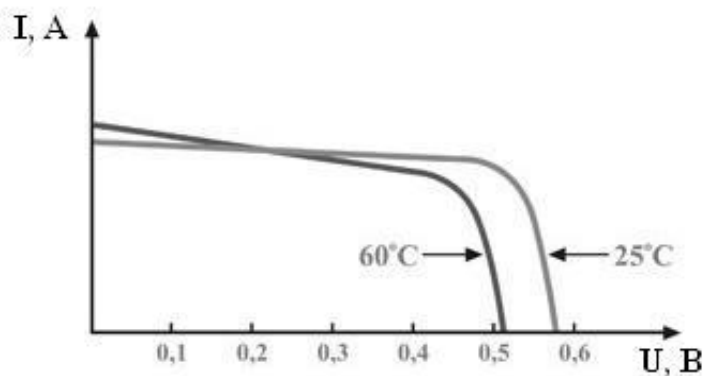


Рисунок 5.1 – Залежність струму та напруги кремнієвого ФЕП від температури.

Менш залежить від температури струм ФЕП, тому в запропонованому датчику як вихідний сигнал чутливих елементів використовується струм, що дозволяє підвищити чутливість датчика. Крім того струм короткого замикання, а відповідно і робочий струм, прямо пропорційні освітленості на відміну від напруги холостого ходу, що мало залежить від освітленості [82]. Зі зменшенням інтенсивності сонячного випромінювання ВАХ ФЕП зміщується вниз, що призводить до зниження струму коротко замикання, напруга холостого ходу при цьому зменшується незначно. Вплив інтенсивності сонячного освітлення на ВАХ ілюструється кривими рисунку 5.2.

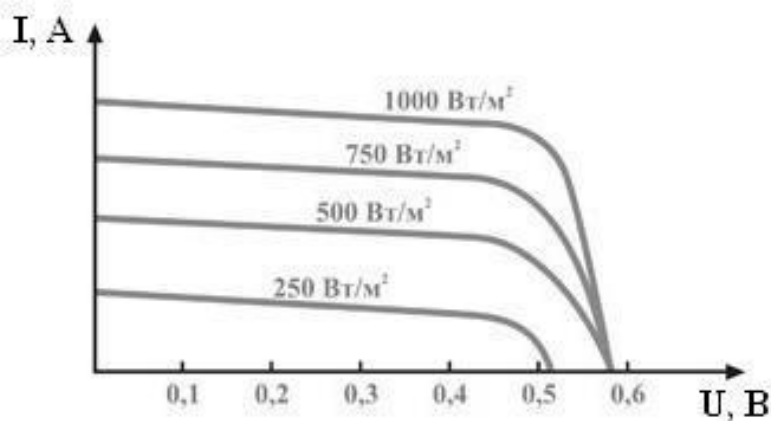


Рисунок 5.2 – ВАХ кремнієвого ФЕП за різної інтенсивності сонячного освітлення

Грунтуючись на сказаному вище, прийнято рішення використовувати у ФЕД як чутливі елементи три пластини ФЕП одного розміру, а як вихідний сигнал – струм, близький до струму короткого замикання.

Кут падіння променів на поверхню сильно впливає коефіцієнт відображення, а отже, і на частку несприйнятої сонячної енергії. Для скла при відхиленні кута падіння від перпендикуляра до його поверхні до 30° коефіцієнт відбиття практично не змінюється і становить трохи менше 5%. Ефективна площа ФМ дорівнює площі панелі, помноженої на косинус кута між перпендикуляром до ФМ та напрямком потоку. Тому, якщо ФМ перпендикулярна до сонячного потоку, її ефективна площа дорівнює її реальній площі.

Протягом року кут максимального підйому Сонця над горизонтом відхиляється від середнього становища лише на $\pm 23^\circ$. Ефективна площа ФМ при відхиленні від перпендикуляра на 23° залишається великою — щонайменше 92 % її реальної площі, а коефіцієнт відбиття становить менше 5 %. Виходячи з цього, поворот ФМ необхідно здійснювати щоразу, коли сонячний потік відхилиться від перпендикуляра до ФМ на 20%.

