

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

**«Підвищення ефективності використання сонячних
панелей за рахунок керування електроприводом
регулювання кута нахилу»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-22М*

ОПП «Електротехнічні системи

електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»,

_____Юрій ДЕМЧЕНКО

« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

Петро ПЛЕСКОВ

« 09 » 10 2023 р.

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

Демченко Юрію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності використання сонячних панелей за рахунок керування електроприводом регулювання кута нахилу

Increasing the efficiency of solar panels by controlling the electric tilt control drive

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: огляд сучасних сонячних панелей та механізмів їх переміщення; дослідження систем керування сонячними трекерами; розрахунок та моделювання сонячного трекера; ефективність використання сонячних панелей у складі сонячного трекера; охорона праці під час встановлення, роботи та обслуговування сонячних станцій; висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. І.В. Савеленко		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2023 р.	
2	Огляд сучасних сонячних панелей та механізмів їх переміщення	13.10.2023 р.	
3	Дослідження систем керування сонячними трекерами	25.10.2023 р.	
4	Розрахунок та моделювання сонячного трекеру	30.10.2023 р.	
5	Ефективність використання сонячних панелей у складі сонячного трекеру	15.11.2023 р.	
6	Охорона праці під час встановлення, роботи та обслуговування сонячних станцій	30.11.2023 р.	
7	Висновки, список використаних джерел	07.12.2023 р.	
8	Оформлення презентації МР	11.12.2023 р.	
9	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки МР	15.12.2023 р.	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Юрій ДЕМЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 93 с.; 59 рис.; 19 табл.; 31 джерело

Демченко Ю. І. Підвищення ефективності використання сонячних панелей за рахунок керування електроприводом регулювання кута нахилу. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єктом досліджень є регулювання кута нахилу сонячних панелей.

Предмет досліджень – ефективність керування положенням кута панелей сонячного трекеру.

Метою роботи є підвищення енергоефективності роботи сонячних панелей за рахунок знаходження оптимального кута нахилу сонячних панелей.

У першій главі кваліфікаційної роботи виконано аналіз сучасних типів сонячних панелей та застосування сонячних трекерів, їх видів та конструктивного виконання. У другій главі розглянуто базові системи та алгоритми керування сонячними трекерами в залежності від положення Сонця. У третій главі проводиться вибір моделі сонячного трекера, розраховуються основні елементи моделі, здійснюється вибір системи стеження та моделювання СДПМ. Четверта глави присвячена дослідженню ефективності функціонування СТ з різною точністю позиціонування порівняно зі стаціонарними системами.. У п'ятій главі розглядаються заходи з охорони праці при монтажі та експлуатації сонячних станцій.

За результатами роботи зроблено висновки та пропозиції щодо роботи сонячного трекеру, розраховано економічний ефект від впровадження сонячних панелей зі змінним кутом нахилу.

Ключові слова: сонячна панель, сонячний трекер, система стеження, модель сонячного трекеру, ефективність використання

ABSTRACT

Qualification work: 93 p.; 59 fig.; 19 tables; 31 sources

Demchenko Yu. I. Increasing the efficiency of using solar panels due to the control of the electric drive for adjusting the angle of inclination. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of research is the regulation of the angle of inclination of solar panels.

The subject of research is the effectiveness of controlling the position of the angle of the solar tracker panels.

The goal of the work is to increase the energy efficiency of solar panels by finding the optimal angle of inclination of solar panels.

In the first chapter of the qualification work, an analysis of modern types of solar panels and the use of solar trackers, their types and design is performed. The second chapter deals with the basic systems and algorithms for controlling solar trackers depending on the position of the Sun. In the third chapter, the solar tracker model is selected, the main elements of the model are calculated, and the tracking system and SDPM modeling are selected. The fourth chapter is devoted to the study of the effectiveness of the operation of STs with different positioning accuracy compared to stationary systems. The fifth chapter deals with labor protection measures during the installation and operation of solar stations.

Based on the results of the work, conclusions and suggestions regarding the operation of the solar tracker were made, the economic effect of the introduction of solar panels with a variable tilt angle was calculated.

Key words: solar panel, solar tracker, tracking system, solar tracker model, usage efficiency

З М І С Т

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МЕХАНІЗМІВ ЇХ ПЕРЕМІЩЕННЯ.....	11
1.1 Призначення та основні типи сонячних панелей	11
1.2 Загальна характеристика пристроїв стеження за положенням Сонця.....	13
1.2.1. Класифікація сонячних трекерів.....	14
1.2.2. Огляд функціонуючих енергоустановок сонячних трекерів	18
1.3 Комплектація сонячного трекера.....	22
2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ТРЕКЕРАМИ.....	25
2.1 Основні залежності для визначення кутів розміщення СП.....	25
2.2 Базові системи та алгоритми керування положенням трекерів...	30
2.3 Аналіз існуючих систем керування.....	34
3. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРУ....	39
3.1 Конструктивне виконання установки.....	39
3.2. Вибір елементів системи сонячного трекеру.....	43
3.3 Автоматизована система керування положенням СП.....	51
3.4 Моделювання системи електроприводу сонячного трекеру.....	59
4. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ У СКЛАДІ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРУ.....	65
4.1 Оцінка сумарної сонячної радіації на території України.....	65
4.2 Визначення електроенергії, що виробляють стаціонарно встановлені сонячні панелі.....	67
4.3 Визначення електроенергії, що виробляють сонячні панелі у складі трекеру.....	71

4.4 Розрахунок економічної ефективності від застосування трекерної установки з різною точністю позиціонування.....	79
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВСТАНОВЛЕННЯ, РОБОТИ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ СОНЯЧНИХ СТАНЦІЙ.....	82
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЕС – сонячна електрична станція

СБ – сонячна батарея

СЧ – сонячна панель

ККД – коефіцієнт корисної дії

САК – система автоматичного керування

ФМ – фотомодуль

ФЕМ – фотоелектричний модуль

СТ – сонячний трекер

ТС – трекерна система

ПЛК – програмований логічний контролер

СД - синхронний двигун

СДПМ - синхронний двигун з постійними магнітами

АСК - автоматизована система керування

ЧРСЕ – частотнорегульований синхронний електропривод

НБУ – Національний банк України

ВСТУП

Актуальність теми. В зв'язку із глобальними змінами клімату на планеті, стає більш важливим робити все можливе для зменшення негативного впливу на атмосферу через викиди парникових газів. Використання альтернативної енергетики, зокрема геліоенергетики, дозволяє уникнути шкідливих наслідків, що спричиняють глобальне потепління. Однією з найбільших переваг є те, що сонячна енергія є чистим і відновлювальним джерелом енергії.

Географічне розташування України сприяє реалізації проектів генерації сонячної енергії, завдяки великій кількості сонячних днів. Це базовий фактор для прогнозування комерційних перспектив проектів сонячної електрогенерації в Україні.

Мета і завдання дослідження. Застосування сонячних панелей є практичним методом виробництва електроенергії різноманітного використання. Вартість сонячної електричної системи теоретично може бути нижчою та забезпечувати живлення на тривалий період при належному обслуговуванні.

Але стаціонарна установка сонячних панелей ускладнює раціональне використання їх протягом усього світлового дня, оскільки змінюється напрямок падіння сонячних променів. Підвищення ефективності виробництва електричної енергії за допомогою сонячних батарей може бути досягнуто шляхом розробки системи управління, яка оптимізує технологічний процес і забезпечує максимальну енергетичну ефективність. Ця система використовує стеження за Сонцем для оптимального направлення сонячних батарей, забезпечуючи їхню максимальну ефективність у виробництві електроенергії.

Досягнення цієї мети потребує виконати наступні завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих сонячних панелей, сонячних трекерів, систем стеження за положенням Сонця, датчиків положення Сонця, електромеханічних виконавчих пристроїв та сформулювати вимоги до системи стеження за Сонцем з ціллю підвищення енергетичної ефективності застосованих сонячних панелей;
- обрати конструктивне виконання установки, виконати розрахунок окремих елементів, розробити структурну та функціональну схему установки, алгоритм керування стеженням, який забезпечує задану точність переміщення з

мінімальним споживанням електроенергії виконавчими механізмами з врахуванням зміни поточної освітленості;

- провести моделювання системи сонячного трекеру з врахуванням алгоритму керування положенням сонячних панелей;
- виконати оцінку ефективності досліджуваної системи при різних алгоритмах зміни положення сонячного трекеру.

Об'єктом дослідження являється регулювання кута нахилу сонячних панелей.

Предметом дослідження являється система керування електроприводом сонячного трекеру з реалізацією системи автоматичного стеження СП за Сонцем для збільшення вироблення електроенергії сонячними батареями та зменшення споживання її виконавчими пристроями системи стеження.

Методи дослідження ґрунтуються на загальних принципах теорії електричних ланцюгів, теорії автоматичного управління, обчислювальних методах, а також використанні сучасних інструментальних систем і методів математичного моделювання, таких як програма MATLAB додаток Simulink, а також розрахункові програми для фотоелектричних систем.

Основні теоретичні концепції перевіряються через проведення математичного моделювання.

Науково-практична цінність роботи.

Виконано вибір системи сонячного трекеру, яка дозволяє запровадити раціональний та ефективний режим установки.

Запропоновано алгоритм роботи системи керування виконавчим пристроєм з врахуванням точності позиціонування та математична модель сонячного трекеру, що враховує заданий алгоритм системи керування.

Підвищено ефективність роботи СТ за рахунок точності спостереження при мінімізації споживання електричної енергії електромеханічним виконавчим пристроєм.

Даний сонячний трекер може бути використаний для живлення приватних об'єктів, віддалених від електричних мереж, або у складі промислової сонячної електростанції.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МЕХАНІЗМІВ ЇХ ПЕРЕМІЩЕННЯ

1.1 Призначення та основні типи сонячних панелей

Відомі фототермічний та фотоелектричний способи перетворення енергії Сонця. Фототермічний використовується у сонячному колекторі для нагріву теплоносія до високої температури і дозволяє здійснювати опалення та гаряче водопостачання приміщень. В роботі буде розглянуто фотоелектричний спосіб, а саме отримання електричного струму за допомогою сонячного випромінювання та напівпровідникових фотоелементів.

Принцип роботи фотомодуля (ФМ) заснований на фотоелектричному ефекті. При потраплянні світла на напівпровідникову пластину з p-n переходами генерується постійний електричний струм. Для перетворення постійного електричного струму у змінний додатково встановлюється інвертор. На рис. 1а) наведено зовнішній вигляд сонячних панелей та графічне пояснення їх роботи (рис.1б).

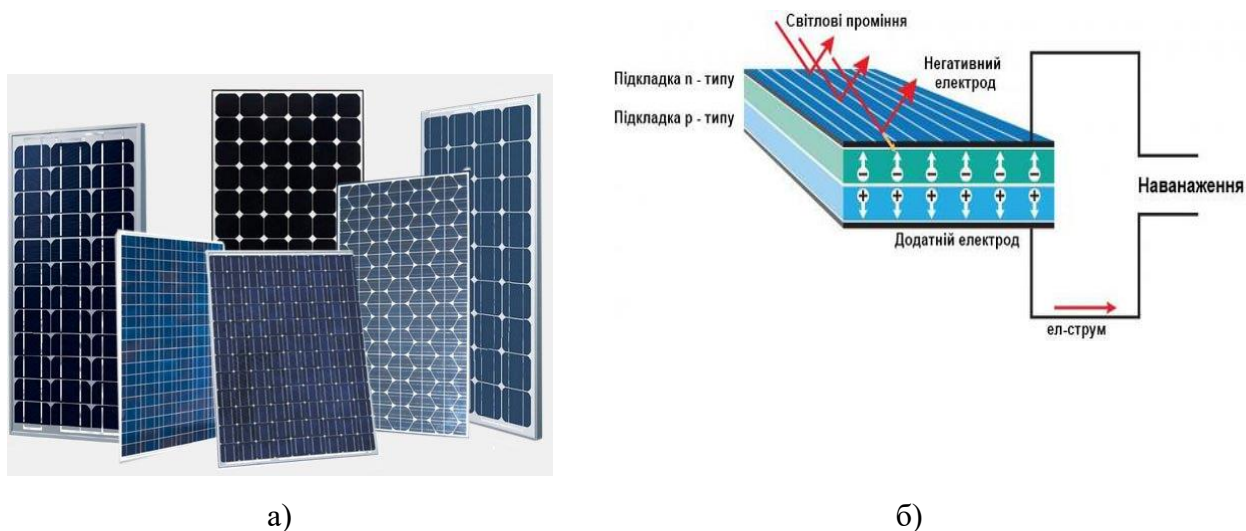


Рисунок 1.1 - Зовнішній вигляд сонячних панелей (а) та графічне пояснення їх роботи (б)

Основне застосування сонячних батарей (СБ) - це забезпечення автономною електроенергією. В залежності від доцільної сфери використання, вони можуть мати різну потужність та конструкцію.