Розроблений датчик представлений рисунку 5.3.

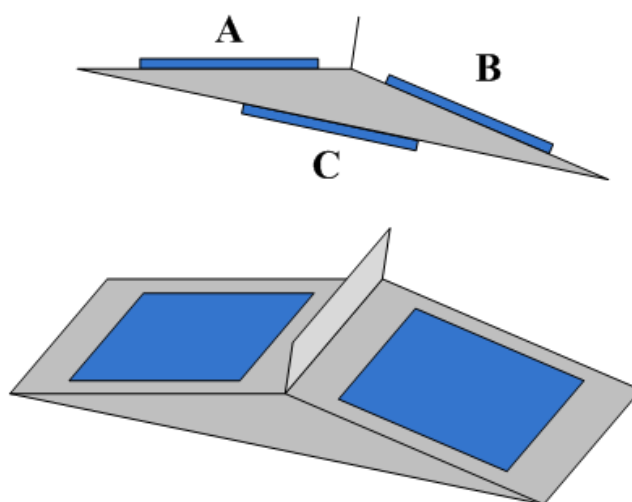


Рисунок 5.3 – Схематичне зображення ФЕД

У основі датчика два лицьових елементи визначення положення Сонця, третій тиловий елемент (С) – визначення рівня фонового випромінювання і запуску системи вранці.

Елементи А і В встановлені на різні сторони перегородки, що дозволяє компенсувати вплив різниці температур. Елемент С необхідний для виключення його впливу на два інших датчика, вимірювання розсіяного випромінювання та запуску системи в ранковий час.

Усі три елементи датчика мають однаковий розмір, отже, і вихідний сигнал за однакового рівня освітленості. Рівність сигналів елементів А, У і З означає похмуру погоду чи нічний час доби, орієнтування у разі немає сенсу. Якщо сигнал з елемента менше інших, то система подає команду повороту двигуна коли сигнал елемента А мінімальний, а сигнал елемента В максимальний. Поворот буде здійснюватися поки сигнал елемента не стане максимальним, що станеться при орієнтації ФМ на Сонці або найяскравіша пляма на небі.

У ранковий час, коли лицьові елементи відвернуті від Сонця, тильний орієнтований нього, що приймає блок контролера і подає команду повороту ФМ Схід. Таблиця можливих варіантів освітлення датчика представлена нижче.

Таблиця 5.1 – Варіанти освітлення ФЕД

Елемент А	0	0	0	1	1
Елемент В	0	0	1	0	1
Елемент С	0	1	0	0	1
Положення яскравої плями	ніч	схід	точно	західніше	хмарно
Команда поворотному пристрою	стояти	на схід	стояти	на захід	стояти

5.2 Оптимізація конструкції фотоелектричного датчика з використанням математичної моделі

Як сказано раніше, як вихідні сигнали ФЕД прийняті струми трьох його елементів.

Струм I_N визначається за формулою [86]:

$$I_N = K_{int} \cdot E, \quad (5.1)$$

де K_{int} – інтегральна чутливість ФЕП; E – освітленість ФЕП, Лк.

Освітленість E залежить від значення приходної сонячної радіації R_{np} і площі ФЕП S :

$$E = SR_{np} \cdot S. \quad (5.2)$$

Розрахунок представлений у четвертому розділі.

Як видно з формул 5.1 та 5.2, струм прямо пропорційно залежить від рівня світлового потоку. Отже, значення струму елемента також залежить від кута нахилу, як і значення сонячної радіації, що приходить на поверхню.

Побудовано модель ФЕД при куті між елементами А та В $\alpha = 160^\circ$ (рисунок 5.4).

$$I_A = I_N \cdot \cos(\beta); \quad (5.3)$$

$$I_B = I_N \cdot \cos(\beta - 20), \quad (5.4)$$

де I_A і I_B – значення струму елементів А і В; I_N – значення струму при $\beta = 0$, кут між елементами А і В; β – кут відхилення Сонця від нормалі ФЕД.