Сонячні панелі (СП) будуються з фотоелементів (фотомодулів), які зроблені на основі кристалів кремнію. Саме в них відбувається утворення енергії. В залежності від організації атомів кремнію у кристалі ФМ панелі поділяються на аморфні, монокристалічні та полікристалічні. Зовнішній вигляд різних типів фотомодулів представлено на рис.1.2 а)-в).

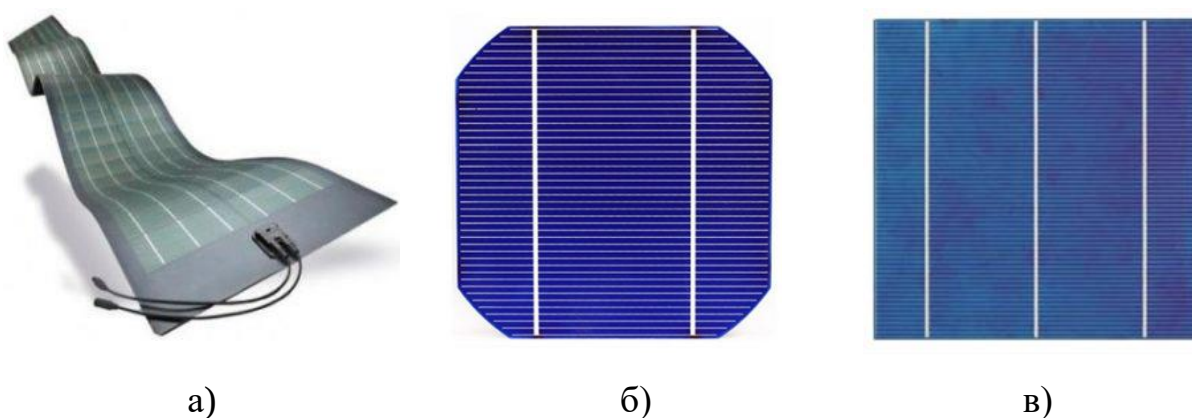


Рисунок 1.2 - Зовнішній вигляд різних типів фотомодулів:

а) аморфний; б) монокристалічний; в) полікристалічний

Кожний з типів фотомодулів має свої переваги та недоліки. Якщо казати про тонкоплівку панель (аморфний модуль), вона добре працює при підвищеній температурі, розсіяному світлі чи низькій освітленості, може бути інтегрована в приміщенні.

Монокристалічні панелі характеризуються найвищою енергоефективністю, мають компактні розміри, можливість згинатися, великий термін придатності.

Полікристалічні панелі мають нижчу енергоефективність, порівняно з монокристалічними, що обумовлено гіршим очищенням кремнію, використанням вторинної сировини. Але їх безумовною перевагою є нижча вартість.

Кожний тип панелей має свою доцільну сферу застосування, їх порівняння за основними характеристиками наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Загальна характеристика основних типів панелей.

Характеристики/Типи панелей	Тонкоплівочні	Полікристалічні	Монокристалічні
Вартість	найдешевші	середня	найдорожчі
ККД	12%	20%	25%
Термін служби	< 2 років	20 років	20 років
Вага	найлегші	середня	найважчі
Площа для розміщення системи потужністю 10 кВт	85	183	70
Найбільш доцільна сфера використання	домогосподарства	промислові стаціонарні	домогосподарства, промислові трекерні

1.2 Загальна характеристика пристроїв стеження за положенням Сонця

На сьогодні багато вітчизняних та зарубіжних виробників виготовляють різноманітні конструкції фотоелектричних модулів (ФЕМ) у широкому ціновому діапазоні. Всі їх можна поділити на дві основні групи: динамічні та статичні системи.

Особливістю статичних систем являється нерухоме кріплення сонячних панелей під певним кутом нахилу, який, як правило, визначається місцезнаходженням ФЕМ.

Але такі системи мають явний недолік – знижена продуктивність, що пов'язана з неточною орієнтацією на Сонце. Для усунення цього недоліку потрібно застосовувати динамічні системи, які будуть забезпечувати автоматичний поворот сонячних панелей під певним кутом до горизонту чи за азимутом. Такі системи отримали назву сонячних трекерів.

Основним завданням трекерного пристрою являється оптимізація кута падіння Сонця на поверхню фотоелектричного модуля. Виконувати переміщення сонячних панелей можливо як ручним приводом, так і за допомогою актуаторів, які виконуються на основі електродвигунів. При цьому

потрібно намагатися встановити туку орієнтацію панелі, коли сонячні промені розміщені перпендикулярно до панелі ФЕМ. Сонячні трекери мають різну конфігурацію та їх робота основана на різних принципах.

1.2.1. Класифікація сонячних трекерів

Трекери класифікуються за кількістю та положенню вісей обертання (рис. 1.3).

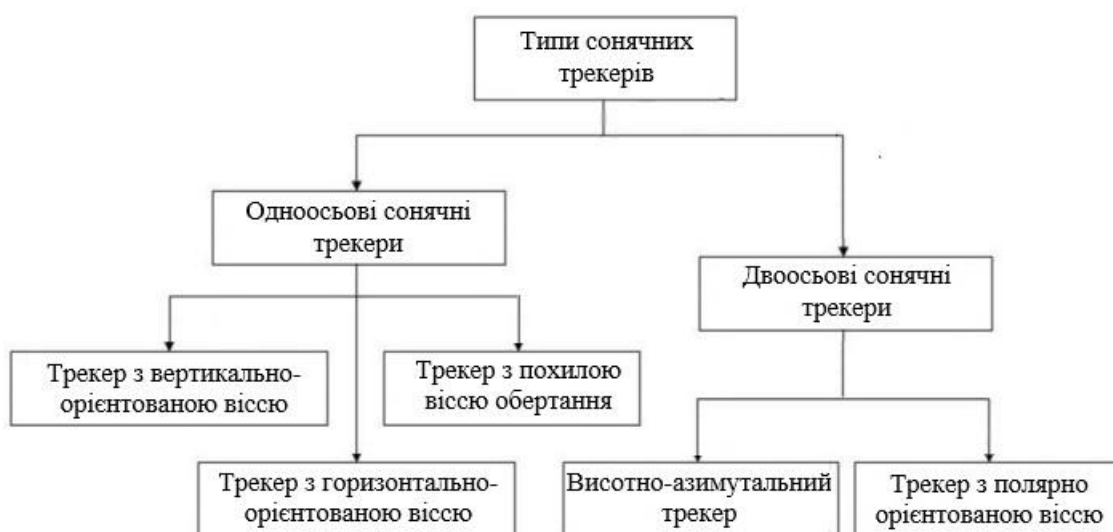


Рисунок 1.3 – Класифікація сонячних трекерів.

Зовнішній вигляд одноосьових трекерів зображено на рис. 1.4. а) – в). Основні види розміщення вісей обертання:

- горизонтальна: horizontal single axis tracker (HSAT);
- вертикальна: vertical single axis tracker (VSAT);
- похила: tilted single axis tracker (TSAT).

Конструктивно HSAT мають вісь, що орієнтована по лінії «північ-південь». Панелі монтують на горизонтальну трубу на підшипниках. У VSAT вісь розміщується вертикально до землі, а панелі встановлюються під певним кутом до вісі. У TSAT вісь займає проміжне положення між горизонтальною та вертикальною. Всі одноосьові СТ обертаються навколо своєї вісі, змінюючи положення залежно від руху Сонця протягом дня.

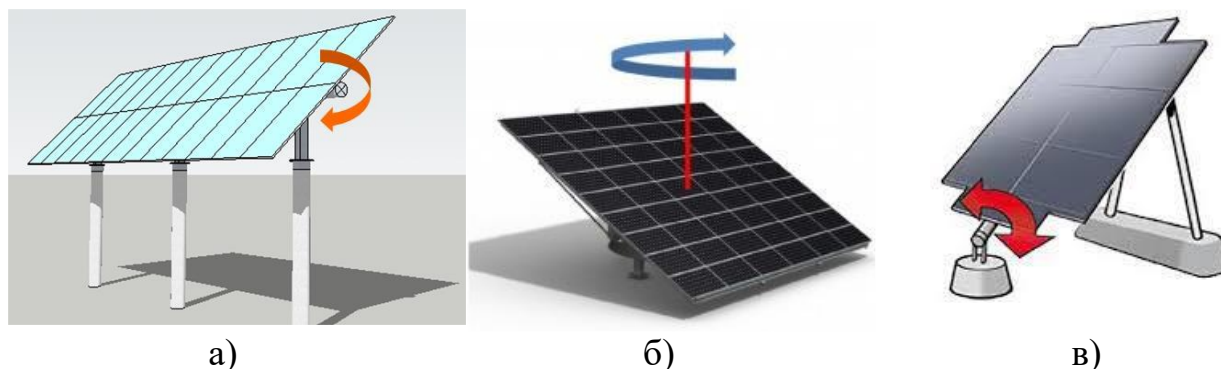


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд одноосьових трекерів: а) з горизонтальною орієнтованою віссю обертання; б) з вертикально орієнтованою віссю обертання; в) однією похилою віссю обертання

Потрібно враховувати, що VSAT більш ефективні для високих широт. Якщо СТ використовуються у промислових масштабах, потрібно уникати затінення сусідніх рядів для максимального використання робочої поверхні СП.

Двоосьові сонячні трекери - це системи, які відстежують рух Сонця в обох напрямках: по горизонталі і вертикалі. Це дозволяє трекерам максимально використовувати сонячну енергію протягом дня і забезпечує покращену ефективність сонячних установок відповідно до зафіксованих панелей. Зовнішній вигляд двоосьових трекерів зображено на рис. 1.5.

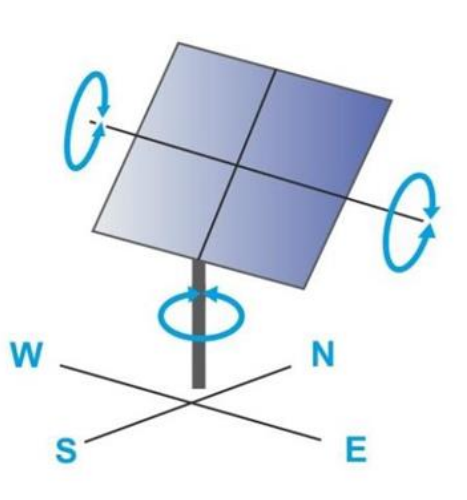


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд двоосьових трекерів:

Основні види розміщення СТ з двома вісями обертання:

- на несучому стовпі: tip-tilt dual axis tracker (TTDAT);
- на опорній площині: azimuth altitude dual axis tracker (AADAT).

TTDAT здійснюють вертикальне обертання панелей навколо верхнього полюса за рахунок обертового підшипника. Як правило, вісі TTDAT вирівнюються за лінією широти схід-захід або за північним меридіаном.

AADAT відрізняються іншим способом повороту масиву. Ця система використовує велике кільце, що встановлене на платформі або на землі і обертається за допомогою підшипників. Така конструкція дозволяє обертати більшу кількість СП, але накладаються обмеження по щільності розміщення таких систем.

Сонячні трекери можуть бути відносно доступними з точки зору вартості. Це може давати добрий результат у поєднанні з високоефективними сонячними панелями. Вибір між одноосьовими та двоосьовими трекерами залежить від конкретних умов експлуатації. Загалом, двоосьові трекери виявляються більш точними, коли батареї повернуті прямо до Сонця. Однак вони є витратнішими та можуть втрачати свою надійність швидше, ніж одноосьові трекери. Одноосьові трекери пропонують більш доступну ціну та вищу надійність, тому що є менше факторів, які можуть вплинути на їх ефективність протягом тривалого періоду експлуатації, розрахованого на 20 років і більше.

На рисунку 1.6 наведено різницю в виробленні електроенергії при застосуванні різних систем кріплення ФЕМ для однакової встановленої потужності сонячної станції [4].

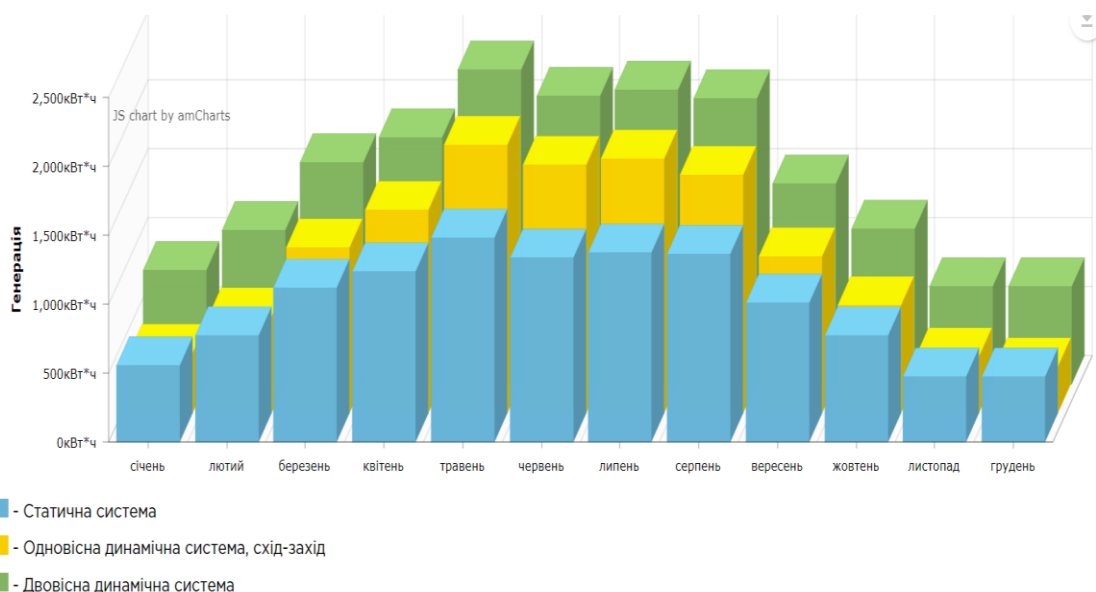


Рисунок 1.6 – Генерація електроенергії різними типами систем при однаковій встановленій потужності СЕС.

Порівняння трьох систем (статичні, одновісні та двовісні треки) дозволяє зробити висновок, що СП встановлені на двовісних треках генерують більший об'єм електроенергії. Але на цій діаграмі не враховуються витрати на встановлення самих трекерів.

Вибір типу трекеру повинен бути обґрунтований у кожному конкретному випадку. При цьому потрібно враховувати загальні рекомендації по доцільності встановлення двоосового трекеру:

- переважно сонячні регіони при високому «індексі прозорості неба» (0,8 і більше);
- значна зміна інтенсивності світла протягом дня;
- важливість збільшення виробництва енергії на 20-45%;
- застосування для комерційних масштабів;
- комплексні системи виробництва енергії;

Обираючи двоосовий трекер, важливо враховувати конкретні умови і вимоги проекту, такі як бюджет, географічне розташування та очікувана продуктивність.

1.2.2. Огляд функціонуючих енергоустановок сонячних трекерів

В наш час багато українських та зарубіжних фірм займаються розробкою та постачанням сонячних трекерів. На ринку України представлений широкий вибір СТ для промислових та побутових цілей. Серед цікавих розробок українських фірм потрібно відзначити трекери фірми ТОВ «УКРАЇНСЬКІ СИСТЕМИ СОЛАР» [3], у виконанні динамічних систем кріплення присутні як одновісні, так і двовісні трекери. Основні моделі двовісних трекерів: AS - 20; AS – 40; AS – 46; AS – 80. Вони дозволяють розмістити сонячні панелі на площі до 131 м² з потужністю до 21,6 кВт. Одновісний трекер представлений моделлю «Схід-Захід», яка дозволяє збирати 8 секцій по 60 модулів і сформувати кластер з 480 ФЕМ, які мають загальну встановлену потужністю 140 кВт, з площею ділянки 0,15 га. Загальний вигляд двовісного та одновісного трекерів представлено на рисунку 1.7.а) –б).

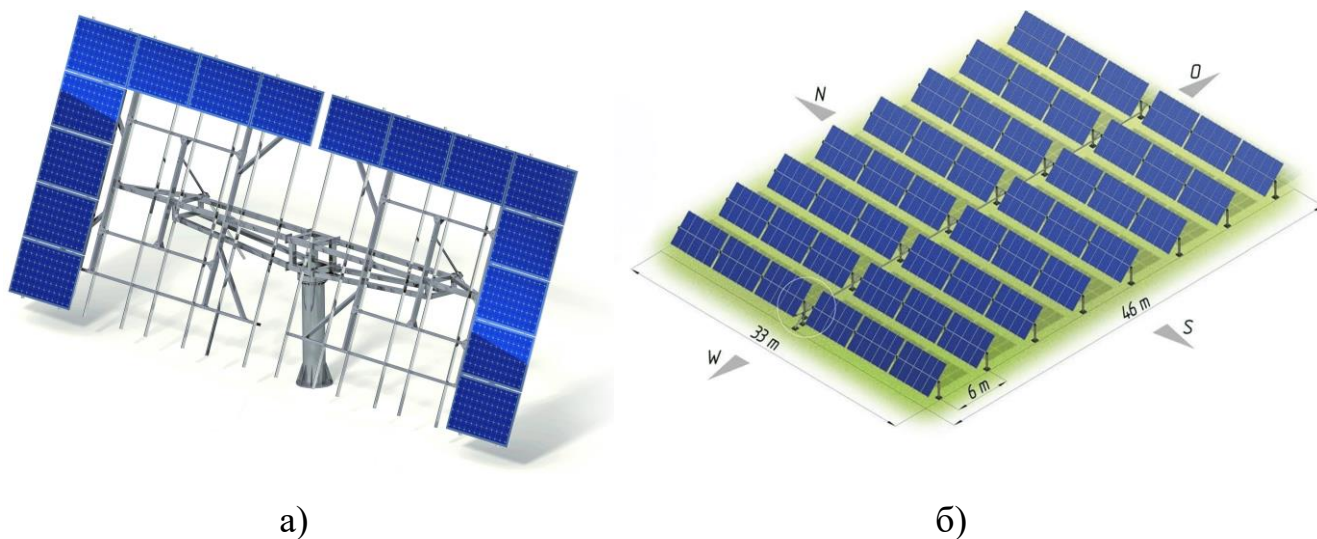


Рисунок 1.7 - Загальний вигляд двовісного а) та одновісного б) трекерів

Українська компанія SETech («Спеціалізовані енергетичні технології») [2] виробляє одновісні трекери, компанія GreenChip [3] поставляє СТ марок: ST-20; ST-600; ST-1000; ST-1500; ST-2000.

Серед зарубіжних фірм відзначимо декілька провідних: Konza Portable Solar Trackers (США) [3]; Titan tracker (Іспанія) [3]; Sunpowert tracker (США) [3]; Hanning (Німеччина) [3]; TRAXLE (Чехія) [3]; Eco- \$ mart, Inc (США); Canadian Solar (Канада); Yingli Green Energy (Китай) та інші.

На рисунку 1.8 наведено зображення енергетичної установки фірми Titan tracker. В цій установці може використовуватися значна кількість СП, площею до 216 м². Тип трекеру - двовісний.



Рисунок 1.8 – Зображення енергетичної установки Titan tracker

На рисунку 1.9 наведено зображення трекерів фірми Konza Portable Solar Trackers. Особливістю цього трекеру є універсальний, дуже потужний карданний шарнір, який не потребує змащення та здатен витримувати не тільки вагу сонячних панелей, але і вітрове навантаження. Встановлено три лінійні герметичні приводи промислового класу, використовується плаваюче нижнє кріплення приводу.



Рисунок 1.9 – Зображення трекерів фірми Konza Portable Solar Trackers.

На рисунку 1.10 показано зображення СТ фірми sunpowert tracker. Встановлення ФЕМ може виконуватися під кутом нахилу чи горизонтально. Тип трекару - одноосьовий. На горизонтальній вісі розміщується 12 або 9 модулів, які складаються з 96 чи 128 осередків.



Рисунок 1.10 – Зображення СТ фірми SUNPOWER TRACKER.

Зображення СТ фірми Eco- \$ mart, Inc приведено на рис.1.11. СТ виконуються в одно- та двокоординатній системі стеження установок за Сонцем.



a



б

Рисунок 1.11 - Сонячні енергетичні установки фірми Eco- \$ mart, Inc.

Зображення СТ фірми Merlin Power Systems показано на рис.1.12. Ці трекари відрізняються підставою у вигляді триноги, яка має регульовану висоту і це допомагає встановлювати її на нерівній місцевості. Можливе виконання паралельного чи послідовного підключення енергетичних установок.

Установки задовольняють вимогам мобільності та швидкої збірки, тому можуть застосовуватися у разі надзвичайних ситуацій або для військової техніки.



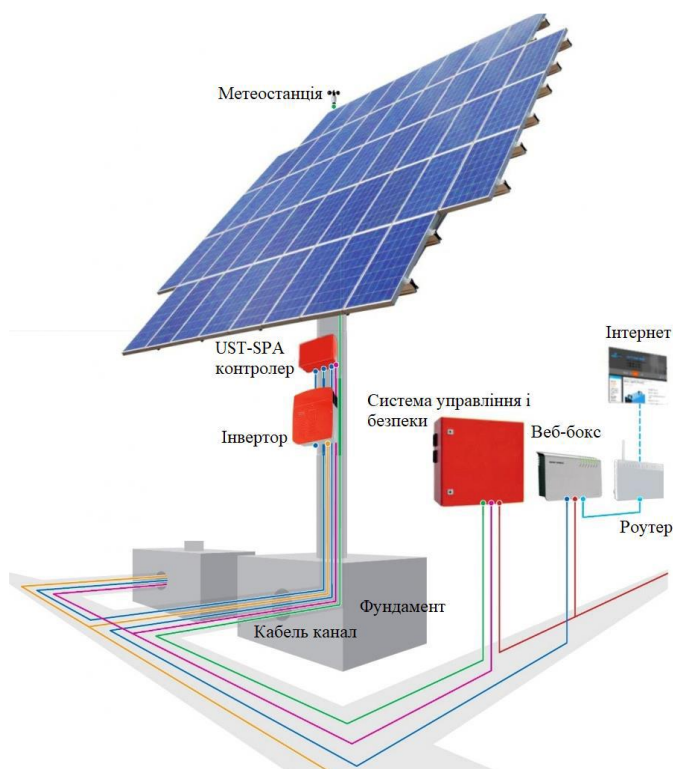
Рисунок 1.12 - Зображення СТ фірми Merlin Power Systems

1.3 Комплектація сонячного трекера

Типову будову сонячної електростанції з використанням трекера наведено на рисунку 1.13 а).

Розглянемо найбільш повну комплектацій сонячного трекеру. Основними конструктивними елементами являються:

- фундамент (нерухома, несуча частина) та рухома частина, на якій обертається платформа;
- допоміжні підсистеми, до яких відносяться метеостанція, блок управління, безпеки, , грозозахист, стабілізатори;
- електромеханічні поворотні пристрої (актуатори) (рис. 1.13 б));



а)



б)

Рисунок 1.13 – Сонячний трекер: а) склад сонячного трекера у повній комплектації; б) розміщення актуаторів у складі трекеру.

- контролер, який призначено для налаштування і обслуговування енергосистеми;
- роутер, з підключенням до мережі інтернет для можливості віддаленого доступу до системи, моніторингу системи та відправки даних;
- інвертор, за допомогою якого постійна напруга перетворюється в змінну;
- система навігації, що необхідна для визначення географічних координат СП. При відсутності цієї системи, дані про довготу, широту та висоту над рівнем моря можуть задаватися вручну.

Вибір комплектації трекера залежить, насамперед, від його призначення та виду, і не завжди економічно доцільна повна комплектація. Потрібно проводити додаткове техніко-економічне обґрунтування.

Дуже важливо враховувати вплив на конструкцію трекера вітрових та снігових навантажень. Конструкція трекера повинна бути міцною та стійкою, щоб витримувати сильні вітри при збільшенні парусності, на яку впливає збільшення СП на платформі. Обов'язково потрібно вчасно передбачити очищення снігового покриву, це дозволить збільшити ефективність установки.