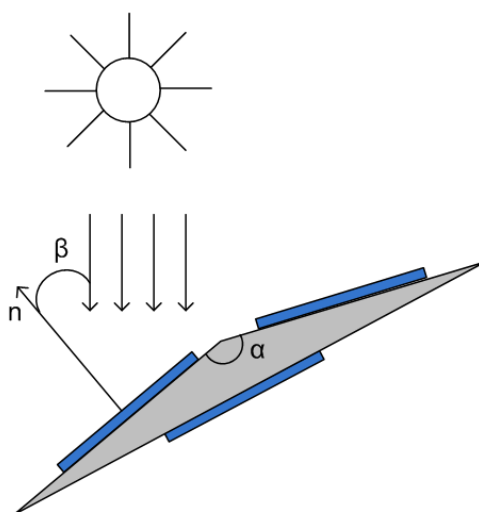


Рисунок 5.4 – ФЕД розташований під кутом до сонця (перша модель)

Результати розрахунків представлені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Струми елементів А та В залежно від кута відхилення Сонця

Кут β , °	I_A , мА	I_B , мА
0	20	16,98
5	19,81	18,2
10	19,24	19,24
15	18,2	19,81
20	16,98	20

Як видно з таблиці 5.1, різниця струмів елементів А та В при відхиленні Сонця від нормалі з кутом дуже мала. За такої маленької розбіжності сигналів вловити відхилення сонця дуже складно. При значенні коли сонце світить точно між елементами, струми елементів А і В рівні.

Побудовано нову модель ФЕД за різних значень кута між елементами А і В (рисунок 5.5).

$$I_A = I_N \cdot \cos(90 - \alpha / 2 + \beta); \quad (5.5)$$

$$I_B = I_N \cdot \cos(90 - \alpha / 2 - \beta), \quad (5.6)$$

де I_A і I_B – значення струму елементів А і В; I_N – значення струму при $\beta=0$; α – кут між елементами А та В; β – кут відхилення Сонця від нормалі ФЕД.

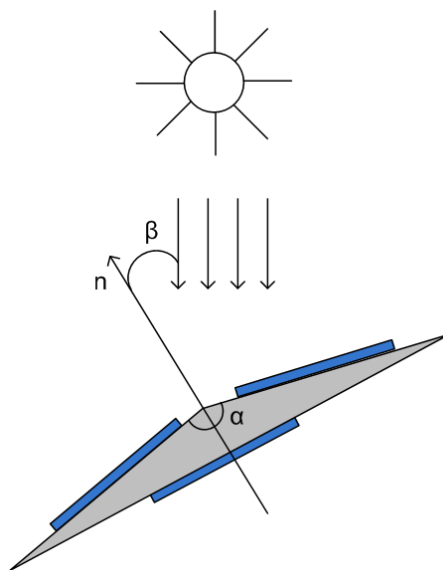


Рисунок 5.5 – ФЕД розташований під кутом β до сонця (друга модель)

Результати розрахунків різниці сигналів від кута відхилення сонячних променів від нормалі ФЕД за різних кутів між елементами представлені рисунку 5.6.