Приводи механізмів системи стеження виконуються на основі електродвигунів, на які здійснює вплив система управління. Сонячні трекери являються автономними установками, так як система управління і електродвигуни отримують живлення від самих СБ.

Розглянемо більш детально варіанти виконання актуаторів. Актуатор представляє собою універсальний виконавчий пристрій, який може бути обладнаний електромотором або працювати без нього, і його функції контролюються за допомогою пристрою управління.

Актуатори можуть бути реалізовані на базі двигунів постійного струму (рис. 1.10, а), асинхронних двигунів (рис.1.14, б), крокових двигунів і т.д.



Рисунок 1.14 – Актуатори для трекерів: а) на базі двигуна постійного струму; б) на базі асинхронного двигуна; в) мотор-редуктор

Також існують лінійні електричні актуатори, які мають можливість блокувати передавальний вал. У сучасних моделях актуаторів використовується

конструкція з більшою кількістю зубців на шестернях, що забезпечує вищу міцність приводу, плавніший хід та точність роботи.

Проведений аналіз існуючих технічних характеристик показав, що в сучасних сонячних трекерах застосовують різноманітні сучасні електромеханічні виконавчі механізми, які базуються на двигунах постійного та змінного струму, можуть використовуватися крокові двигуни, лінійні двигуни та ін. З метою отримання якісних динамічних та статичних характеристик використовуються багатоконтурні системи керування, в яких є регулятори струму, швидкості та положення. Висока точність стеження за положенням Сонця досягається завдяки багаторозрядним датчикам положення, високоточним датчикам положення Сонця.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ТРЕКЕРАМИ

2.1 Основні залежності для визначення кутів розміщення СП

Для проведення подальших досліджень потрібно проаналізувати, як саме впливає положення Сонця на вироблення електричної енергії сонячними панелями. Важливо розуміти, наскільки кут під яким сонячні промені потрапляють на панель буде визначати її продуктивність. На графіку, що зображено на рис.2.1, продемонстровано, як саме впливає зміна кута падіння сонячних променів на вироблення електроенергії сонячними панелями.

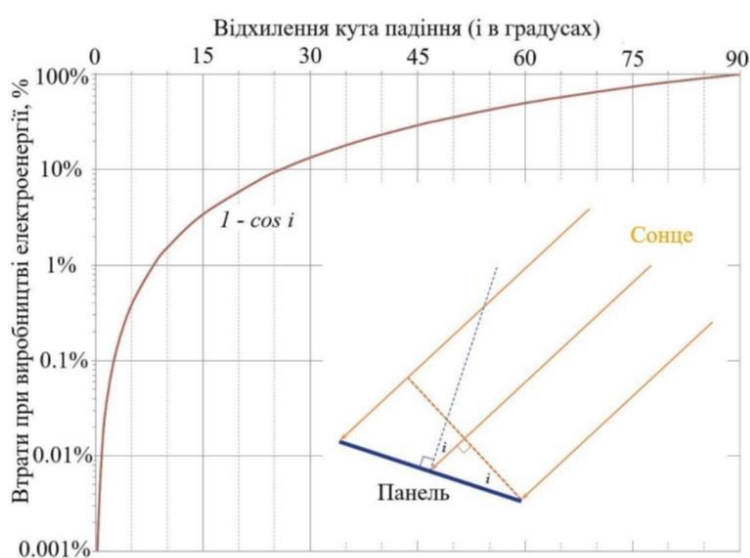
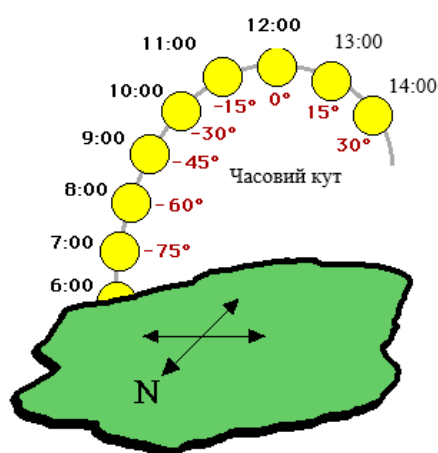


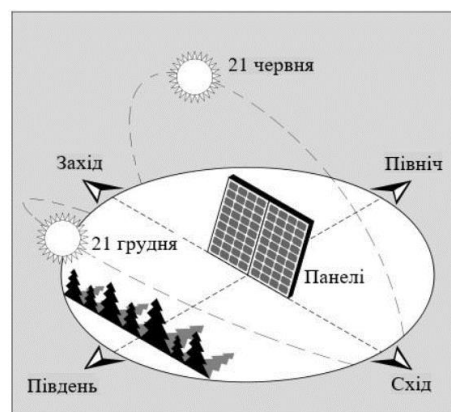
Рисунок 2.1 – Вплив зміни кута падіння сонячних променів на кількість виробленої електроенергії сонячними панелями

Аналіз наведеного графіка демонструє, що якщо кут відхилення не перевищує 10° , то втрати виробленої СП електроенергії знаходяться на рівні 2%. Це означає, що буде використано 98 % енергії від прямих променів і 100% від розсіяного світла.

Розглянемо основні співвідношення кутів. Сонце здійснює щоденне переміщення зі сходу на захід та сезонне переміщення у напрямі південь-північ (приблизно 46° на рік). Це переміщення продемонстровано на рис 2.2 а), б).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Зміна положення Сонця протягом: а) доби; б) року.

Розташування сонячної панелі по відношенню до Сонця визначає кут нахилу α та кут азимута γ (рис. 2.3). Вектори $\vec{S}$ та $\vec{E}$ визначають напрямки на південь та схід відповідно. Вектор $\vec{n}$ являється нормаллю до площини СП. Вектор $\vec{Z}$ - zenітний вектор, що розташований перпендикулярно до площини SE.

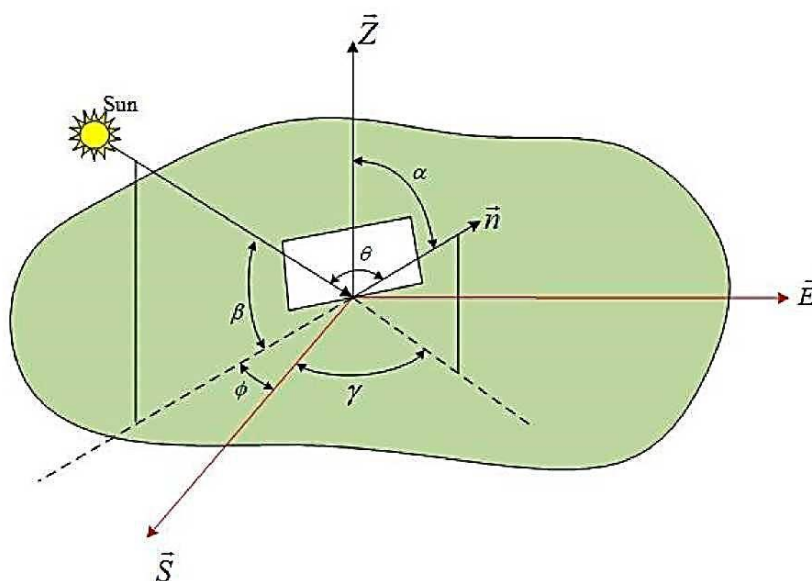


Рисунок 2.3 – Основні кути для визначення орієнтації сонячної панелі.

Значення кута висоти Сонця β визначається по формулі:

$$\sin \beta = \cos l \cdot \cos h \cdot \cos \delta + \sin l \cdot \sin \delta, \quad (2.1)$$

де l – координати ширини місцевості;

$h = (\text{сонячний час} - 12) \times 15^\circ$ – часовий кут або кут нахилу Сонця;

$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin[2\pi(n + 284)/365]$;

n – номер доби.

Для визначення сонячного часу ($СЧ$) потрібно знати місцевий стандартний час ($СТЧ$), місцеву довготу L_{loc} і стандартну довготу часового поясу L_{st} . Тоді:

$$СЧ = СТЧ + \frac{4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + EOT}{60}.$$

Час EOT визначається за формулою:

$$EOT = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B),$$

де $B = 2\pi(N - 81)/365$.

Азимутальні кути (сонячний φ та панелі γ), потрібно вимірювати відносно напрямку на південь, таким чином, вони визначаються як додатні для західної сторони, та як від'ємні для східної сторони. Для панелей, що орієнтові на південь вони являються нульовими.

Кут сонячного азимута φ визначається по формулі:

$$\varphi = -1^s \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\sin \beta \cdot \sin l - \sin \delta}{\cos \beta \cdot \cos l} \right), \quad (2.2)$$

де $s=1$ - для сонячного ранку, коли $h < 0$;

$s=2$ - для сонячного дня, коли $h > 0$;

$s=0$ - для сонячного ранку, коли $h = 0$.

Кут θ між сонячним променем, який падає на панель, та нормаллю до панелі визначається рівнянням:

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos(\varphi - \gamma) \cdot \sin \alpha + \sin \beta \cdot \cos \alpha. \quad (3.4)$$

Для визначення електроенергії, яка генерується сонячною панеллю, необхідно знати значення променевого (DNI), дифузного (DHI) та відбитого від землі (GHI) випромінювання. Разом вони складають сумарну інсоляцію, яка поступає на поверхню СП:

$$I_T = DNI \cdot \cos \theta + DHI \cdot \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) + GHI \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right), \quad (2.3)$$

де ρ_g – альбедо земної поверхні,

α - кут нахилу СП.

У випадку, якщо кут $\theta > 90^\circ$, пряме сонячне випромінювання не надходить на панель, тоді перший доданок рівняння (3.6) не враховується. Кількість сонячного випромінювання під кутом θ , що поглинається ФЕМ розраховується за формулою:

$$K_{\tau\alpha\theta} = \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2 \theta_r - \theta}{\sin^2 \theta_r + \theta} + \frac{\tan^2 \theta_r - \theta}{\tan^2 \theta_r + \theta} \right) \right], \quad (2.4)$$

де θ_r – значення кута відбивання:

$$\sin \theta_r = \sin \theta / n,$$

де n – значення показника заломлення.

Для оцінювання сонячної радіації, яка поглинається та пропускається ФЕМ використовується наступний вираз:

$$l_{T,pv} = DNI \cdot \cos \theta \cdot K_{\tau\alpha} \cdot \theta_b + DHI \cdot \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \cdot K_{\tau\alpha} \cdot \theta_{e,d} + GHI \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) \cdot K_{\tau\alpha} \cdot \theta_{e,g}, \quad (2.5)$$

де $\theta_{e,d}$ – значення ефективного дифузного кута падіння;

$\theta_{e,g}$ – значення ефективного відбитого від землі кута падіння.

При сонячному випромінюванні, яке розсіюється та відбивається від землі, промені попадають на сонячну панель із різних напрямків. Таким чином, для цих двох термінів не існує єдиного кута. Брандемуель та Бекман [29] розробили кореляції для ефективних кутів падіння дифузного та відбитого від землі сонячного випромінювання на нахилених поверхнях, які представлені у наступних формулах:

- для дифузної інсоляції:

$$\theta_{e,d} = 59,7 - 0,1388 \cdot a + 0,001497 \cdot a^2;$$

- для відбитої від землі інсоляції:

$$\theta_{e,g} = 90 - 0,5788 \cdot a + 0,002693 \cdot a^2.$$

При значенні $\theta_b > 90^\circ$ вираз (2.5) трансформується у вираз (2.6):

$$l_{T,pv} = DHI \cdot \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \cdot K_{\tau\alpha} \cdot \theta_{e,d} + GHI \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) \cdot K_{\tau\alpha} \cdot \theta_{e,g}. \quad (2.6)$$

Значення $K_{\tau\alpha}$ у розрахунках, як правило приймається близько 0,95, величина ефективного кута $\theta_{e,d}$, знаходиться у межах (55-60) °.

Ефективність ФЕМ значно залежить від умов навколишнього середовища, а саме від температури та швидкості вітру. Врахувати цей вплив можливо за наступним виразом [30,31]:

$$\eta = \eta_{ref} \cdot \left\{ 1 - \beta_{ref} \cdot \left[T_{\alpha} - T_{ref} + \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8 \cdot V_{\omega}} \right) \cdot T_{NOCT} - T_{\alpha} \cdot \frac{I_t}{I_{t,NOCT}} \right] \right\}, \quad (2.7)$$

де η – значення вихідної ефективності ФЕМ;

η_{ref} – значення еталонної ефективності, яку вказує виробник;

T_{α} – значення температури навколишнього середовища;

β_{ref} – значення температурного коефіцієнту ФЕМ (приймається $0,0045 \text{ K}^{-1}$);

T_{ref} – значення еталонної температури ФЕМ (приймається $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

V_{ω} – значення швидкості вітру вибраного регіону, м/с.