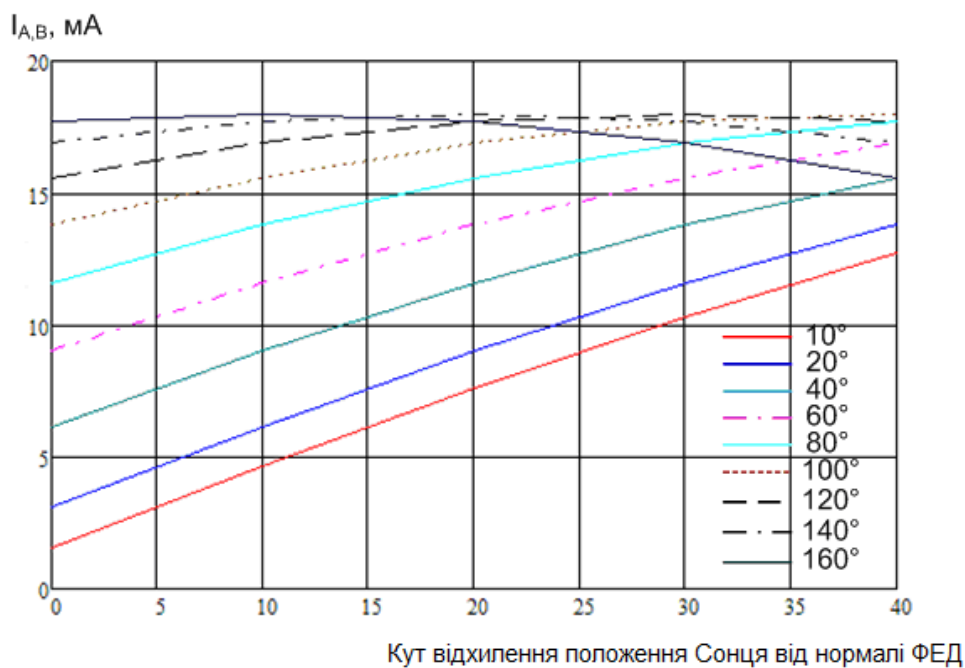


Рисунок 5.6 – Залежність струмів елементів від кута між елементами

З рисунка 5.6 видно, що достатня різниця між значеннями струму елементів A і при відхиленні Сонця до 20° буде при куті нахилу $\alpha = (10 - 40)^\circ$.

Рівність сигналів елементів A , B і C означає похмуру погоду чи нічний час доби, орієнтування у разі немає сенсу. Якщо сигнал з елемента C менше інших, то система подає команду повороту двигуна у бік більшого серед A і B . Поворот здійснюватиметься доки сигнали з елементів A і B не стануть рівні, це відбудеться при орієнтації ФМ на Сонці або яскраве пляма на небі.

Вранці, тоді як лицьові елементи відвернуті від Сонця, тильний орієнтований нього, що приймає блок контролера і подає команду повороту ФМ Схід. Таблиця варіантів освітлення датчика після оптимізації та команд поворотного пристрою представлена нижче.

Таблиця 5.3 – Варіанти освітлення ФЕД після оптимізації

Елемент А	0	0	0	1	1
Елемент В	0	0	1	0	1
Елемент С	0	1	0	0	0
Положення яскравої плями	ніч	схід	східніше	західніше	точно
Команда поворотному пристрою	стояти	на схід	на схід	на захід	стояти

Використання вихідного сигналу струму, який практично не залежить від температури навколишнього середовища, дозволяє виключити температурну нестабільність. Вихідний сигнал у разі залежить лише від сонячного випромінювання.

Особливості розробленого датчика:

1. Використання ФЕП як активного елемента та додавання в конструкцію тилового ФЕП для вимірювання фонового випромінювання та запуску системи в ранковий час.

2. Як регулюючий сигнал використовується струм, близький до струму короткого замикання $I_{кз}$ ФЕП, який залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і не залежить від температури.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано доцільність встановлення СЕС на території України в залежності від сонячного випромінювання та оцінки його енергетичного потенціалу.

2. Встановлено математичну сукупність співвідношень, що визначають залежність потоку сонячного випромінювання на поверхню ФМ від кута нахилу його поверхні; проведено розрахунок сонячної радіації, що попадає на поверхню ФМ протягом року без систем контролю положення та із застосуванням одно- та двоосної систем; доведено ефективність застосування одновісних та двовісних систем контролю на прикладі Тернополя, одновісне орієнтування протягом дня принесе додатково 37 % потужності на рік, а двовісне – 56 %.

3. Проведено аналіз існуючих способів, методів та датчиків визначення положення Сонця. Обґрунтовано ефективність застосування одновісної та двовісної систем контролю оптимальної орієнтації фотоелектричних модулів.

4. Побудовано та досліджено математичну модель фотоелектричного датчика, що складається з трьох фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Датчик визначає місце Сонця на небосхилі, фонове випромінювання і дозволяє вирішити проблему запуску системи в ранковий час.