Значення номінальних параметрів приймаються: $I_{t,NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$;
 $T_{NOCT} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та

2.2 Базові системи та алгоритми керування положенням трекерів

Завданням сонячного трекеру являється досягнення максимальної ефективності СБ. Для вирішення цього завдання СТ повинен орієнтувати панелі таким чином, щоб їх кут нахилу був оптимальним. Тобто потрібно виконувати орієнтацію рухомої частини трекера. Зробити це можна за допомогою ручного приводу чи використати актуатор, електромеханічний пристрій, побудований на основі двигуна.

Головними складовими системи стеження являються:

- датчики;
- пристрій стеження;
- блок керування;
- алгоритм стеження;
- система позиціонування;
- приводний механізм.

Призначення датчиків – вимірювати параметри навколишнього середовища. Це може бути інтенсивність світла або кут нахилу трекера.

Алгоритм визначення положення визначає кути, які використовуються для визначення місцезнаходження сонячного трекера. Існують два основних типи алгоритмів: астрономічні, які ґрунтуються на математичних розрахунках, заснованих на астрономічних даних, та алгоритми інтенсивності світла в реальному часі, які ґрунтуються на вимірюванні інтенсивності світла у реальному часі.

Блок керування, враховуючи алгоритм керування, формує сигнали для системи позиціонування та приводного механізму. Електрична або гідравлічна система позиціонування керує пристроєм стеження, який, в свою чергу, виконує орієнтацію панелі на Сонце з врахуванням обчислених кутів. Орієнтацію панелі на Сонце здійснює приводний механізм.

Розрізняють три види систем керування трекерами:

- активна;
- пасивна;
- комбінована.

Активна система керування трекером - це система, яка використовує зворотний зв'язок та активні компоненти для постійного вдосконалення точності та ефективності трекера. Основними характеристиками активної системи керування є використання сенсорів та алгоритмів зворотного зв'язку для постійного коригування положення трекера.

Основні компоненти активної системи керування трекером включають: сенсори, алгоритми обробки даних, зворотній зв'язок, актуатори. Система використовує різноманітні сенсори, такі як оптичні чи інфрачервоні сенсори, щоб вимірювати точне положення Сонця. За допомогою отриманих від сенсорів даних система використовує алгоритми для обчислення відхилення від бажаного положення та визначення необхідних корекцій. Активна система включає актуатори (наприклад, електромеханічні приводи), які відповідають за рух трекера відповідно до коригувань, які необхідно внести для точного спрямування на Сонце.

Пасивні системи керування трекерами використовують природні фізичні властивості матеріалів або конструкцій для автоматичного регулювання положення трекера без використання активних компонентів чи електроніки. Такі системи менш складні та енергоефективні, оскільки вони не потребують постійного живлення.

Деякі пасивні системи використовують термальні та гравітаційні ефекти, оптичні методи та біомімікрію. Наприклад, використовується теплове розширення матеріалів для виклику руху, тобто, матеріали з пам'яттю форми можуть змінювати свою форму відповідно до температурних змін. Використовується зміна ваги або центру маси для автоматичного налаштування положення трекера відповідно до зміни кута схилу Сонця. Можливо задіяти використання оптичних лінз або дзеркал для концентрації світла на фотоелементі. Зміна форми або положення оптичних елементів може забезпечувати рух трекера.

Пасивні системи являються менш витратними у виробництві та обслуговуванні, але вони можуть мати обмежену точність у порівнянні з активними системами, особливо в умовах змінного довкілля.

Пасивні системи керування трекерами виконують орієнтацію панелей за допомогою сонячного календаря і порівняно зі статичною системою мають певний ефект.

З метою підвищення надійності СТ використовуються комбіновані системи керування. У нормальному режимі функціонування система використовує активний алгоритм керування. При виникненні проблем з датчиком сонячної іррадіації, цей комплекс переходить до пасивного режиму. При збільшенні сили вітру поза певними параметрами система автоматично позиціонує фотоелектричний модуль у положення флюгування (мінімальний опір повітря).

Зміна кута орієнтації панелей на Сонце може відбуватися і без механізації, вручну. Зазвичай ці кріплення орієнтовані вздовж осі паралелі (північ - південь) і спроектовані для адаптації кута орієнтації панелей відповідно до висоти сонця

над горизонтом. Планується виконувати зміну кута мінімум 2 рази (зима / літо) до 3-4 разів (зима / весна-осінь / літо) щорічно, тобто зміна положення панелей пов'язана із зміною сезонів. Теоретично, такий підхід життєздатний, оскільки така система за розрахунками має забезпечувати 4-5 % приросту до щорічної генерації сонячної станції.

Розглянемо варіант управління трекерами на базі декількох фотоприймачів. Зображення трекера з фотоелементами представлено на рис.2.4.



Рисунок 2.4 – Зображення трекера з фотодетектором.

Функціонування актуаторів ґрунтується на вимірюваннях кількох фотоприймачів, при цьому пристрій обладнаний двома або більшою кількістю фотодіодів. Під час переміщення Сонця показники освітленості фотодіодів змінюються. Тоді, електроніка пристрою аналізує освітленість і подає сигнал для переорієнтації актуаторів до тих пір, поки освітленість на всіх фотоелементах не вирівняється. Отримавши сигнал переорієнтації, актуатор змінює положення сонячних панелей.

Такі рішення мають переваги у простоті розробки принципової схеми та в економічності. Однак, водночас, вони мають недоліки: у разі хмарної погоди та забруднення поверхні фотодатчиків система функціонує менш ефективно.

Керування орієнтацією трекера за допомогою азимутального та зенітного кутів - це метод, який використовує два ключових параметри для точного спрямування сонячного трекера на Сонце. Азимутальний кут визначає

горизонтальний поворот трекара, вказуючи на позначення Сонця вздовж горизонтального плоского кола, водночас зенітний кут визначає вертикальний нахил трекара, показуючи на відстань Сонця від вершини небесної сфери.

Цей пристрій оснащений вбудованим таймером. Актуатори функціонують у відповідності до добової програми таймера (і за потреби - річної програми). Важливо відзначити, що точність орієнтації трекара при використанні такого типу пристроїв обмежена, оскільки Сонце періодично змінює своє положення впродовж року, впливаючи на місце заходу, зенітний кут і час заходу.

Керування актуаторами може здійснюватися за допомогою програми, яка розраховує положення Сонця в певні моменти часу. В цьому випадку потрібно використання вбудованого годинника, програма обробляє дані про Зенітний кут і Азимут, передаючи їх на блок керування. При цьому, важливо враховувати географічне положення трекара, включаючи його широту, довготу та висоту над рівнем моря. Після отримання цих даних виконується розрахунок нових координат для орієнтації сонячної панелі в напрямку Сонця. Цей метод вважається найефективнішим.

2.3 Аналіз існуючих систем керування

Для ефективної роботи сонячного трекара система керування спостерігає за положенням Сонця з певною точністю, коректно відпрацьовує при похмурому небі та вертає трекар наприкінці дня у вихідне положення.

Розглянемо систему, у якій встановлені датчики освітлення, що допомагають визначити оптимальний кут нахилу панелі по відношенню до Сонця [24]. Схему такої системи управління зображено на рис. 2.5.

В цій схемі для переміщення СП застосовується двигун постійного струму, який кріпиться на панелі та з'єднується з шестернями. Переміщення здійснюється відповідно до показань датчиків.

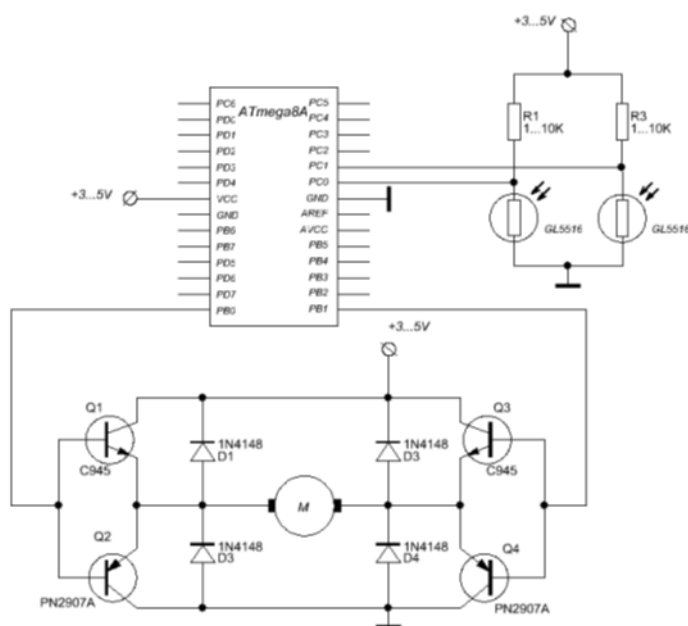


Рисунок 2.5 – Системи керування трекером з мікроконтролером Atmega8A і фоторезисторами.

Для визначення кута повороту по одній вісі використовують два світлочутливих датчика - фоторезистори. Розташовані чутливі елементи таким чином, що при оптимальному розташуванні відносно Сонця, показання датчиків є однаковими. У випадку неідеальної орієнтації осі пристрою відносно Сонця виникає ситуація, коли один з датчиків отримує менше світла. Саме різниця в показаннях датчиків визначає напрямок, у якому повинна обертатися система двигунів. За управління системою відповідає Arduino - платформа для розробки електронних пристроїв з відкритим кодом, в основному ґрунтуючись на простому у використанні апаратному та програмному забезпеченні [25].

Для корекції положення сонячних панелей по двом осях потрібно створити два незалежні канали з чотирма сенсорами.

Така схема керування кутом нахилу сонячних панелей здатна підвищити ефективність вироблення електроенергії в діапазоні (35-60) % . На цей показник впливає місце розміщення ФЕМ та інші параметри. До переваг цієї схеми слід віднести те, що вона не критична до налаштувань та точних номіналів резисторів, але її недоліком є те, що фоторезистори мають низьку чутливість та

незавадостійкість, крім того потрібне ретельне налаштування програмного забезпечення.

Розглянемо схему управління, яка використовує фотодатчики та операційні підсилювачі [26]. Для підключення двигунів використовується схема Н-моста, що дає змогу здійснювати комутацію струму 500 мА з напругою живлення 6-14 В (рис.2.6). Пристрій працюватиме навіть у темряві та забезпечує поворот у бік найяскравішого джерела світла.

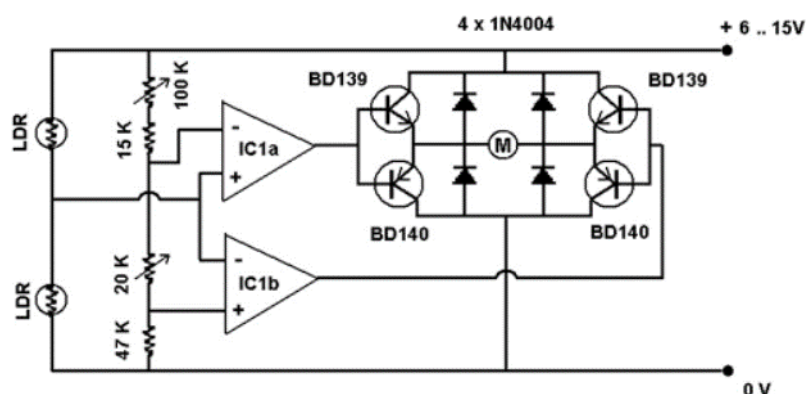


Рисунок 2.6 – Система керування трекером по схемі Н-моста.

Робота схеми базується на порівнянні показань двох датчиків LDR. Схема працює в режимі реального часу і якщо показники датчиків однакові, активації виходів операційного підсилювача не відбувається. Але якщо положення Сонця змінюється показники датчиків починають відрізнятися. Це призводить до зміни балансу на вході операційного підсилювача і до активації схеми керування двигунами. Двигуни виконують переміщення трекера у необхідному напрямку.

При вирівнюванні показань датчиків, проходить дезактивація операційних підсилювачів і переміщення зупиняється.

Напрямок руху двигуна (вперед чи назад) визначається транзисторами, що працюють у парі, за діагоналлю і виконують комутацію - V_e чи $+V_e$ до мотору. При зупинці двигуна, він продовжує обертатися через наявний обертальний момент, що призводить до генерації енергії, спрямованої на транзистори. Це може призвести до пошкодження транзисторів, тому для їх захисту в схемі моста

використовуються 4 діода. Ця конструкція сприяє збільшенню вироблення електричної енергії СБ на 25-30%, при низькому споживанні самої системи. Проте вона некоректно функціонує в умовах хмарної погоди. Крім того, ще одним недоліком є обмеженість позиціонування трекера тільки по одній осі.

Розглянемо роботу ще однієї схеми керування трекером, в якій використовується мікроконтролер PIC [27]. Схему зображено на рис.2.7.

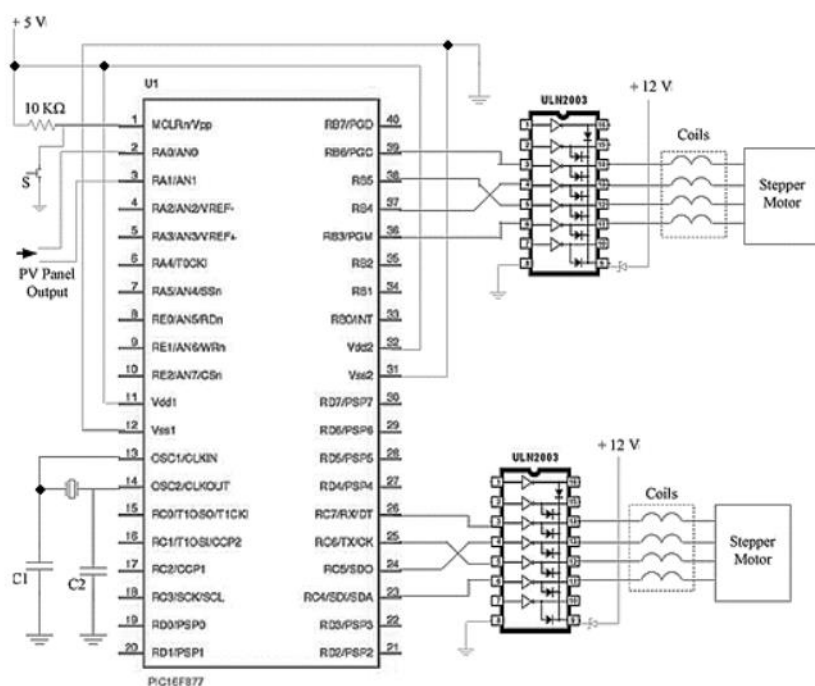


Рисунок 2.7 – Схема керування трекером з мікроконтролером PIC.

Система керування не використовує чутливі датчики і керується мікроконтролером. Сонячна панель підключена до аналогових входів мікроконтролера. Позицію, до якої треба встановити трекер, визначає максимальна напруга на панелі. У схемі використовуються крокові двигуни. Це дозволяє контролеру обертати двигуни на конкретну кількість кроків через певні проміжки часу. Це економічне рішення з мінімальною кількістю компонентів, що сприятиме надійності системи. Однак точність позиціонування є досить невеликою через коливання напруги на сонячних елементах.

Розглянемо ще одну схему з використанням мікроконтролера [28], яка відрізняється застосуванням годинника реального часу. В схемі є драйвер

крокових двигунів та сам кроковий двигун, який використовується для повороту СП. Цю схему наведено на рис. 2.8.

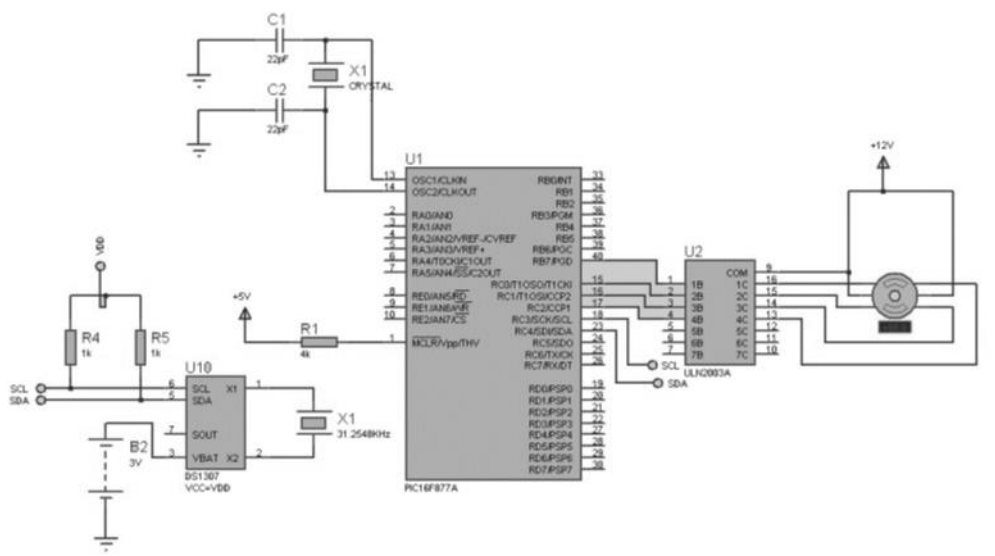


Рисунок 2.8 – Схема керування трекером з мікроконтролером PIC та годинником реального часу.

Робочий принцип цієї схеми вкрай простий. Враховуючи, що Сонце змінює своє положення на 15° за годину, контролер програмує двигун виконувати поворот на $1,5^\circ$ через 6 хвилин - це значення визначено фіксованою кількістю кроків крокового двигуна. У кінці дня програма також розвертає трекер з СП у вихідне положення.

3 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРУ

3.1 Конструктивне виконання установки

Розглянемо конструкцію сонячного трекеру, яка складається з нерухомого підставу, двох стійок, рухомої основи та рами, з закріпленими на ній 16 сонячними панелями. Рама рухається за допомогою електромеханічної системою стеження за оптимальним кутом.

Основні деталі конструкції:

- рама з СБ типу LR5-54НІН-410М;
- нерухомий каркас;
- рухомий каркас;
- сервопривод разом з сервоперетворювачем;
- блок редуктору, що включає черв'ячну передачу;
- програмований логічний контролер (ПЛК);
- датчик, що визначає положення Сонця;
- кінцеві вимикачі.

Елементами поглинання сонячної енергії виступають 16 сонячних панелей бренду Longi Solar, тип панелі LR5-54НІН-410М [5], як найбільш економічно обґрунтовані. Загальний вигляд панелі наведено на рис 3.1.



Рисунок 3.1 - Загальний вигляд панелі LONGi LR5-54НІН-410М.

Панель LONGi LR5-54НІН-410М являється високоякісним монокристалічним сонячним фотомодулем з вихідною потужністю 410 Вт. Має у своєму складі кремнієву пластину стандарту МІО, що забезпечує гарні показники генерації. У цієї моделі ККД складає – 21,3 %.

Характеристики сонячної панелі LR5-54НІН-410М наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Характеристики сонячної панелі LR5-54НІН-410М

№	Параметр	Одиниця виміру	Значення
1	Тип моделі	-	LR5-54НІН-410М
2	Бренд, виробник	-	Longi Solar, Китай
3	Технологія виробництва	half-cell	Монокристалічний
4	Потужність	Вт	410
5	Напруга неробочого ходу	В	37,25
6	Напруга при максимальній потужності	В	31,25
7	Струм короткого замикання	А	13,88
8	Струм при максимальній потужності	А	13,12
9	ККД	%	21,3
10	Ступінь захисту	IP68	-
11	Робоча температура	°С:	-40 до +85
12	Матеріал рами		Алюміній
13	Вага	кг	20,8
14	Розмір панелі: Д*Ш*Т	мм	1722x1134x30
15	Прогнозований термін служби	-	понад 25 років

LONGi LR5-54НІН-410М, потужністю 410 Вт, ідеально підходить для створення СЕС приватного чи комерційного призначення. Вихідний струм 13,12 А надає можливість працювати з широкою номенклатурою сонячних інверторів. Зберігається висока продуктивність виробництва енергії при різних погодних умовах на відкритому повітрі, включаючи інтенсивні опади, град та вітер. Це дозволяє надійно та довговічно використовувати їх для різних кліматичних зон. Висока якість фотомодуля гарантує довгострокову надійність. Модуль має кращу генерацію при недостатньому освітленні та низький тепловий коефіцієнт.

Деградація панелі за перший рік експлуатації становить не більше 2%, починаючи з другого року - не перевищує 0,55%.

Виготовлення корпусу панелі з алюмінію дозволяє знизити вагу панелі та підвищити стійкість, панелі не піддаються корозії. Вони можуть бути встановлені на даху будівель або використовуватись у складі трекеру у польових умовах. Площа однієї сонячної панелі складає 1,95 м².

Відповідно до розмірів сонячних батарей вибираємо металоконструкцію. В Україні існує декілька великих компаній, котрі займаються виробництвом таких металоконструкцій. На даний момент одну із найкращих пропозицій за параметрами ціна-якість пропонує компанія «УКРАЇНСЬКІ СИСТЕМИ СОЛАР», яка має в своєму арсеналі цілу лінійку динамічних систем кріплення фотоелектричних модулів - це одновісні і двовісні трекери [19].

Загальний вигляд варіанту кріплення сонячних панелей для одновісного трекеру зображено на рис.3.2 а), для двохвісного трекера, відповідно, на рис. 3.2 б).



а)



б)

Рисунок 3.2 - Загальний вигляд конструкції сонячного трекеру: а) одновісного; б) двовісного.

В одновісному трекері "Схід-Захід" [19] одноопорна конструкція закріплена на бетонному фундаменті, прийнята вертикальна орієнтація ФЕМ. Конструкція дозволяє змінювати кут нахилу панелей у діапазоні $\pm 45^\circ$. Зміна кута нахилу відбувається за допомогою одного актуатора. Використовується алгоритм роботи системи стеження за астрономічним календарем та датчиком сонячної радіації.

У якості двоосного трекера вибрана модель AS – 20 [19], характеристики якої наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика системи двовісного трекера AS – 20.

№	Параметр	Одиниця виміру	Значення
1	Тип моделі	-	AS – 20
2	Бренд, виробник		ТОВ «Українські системи СОЛАР»
3	Номінальна встановлена потужність	кВт	5,40
4	Максимальна площа для розміщення модулів	м ²	32,70
5	Азимутальний кут обертання	°	$\pm 120^\circ$
6	Зенітний кут обертання	°	$0 - 70^\circ$
7	Висота колони (макс. / мін.)	м	4,28 / 2,18
8	Матеріали		алюміній, гарячеоцинкована сталь, нержавіюча сталь
9	Вага	кг	600
10	Поворотні пристрої, азимутальне/зенітне обертання		Опорно - поворотний пристрій в закритому корпусі / Актуатор
11	Приблизні показники щорічного власного споживання	кВт. год./рік	20

У магістерській роботі розглядається можливість кріплення сонячних панелей на одновісному та двовісному трекері. Для проведення моделювання

використовується одновісний трекер, розрахунки, що пов'язані з ефективністю роботи сонячних трекерів проводяться для двох варіантів.

Такий сонячний трекер підійде як для невеликого домогосподарства, так і може буде використаний у складі більш потужних СЕС.

3.2. Вибір елементів системи сонячного трекеру

Головною вимогою при виборі електродвигуна є забезпечення відповідності його потужності потребам технологічного процесу, на якому працює робоча машина. Вибір електродвигуна надто малої потужності може призвести до порушення нормального режиму роботи машини, пришвидшення зносу ізоляції та може спричинити вихід електродвигуна з ладу.

З іншого боку, використання електродвигуна з надмірною потужністю призведе до збільшення вартості системи приводу, підвищення споживання електроенергії через низький коефіцієнт корисної дії електродвигуна та, у випадку асинхронного двигуна, до зменшення коефіцієнта потужності.