5. Розроблено алгоритм роботи системи підвищення ефективності використання сонячної енергії.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нові підходи до створення високоефективних приймачів випромінювання для концентраторних сонячних модулів / Борщев В. Н., Лістратенко А. М., Проценко М. А. [і інші.] // Радіотехніка : всеукр. міжвід. наук.–техн. зб. / Харьк. нац. ун–т радіоелектроніки. – Харків, 2019. – Вип. 197. – С. 123–136.
2. Hamakawa, M. Solar photovoltaics - recent progress and its new role [Текст] / М. Hamakawa // Optoelectronics - Dev. and Tech. – 1990. – v. 5. № 2. – p. 113.
3. Романов С. О. Моніторинг, діагностика та прогнозування вихідної потужності геліостанцій за умови роботи в інтелектуальних мережах / Романов С. О. // Гірничий вісник : наук.–техн. зб. / ДВНЗ "Криворізький національний університет". – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 104. – С. 113–118.
4. Прогнозування графіка генерування фотоелектричних станцій на добу наперед / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, В. В. Тепля // Енергетика та електрифікація. – 2019. – № 5–6. – С. 32–45.
5. Мисак Й. С. та ін. Сонячна енергетика. Теорія та практика. // Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О.С.Дацько, С. П. Шаповал. Видавництво «Львівська політехніка», Львів. – 2014. –340 с.
6. Оптимізація процесу вибору місця розташування сонячних електростанцій з використанням ГІС–аналізу / О. С. Бутенко, К. А. Цвященко, К. О. Буравченко, А. А. Нікітін // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – № 1. – С. 17–21.
7. Михненко С. Що краще розміщувати на даху? / С. Міхненко // Air Water Therm. – 2021. – № 1. – С. 68–71.
8. Рощина Н. В. Аналіз процесу впровадження систем виробництва сонячної енергії для приватних домогосподарств в Україні / Н. В. Рощина, Л. С. Борданова // Інвестиції: практика та досвід. – 2018. – № 19. – С. 24–27
10. Кузнецов Д. І. Інформаційна система прогнозування кількості

виробленої енергії сонячною електростанцією / Кузнецов Д. І. // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 48. – С. 105–110.

11. Андропова О. В. Оптимізація розміщення приймачів сонячної енергії рядами для кліматичних умов півдня України / О. В. Андропова, В. В. Курак // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 2. – С. 45–53.

12. Markvart, T. Practical handbook of photovoltaic: fundamentals and applications [Текст] / T. Markvart, L. Castaner. – NY: ELSEVIER, 2003. – P. 8.

13. Deger [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.degerenergie.de>.

14. Промислова сонячна енергетика / В. Скляр // Мережі і бізнес: телекомунікації і мережі – технології і ринок. – 2020. – № 3. – С. 72–77.

15. Solar tracker perpfomance [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>.

16. TracStar [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.helmholz.us>.

17. Rustu, Eke. The largest double-axis sun tracking pv systems with electronic control and photosensors in Turkey [Текст] / Rustu Eke, Sadan Ozden, Ali Senturk, Olaf Fleck and Sener Oktik // MuglaUniversit Clean Energy Research & Development Centre, Mugla, Turkey.

18. The first French PV power plant equipped with 2 axis tracking – one year feedback. Francois Paponneau. Exosun. Technopole Bordeaux Montesquieu.

19. Особливості визначення раціональних площадок для розміщення фотоелектричних станцій в Україні / Л. А. Кирнос, В. О. Пундєв, В. Ф. Резцов [та ін.] // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 2. – С. 13–21.

20. Резцов В. Ф. Інтерактивна карта потенціалу сонячної енергії України / В. Ф. Резцов, С. В. Матях, О. О. Кудреватих // Відновлювана енергетика. – 2018. – № 4. – С. 34–42.

21. Прилади фотоелектричні. Частина 2. Вимоги до базових фотоелектричних приладів : стандарт. – ДСТУ EN 60904–2:2018. – На заміну

ДСТУ EN 60904–2:2009. – Чинний з 2020–01–01. – [Б. м. : б. в.]. – IV, 11 с. 76.

22. Параметри прямого потоку сонячної енергії при ясному небі з урахуванням прозорості атмосфери / С. Д. Гальчак, В. М. Боярчук, В. М. Сиротюк, С. В. Сиротюк // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 2. – С. 22–31.

23. Сильвестр Н. Правильне розміщення сонячних станцій / Н.Сильвестр // Новини енергетики. – 2018. – № 4. – С. 22–26.