Підбір потужності двигуна для сонячного трекера залежить від ряду факторів, таких як розміри сонячної панелі, вага і конструкція трекера, максимальний кут нахилу, швидкість переміщення, та інші параметри. Основні кроки, які допоможуть визначити потрібну потужність двигуна для сонячного трекера:

- розміри сонячної панелі: визначаємо площу та масу сонячної панелі, яку потрібно переміщати. Більші сонячні панелі зазвичай потребують потужніших двигунів для ефективного трекінгу;
- максимальний кут нахилу: визначаємо максимальний кут нахилу, на який повинен пересуватися сонячний трекер. Для трекерів, які просліджують Сонце від сходу до заходу, цей кут повинен бути від 0 до 180 градусів;
- швидкість переміщення: враховуємо швидкість переміщення, яку потрібно досягти за рахунок сонячного трекеру. Якщо потрібно рухатися дуже повільно, можливо обрати менш потужний двигун;

- вага та конструкція трекера: враховуємо вагу і конструкцію трекера. Для великих і важких трекерів потрібні більш потужні двигуни;
- втрати в системі: передбачаємо можливі втрати в системі, такі як тертя та інші опорні сили, які можуть впливати на необхідну потужність двигуна;
- робоча напруга та сила: вибираємо двигун, який працює при необхідній напрузі та генерує необхідну силу для переміщення сонячного трекера.

Важливо враховувати, що підібраний двигун повинен бути достатньо потужним, але не занадто потужним, щоб забезпечити оптимальну продуктивність і тривалість роботи сонячного трекера.

Для вибору двигуна розрахуємо необхідні характеристики.

Вага поворотної площини, що є рухомою частиною установки:

$$m_{\text{заг.}} = n \cdot m_1 + m_2 = 16 \cdot 20,8 + 42,27 = 375,07 \text{ кг},$$

де n – кількість сонячних панелей, шт;

m_1 - вага однієї сонячної батареї, кг;

m_2 - вага поворотної площини, кг.

Знаючи габарити металевої конструкції, розрахуємо її масу.

Вага металевої конструкції:

$$m_2 = L \cdot m_{\text{п.м.}} = (4 \cdot 2 \cdot (1,722 + 1,134)) \cdot 1,85 = 42,27 \text{ кг},$$

де L – загальна довжина металевого профілю, м;

$m_{\text{п.м.}}$ - вага погонного метра, кг/м.

Знаходимо статичний момент на валу конструкції:

$$M_c = m_{\text{заг.}} \cdot g \cdot R = 375,07 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 735,89 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $m_{\text{заг.}}$ – загальна вага рухомої частини установки, кг;

g – прискорення вільного падіння, що дорівнює $9,80665 \text{ м/с}^2$;

R - плече моменту поворотної частини, м.

Враховуємо момент, що обумовлений вітровим навантаженням:

$$M_{\text{вiтр.}} = \frac{1}{4} \cdot S \cdot V \cdot H = \frac{1}{4} \cdot 31,24 \cdot 4,4 \cdot 3 = 103,11 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де S – площа поворотної поверхні, м^2 ;

V – середньорічна швидкість вітру для Кіровоградської області (середня річна швидкість вітру становить 4,4 м/с. Середньомісячна швидкість вітру січня складає 5,2 м/с, а липня — 3,5 м/с.);

H – висота конструкції, м.

Сумарний момент на валу конструкції:

$$M_{\Sigma} = M_c + M_{\text{вiтр.}} = 735,89 + 103,11 = 838,99, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.1)$$

З проведених розрахунків отримується, що максимальний момент обертання вихідного валу електроприводу повинен бути не менше 838,99 Н · м.

Після виконання розрахунків ми визначаємо, які конкретні компоненти нам потрібні для реалізації технічного рішення. У цьому випадку, для здійснення механічного руху конструкції, необхідні наступні компоненти:

- сервопривід;
- синхронний трифазний серводвигун;
- програмований логічний контролер;
- планерний редуктор;
- черв'ячна передача.

Далі робота системи відбувається в такій послідовності: ПЛК Twido, враховуючи графік руху Сонця, відправляє сигнал на сервопривід Lexium 32. Lexium 32 генерує команду для руху на серводвигун. Важливо зауважити, що цей сервопривід може автоматично налаштовувати параметри регулятора, що забезпечує максимальну точність і швидкість регулювання. Оскільки серводвигун має велику номінальну швидкість і невеликий момент, нам потрібно

використовувати редуктор GBX, що збільшить момент і знизити швидкість обертання валу конструкції.

Потім ми використовуємо черв'ячну передачу, яка дозволяє змінювати напрям моменту, його величину, і водночас служить гальмом, оскільки черв'ячна передача дозволяє рухатися тільки в одному напрямку. Черв'ячна передача також зв'язана з валом конструкції і допомагає забезпечити стабільність руху.

Підбираючи параметри для компонентів системи, ми намагаємося знайти оптимальну комбінацію, яка дозволить використовувати серводвигун з меншою потужністю з лінійки Schneider Electric ВМН, при цьому враховуючи всі розрахункові параметри.

Після проведення розрахунків та вибору параметрів, було з'ясовано, що найкращим сумарним коефіцієнтом передачі є варіант 100:1. Цей сумарний коефіцієнт можна досягти за допомогою черв'ячної передачі з коефіцієнтом 60:1 та редуктора GBX 160 з коефіцієнтом 80:1.

При цьому, мінімальний час руху, враховуючи обрані параметри, становить 8 секунд. Це означає, що система зможе виконувати необхідний рух протягом цього часу, забезпечуючи при цьому високу ефективність та точність.

Визначаємо кутову швидкість повороту трекерної системи:

$$\omega_K = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{0,087266}{8} = 0,0109 \text{ рад/с}, \quad (3.1)$$

де $\Delta\varphi$ – кут повороту СП, рад. Виразимо значення цього кута у радіанах, поворот здійснюється на 5° :

$$\Delta\varphi = 5^\circ \cdot \pi/180 = 0,08726 \text{ рад};$$

Δt – тривалість роботи двигуна трекера, с.

Визначаємо потужність, приведену до валу конструкції:

$$P_K = M_\Sigma \cdot \omega_K = 838,99 \cdot 0,0109 = 9,15 \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

Потужність самого двигуна розраховуємо по формулі:

$$P_{\partial в} = \frac{\kappa_3 \cdot \sqrt{\frac{P_{\kappa}^2 \cdot t_p}{T_{\psi}}}}{\eta_{\psi} \cdot \eta_{ред}} = \frac{1,15 \cdot \sqrt{\frac{9,15 \cdot 8}{1800}}}{0,75 \cdot 0,965} = 0,746 \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

де κ_3 - коефіцієнт запасу, що враховує перехідні процеси в двигуні;

η_{ψ} – ККД черв'ячної передачі;

$\eta_{ред}$ - ККД редуктора;

t_p – тривалість робочого періоду, с;

T_{ψ} – тривалість циклу, с.

Необхідний статичний момент серводвигуна становить:

$$M_c = \frac{M_{\Sigma}}{i} = \frac{838,99}{140} = 5,99 \text{ Н·м}, \quad (3.1)$$

де i - сумарний коефіцієнт передачі черв'ячної передачі та редуктора.

Приймаємо двигун ВМН 100 2Т та сервоперетворювач Lexium 32 D18N4.

Вибір сервоперетворювача та серводвигуна з асортименту продукції Schneider Electric здійснено через те, що ця продукція відповідає вимогам переміщення сонячних панелей, таким як надійність, точність позиціювання, простота керування та налаштування. Крім того, вона відповідає міжнародним стандартам (EN 61800-5-1 і EN 61800-3), має сертифікати UL і CSA, відповідає вимогам Європейських директив щодо отримання маркування CE та щодо захисту навколишнього середовища.

Обраний двигун представляє собою трифазний синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ). Такий серводвигун має вмонтований датчик, що визначає положення ротора, здійснюється автоматична передача даних від серводвигуна до сервоперетворювача. Основні технічні характеристики ВМН 100 2Т представлено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики серводвигуна ВМН 100 2Т.

№	Характеристика	Розмірність	Позначення	Значення
1	Напруга живлення трифазна	В	U	380
2	Номинальна потужність	Вт	Pном	750
3	Номинальна кутова швидкість	об/хв	ω ,	2000
4	Номинальний момент	Н·м	Mном	6
5	Максимальний момент	Н·м	Mmax	10,3
6	Інерція ротора	кг·см ²	J _p	5,8
7	Ступінь захисту		IP65	

Обраний сервоперетворювач Lexium 32 D18N4 має дуже добрі технічні характеристики. Його застосування дозволяє отримати збільшений термін експлуатації вибраного технологічного обладнання, покращити технічне обслуговування. Даний сервоперетворювач має компактні габаритні розміри та потужне вбудоване програмне середовище. Сервоперетворювач обладнаний інтерфейсом, що дозволяє передачу сигналів керування з різних рівнів системи. Є можливість підключення до головних комунікаційних шин і мереж, з використанням різних комунікаційних карт. Головні технічні характеристики сервоперетворювача Lexium 32 D18N4 наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики сервоперетворювача Lexium 32 D18N4.

№	Характеристика	Розмірність	Позначення	Значення
1	Кількість фаз мережі	-	-	3
2	Номинальна напруга живлення	В	U	200-240; 380-480
3	Частота мережі	Гц	f	50/60
4	Електромагнітний фільтр			вбудований
5	Максимальний струм у сталому режимі	А	I	24
6	Кількість дискретних входів	-	-	2
7	Кількість дискретних виходів	-	-	3

Зображення серводвигуна та сервоперетворювача представлено на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд серводвигуна та сервоперетворювача.

У якості редуктора вибираємо планерний редуктор фірми Neugart GBX 160, з коефіцієнтом 80:1(рис.3.4). Ці редуктори прості та надійні в експлуатації, добре підходять до попередньо вибраного сервоприводу, не потребують змащування протягом терміну служби.



Рисунок 3.4 - Зображення планетарного редуктора GBX 160.

У якості програмованого логічного контролеру обрано ПЛК Zelio компанії «Schneider Electric». Зовнішній вигляд ПЛК представлено на рис.3.5.



Рисунок 3.5 –Зовнішній вигляд ПЛК Zelio.

ПЛК формує завдання на сервоперетворювач. Для цього в ПЛК вводиться база даних про зміну кута Сонця. В перший блок TIME PROG вводяться дані першої половини світлового дня, у другий блок – дані про зміну кута Сонця після проходження точки зеніту. На перший вхід поступає сигнал на переміщення, значення якого реалізуються у сервоперетворювачі. На другий вхід поступає сигнал, який визначає напрям руху. Для першої половини світлового дня буде здійснюватися позитивний напрям, на вході – логічний нуль. Після проходження зеніту на вхід буде подана логічна одиниця, що зумовлює зміну напрямку руху.

Вибрані вище елементи, що забезпечують роботу трекерної системи можна представити у вигляді структурної схеми, яку зображено на рис. 3.6.

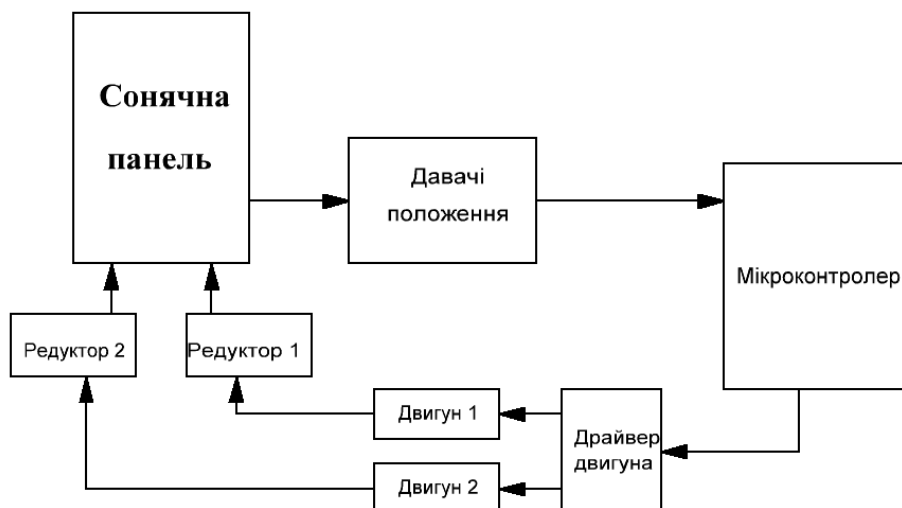


Рисунок 3.6 – Структурна схема СТ з двома осями.

Далі в роботі буде проведено моделювання роботи системи сонячного трекера.

3.3 Автоматизована система керування положенням СП

Для керування положенням кута нахилу обираємо комбіновану слідкуючу систему. Система безперервно здійснює стеження за допомогою фотодатчиків, у випадку виходу їх з ладу, включається алгоритм «дата».