24. Магро В. І. Комп'ютерне моделювання випромінювального модуля системи моніторингу сонячної електростанції / В. І. Магро, С. В. Плаксін // Відновлювана енергетика. – 2021. – № 2. – С. 29–37.

25. Комбіновані фотоенергетичні системи : [монографія] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц ; Нац. техн. ун–т "Харківський політехнічний інститут". – Харків : [ФОП Бровін О. В.], 2020. – 323 с.

26. Замула Х. П. Застосування комплексних сонячних установок для енергозбереження підприємств агропромислового комплексу України / Х. П. Замула, М. О. Тонюк // Збалансоване природокористування. – 2020. – № 3. – С. 50–59.

27. Накашидзе Л. В. Особливості вибору конструкції перетворювачів енергії сонячного випромінювання в системах енергозабезпечення споруд : монографія / Л. В. Накашидзе ; Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. – Дніпро : Акцент ПП, 2018. – 119 с.

28. Бордаков М.М. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі УС та UV для моделювання ФЕС в програмі PVsyst / М.М. Бордаков // Відновлювана енергетика. – 2021. – № 2. – С. 47–52.

29. Ващишак І. Р. Підвищення енергоефективності сонячної електростанції / І. Р. Ващишак, В. С. Цих // Нафтогазова енергетика. – 2020. – № 1. – С. 132–143.

30. Конфігурація системи автономного електроживлення військового об'єкту на основі використання сонячної енергії / О. О. Казіміров, І. М. Майборода, І. Л. Костенко, К. В. Власов // Системи озброєння і військова

техніка. – 2019. – № 4. – С. 66–72.

31. Гаєвський О. Ю. Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації / О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, І. О. Корнієнко // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 2. – С. 32–39.

32. Вимоги щодо забезпечення екологічних факторів при впровадженні технологій фотоенергетики в Україні / В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик, В. О. Пундєв [та ін.] // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 4. – С. 29–36.

33. Житник Н. Е. Моделювання процесу відбору енергії сонячної батареї для зарядки накопичувача при низьких рівнях освітленості / Житник Н. Е., Левченко Р. Ю., Плаксин С. В. // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.–техн. збірник / [ДВНЗ "Національний гірничий ун–т"]. – Дніпро, 2018. – Вип. 100. – С. 73–77.

34. Конструкції і принципи роботи фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії / Н. Н. Чернышев, А. Ю. Панченко, М. А. Ф. Алкхавалдех [и др.] // Радіофізика та електроніка. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 82–88.

35. Keller, L. Optimizing the Panel Area of a Photovoltaic System in Relation to Static Inverter Practical Results [Текст] / L. Keller, P. Affolter // SE. – 1995. – Vol. 55. № 1. – P. 1-7.

36. Будько В. І. Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня д–ра техн. наук : спец. 05.14.08 "Перетворювання відновлюваних видів енергії" / Будько Василь Іванович ; НАН України, Ін–т відновлюваної енергетики. – Київ, 2019. – 40 с.

37. Гарячевська І. В. Розрахунок окупності впровадження сонячної електростанції / І. В. Гарячевська, Д. Г. Сидоров // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2018. – Вип. 3, т.1. – С. 245– 249.

38. Стаднік М. І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / М. І. Стаднік, Д. П. Проценко, С. М. Бабій //

Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 4. – С. 32–41.

39. Таранюк Ю. А. KNESS GROUP / Ю. А. Таранюк // Енергетика та електрифікація. – 2019. – № 5–6. – С. 21–24.

40. Спрощений розрахунок сонячних панелей. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://solarsoul.net/uk/rozrachunok-sonyachnix-panelej>

41. Прилади фотоелектричні. Частина 9. Вимоги до характеристик імітаторів сонячного випромінювання : стандарт. – ДСТУ EN 60904–9:2018. – Чинний з 2020–01–01. – [Б. м. : б. в.]. – IV,10 с. 79.

42. Прилади фотоелектричні. Частина 4 Еталонні сонячні прилади. Процедури встановлення простежуваності калібрування : стандарт. – ДСТУ EN 60904–4:2018. – Чинний з 2020–01–01. – [Б. м. : б. в.]. – IV, 22 с. 77.

43. Студенець В. П. Чисельний розрахунок параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга / В. П. Студенець, К. О. Славінська // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 1. – С. 36–44.

44. Twidell, J. Renewable Energy Systems [Текст] / J. Twidell, J. Weir // Chapman and Hall. – 1994.

45. Centre for Resources and Environmental Studies, ANU, Sustainable Energy Systems [Текст] – Pathways for Australian Energy Reforms, Cambridge University Press –1994.

46. Fahrenburch, A. Fundamentals of solar cells [Текст] / A. Fahrenburch, R. Bube // Academic Press. – New York, 1983.

47. Ніл Деграсс Тайсон. Астрофізика для тих, хто цінує час. Видавництво: КМ-букс, К. – 2023. –200 с.

48. Frolkis, V.A. Radiation code for climate and general circulation models [Текст] / V.A. Frolkis, E.V. Rozanov // Current problems in atmospheric radiation.–1993.– P. 176.

49. Prokofyeva H. M. Technical detergent for equipment of alternative energy sources based on helio system / H. M. Prokofyeva, P. V. Sudarushkina, M. Jn. Berkut // Вода і водоочисні технології. – 2020. – № 1. – С. 51–55.50.

Dunlop, E. Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale [Текст] / E. Dunlop, L. Wald, M. Šúri // Nova Science Publishers. – 2006.

51. Petrov, L.A. Solar Tracking Strategies [Текст] / L.A. Petrov // BSc (Hons) Dissertation – University of Dundee 2010/2011. – 79 p.

52. Основи геофізики (фізика Землі): навчальний посібник з практикуму для студентів геологічного факультету ЛНУ імені Івана Франка / укл.: В.В. Фурман, Ю.М. Віхоть, О.М. Павлюк. – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2016. – 104 с. 53. Damm, J. An active solar tracking system [Текст] / J. Damm // HomeBrew Magazine. – 1990.

54. «Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року». Звіт за результатами моделювання базового та альтернативних сценаріїв розвитку енергетичного сектору. / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін. ; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої // Пред-во Фонду ім. Г. Бьолля в Україні. – Київ : Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.

55. Собчук Д. С. Математичне моделювання функціонування розподільних електричних мереж в умовах розбудови відновлюваних джерел / Собчук Д. С., Падалко А. М., Цвек С. О. // Студентський науковий вісник : наук. зб. / Луц. ун-т, Ф-т буд-ва та дизайну, Ф-т екології туризму та електроінженерії. – Луцьк, 2019. – Вип. 33. – С. 217–224.

56. Фізика сонячних елементів : лабораторний практикум / Чернівецький нац. ун-т імені Ю. Федьковича ; [уклад. Ілащук Марія Іванівна, Сльотов Олексій Михайлович]. – Чернівці : ЧНУ імені Юрія Федьковича, 2019. – 72 с.

57. Хомуляк М. О. Система керування позиціонуванням сонячної панелі / Хомуляк М. О., Пильгун А. О. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" : зб. наук. праць. – Львів, 2018. – Вип. № 905 : Комп'ютерні системи та мережі. – С. 137–142.

58. Basic Physics. Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zayaninfotech.physics.app>

59. Эффект Саньяка [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ефект_Саньяка.

60. Oleschuk V. Two–inverter–based photovoltaic installation adjusted by the modified scheme of space–vector modulation / V. Oleschuk, V. Ermuratskii // Технічна електродинаміка. – 2020. – № 5. – С. 26–30.

61. Порівняльний аналіз ефективності методів покоординатного пошуку для знаходження оптимальної позиції сонячної панелі / М. О. Слабінога, Н. Б. Клочко, О. С. Криницький, Ю. М. Кучірка // Методи та прилади контролю якості. – 2019. – № 1. – С. 77–84.

62. Intelligent Solar Tracking Control System Implemented on an FP [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.altera.co.jp/literature/dc/2007/t3c.pdf>.

63. Solar tracking project [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ecorenovator.org/forum/solar-power/875-solar-tracker-project-14.html>.

64. Mysolar tracker [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.zrimir.ru/wvbТНF0Нyno/My_Solar_Tracker.html.

65. Arduino Solar Tracker [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Solar-Tracker>.

66. Прилади фотоелектричні. Частина 5. Визначення еквівалентної температури методом вимірювання напруги холостого ходу : стандарт. – ДСТУ EN 60904–5:2018. – Чинний з 2020–01–01. – [Б. м. : б. в.]. – IV, 6 с. 78.

67. Oleschuk V. Two–inverter–based photovoltaic installation adjusted by the modified scheme of space–vector modulation / V. Oleschuk, V. Ermuratskii // Технічна електродинаміка. – 2020. – № 5. – С. 26–30.

68. Двигун Стірлінга. Інформаційний портал про альтернативні джерела енергії на Україні та світі [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://alternative-energy.com.ua/uk/vocabulary/%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD-%D1%81%D1%82%D1%96%D1%80%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%B3%>

D0%B0/

69. Сонячна енергія та інсоляція: монографія / В. П. Гальчак, В. М. Боярчук, С. В. Сиротюк, С. В. Коробка, Т. О. Станицький. Львів: Магнолія 2006, 2024. –242 с.

70. Калькулятор сонячної станції [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://solartechnology.com.ua/online-calculator>

71. Kondratjev, K.Ya. Radiation calculation of the slope planes [Текст] / К.Яа. Kondratjev, Z.I. Pivovarova, M.P. Fedorova. – М.: Gidrometeoizdat. – 1978.

72. Stine W., Geyer M. Power From The Sun [Электронный ресурс] – Режим доступу: <http://www.powerfromthesun.net/index.html>.

73. Prokofyeva H. M. Technical detergent for equipment of alternative energy sources based on helio system / H. M. Prokofyeva, P. V. Sudarushkina, M. Jn. Berkut // Вода і водоочисні технології. – 2020. – № 1. – С. 51–55.

74. Красножон О. В. Інформаційна технологія первинної обробки даних при управлінні фотоелектричними перетворювачами : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : [спец.] 05.13.06 "Інформаційні технології" / Красножон Олексій Васильович ; МОН України, Чернігівський нац. технол. ун-т. – Чернігів, 2019. – 21 с.

75. Сонячна генерація в Україні: ігнорувати не можна втілити [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://lada.fm/2021/05/28/sonyachna-generacya-v-ukrayin-gnoruvati-ne-mozhna-vtliti.html>

76. Корчан В. М. Трекер для сонячних панелей / В. М. Корчан, В. І. Морозова // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – № 3. – С. 169–172.

77. Wichert, B. First Experiences with a Novel Predictive Control Strategy for PV [Текст] / B. Wichert, W. Lawrance, T. Friese // Diesel Hybrid Energy Systems – Solar, 1999.

78. Зайцев Р. В. Фізико–технічні основи створення комбінованих фотоенергетичних систем на основі функціональних твердотільних структур : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня д-ра техн. наук : [спец.] 01.04.07

"Фізика твердого тіла" / Зайцев Роман Валентинович ; НАН України, Ін-т електрофізики і радіаційних технологій. – Харків, 2018. – 32 с.

79. Електронна книга. Сонячна електроенергія для початківців. Частина 1. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://vipmart.com.ua/ua/a486669-elektronnaya-kniga-solnechnaya.html>.

80. Михненко С. Фотовольтаїка для аграріїв / С. Михненко, О. Омельченко // Air Water Therm. – 2018. – № 3. – С. 24–26.

81. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія / [П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук та ін.] ; Вінницький нац. техн. ун-т. – Вінниця, 2018. – 136 с.

82. Буратинський І. М. Оптимізація структури обладнання фотоелектричної сонячної електростанції / І. М. Буратинський, Т. П. Нечаєва, С. В. Шульженко // Проблеми загальної енергетики. – 2020. – № 2. – С. 17–29.

83. Solar resource maps & GIS data. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=ukraine>

84. Оцінка енергії сонячного випромінювання. // інтернет-магазин Еко електрика [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://eco-electrics.com.ua/articles/otsinka-energiyi-soniachnogo-viprominiuvannia>

ДОДАТКИ