Розглянемо модель такої автоматизованої системи керування (АСК) до складу якої входять:

- мікроконтролер;
- база даних сигналів;
- блок візуалізації;
- зовнішнє обладнання.

Основні режими керування, які забезпечує АСК: пряме завдання кута нахилу, імпортування зовнішніх даних позиціонування, ручне та автоматичне керування.

Для імітаційного моделювання використовуються: база даних сигналів; блоки програмування, констант, обміну даних, виведення даних; сигнали та субмоделі.

Для зручності сприйняття інформації модель розбита на субмоделі: блок обміну сигналами, блок режимів, блок калібрування та блок графіків.

Початкові дані поступають до блоку обміну сигналами, фільтруються та переміщуються у базу даних. Всередині бази даних створено 3 групи сигналів: «Signals»; «1st»; «imp» . Сигнали, що знаходяться у базі даних будуть використовуватися у подальшій роботі в залежності від обраного алгоритму. Якщо необхідно налагодити покази фоторезисторів, усунути похибки, виконується додаткове калібрування отриманих даних у блоці калібрування. Відкалібровані значення в автоматичному режимі роботи. Через блок графіків виводяться результуючі розрахункові параметри, які також зберігаються у блоці обміну сигналів для доступу мікроконтролера.

Розглянемо роботу блоку обміну сигналів. Цей блок складається з двох основних блоків: *RS* та *PL*. Загальний вигляд блоку обміну сигналами зображено на рис. 3.7.

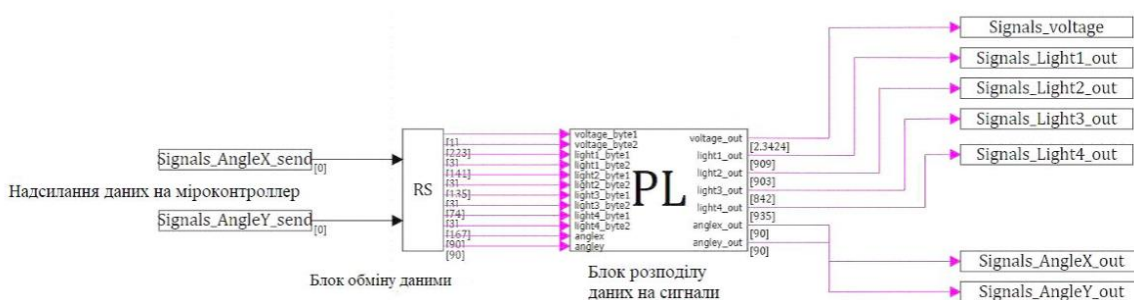


Рис. 3.7 - Загальний вигляд блоку обміну сигналами

В блоку *RS* виконується налаштування форматів пакетів, розмірності, їх типу, швидкості обміну даними, кроку обміну даними та визначення номера послідовного порту для встановлення зв'язку. Сигнали, які надсилаються з цього блоку, надходять з мікроконтролера та далі проходять фільтрацію в блоці *PL*.

Цей блок приймає сигнали про потрібні положення сервоприводів, які визначаються мікроконтролером.

Блок *PL* виконує розподіл даних на сигнали. До цього блоку надходять пакети даних з блоку *RS*, які той отримує від мікроконтролеру. В блоку *PL* ці пакети перетворюються у цілі числа, тобто сигналам, які отримуються від мікроконтролеру відповідають еквівалентні сигнали бази даних. На виході цього блоку знаходяться перетворені дані від мікроконтролеру, а саме:

- напруга сонячних панелей;
- пакети даних з кожного фоторезистора (всього 4);
- значення положення кута сервоприводу.

Розглянемо роботу блоку режимів. В цьому блоці реалізовано 3 алгоритми керування:

- автоматичне керування з використанням фоторезисторів;
- автоматичне керування по даті;
- режим завдання кута.

Зображення блоку режимів з позначенням алгоритмів керування наведено на рис.3.8.

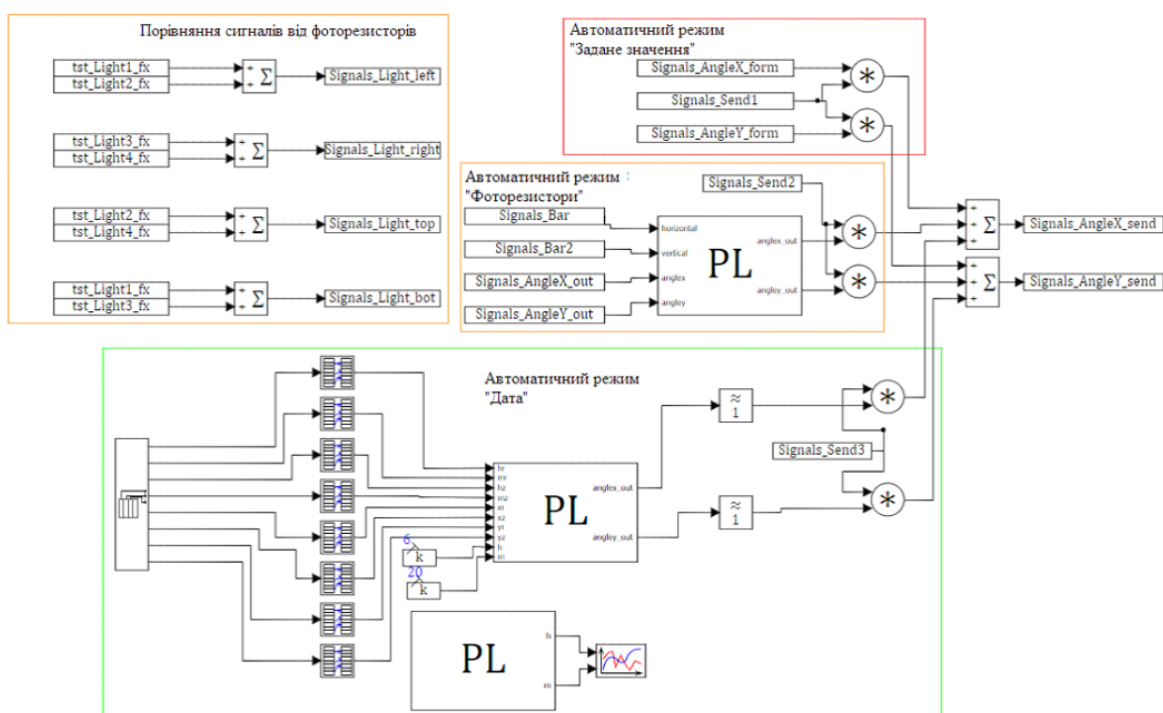


Рисунок 3.8 – Зображення блоку режимів.

Для здійснення автоматичного режиму за показниками фоторезисторів, необхідно порівнювати значення параметрів фоторезисторів, що підключені на різних сторонах системи стеження.

Для здійснення автоматичного режиму керування за датою, необхідно отримувати значення, що знаходяться в зовнішньому файлі з необхідними параметрами положення моделі.

У режимі завдання кута, значення, які вводить оператор надсилаються у базу даних сигналів.

Дані, що отримані у блоці режимів, надсилаються у блок обміну сигналами та, далі, до мікроконтролеру.

Розглянемо більш детально роботу системи в автоматичному режимі з використанням параметрів фоторезисторів. Принцип роботи базується на порівнянні параметрів фоторезисторів з використанням суматорів. Задіяні ліві та праві фоторезистори, нижні та верхні фоторезистори. Порівняння сигналів від фоторезисторів наведено на рис. 3.9.

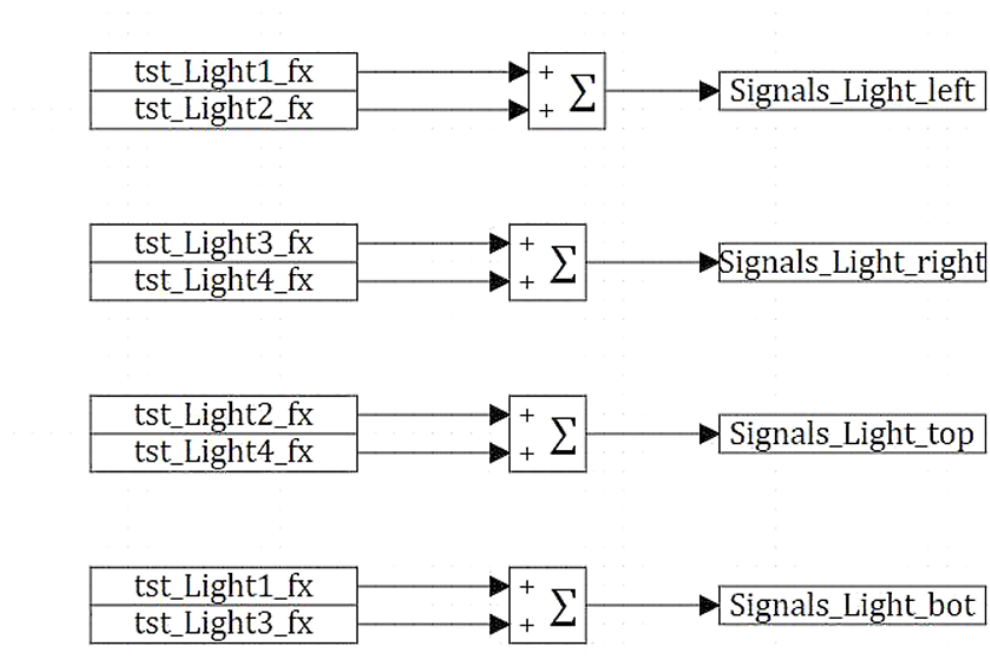


Рисунок 3.9 – Порівняння параметрів від фоторезисторів.

В блоці калібрування виконується попарна розбивка сигналів по горизонтальній та вертикальній площині (рис.3.10).



Рисунок 3.10 – Розбивка сигналів по горизонтальній і вертикальній площині.

Автоматичний режим з використанням показників фоторезисторів вибирається завданням у вікні оператора (блок Signals_Send2) значення «1». Вибір цього режиму представлено на рис. 3.11.

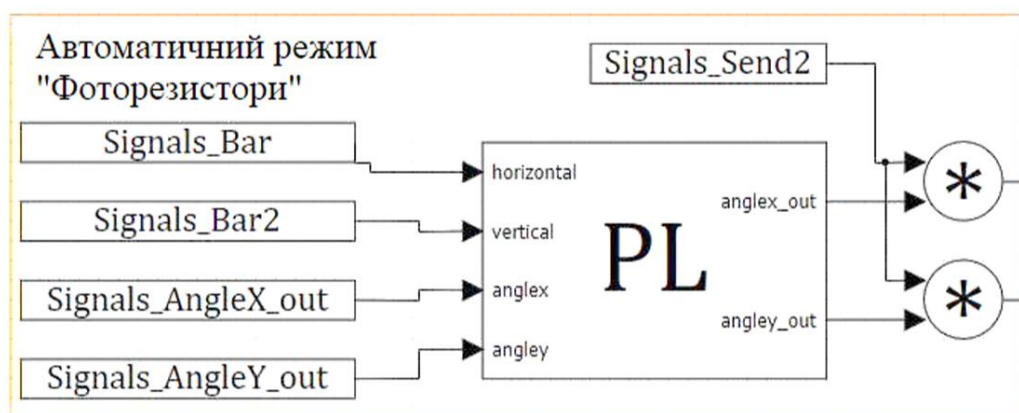


Рисунок 3.11 – Вибір режиму з використанням фоторезисторів.

Далі в блоці програмування здійснюється оцінка різниці показників, яка порівнюється зі значенням помилки «error». Поворот трека у горизонтальній чи вертикальній площині здійснюється, якщо різниця показників перевищує значення помилки «error». Зображення порівняння у блоці програмування наведено на рис. 3.12.

```

1  input horizontal, vertical, anglex, angley;
   output anglex_out, angley_out;
   error = 2;
   anglex_out=anglex;
   angley_out=angley;

   if horizontal>error then anglex_out = anglex + 1;
   if horizontal<-error then anglex_out = anglex - 1;
   if vertical>error then angley_out = angley + 1;
10  if vertical<-error then angley_out = angley - 1;

```

Рисунок 3.12 – Зображення порівняння у блоці програмування.

Значення, що визначенні у блоці програмування передаються до блоку обміну даними.

Наступним розглянемо автоматичний режим роботи системи з використанням значення «дата». Вибір цього режиму здійснюється у вікні оператора (блок Signals_Send3). Зображення схеми режиму представлено на рис.3.13.

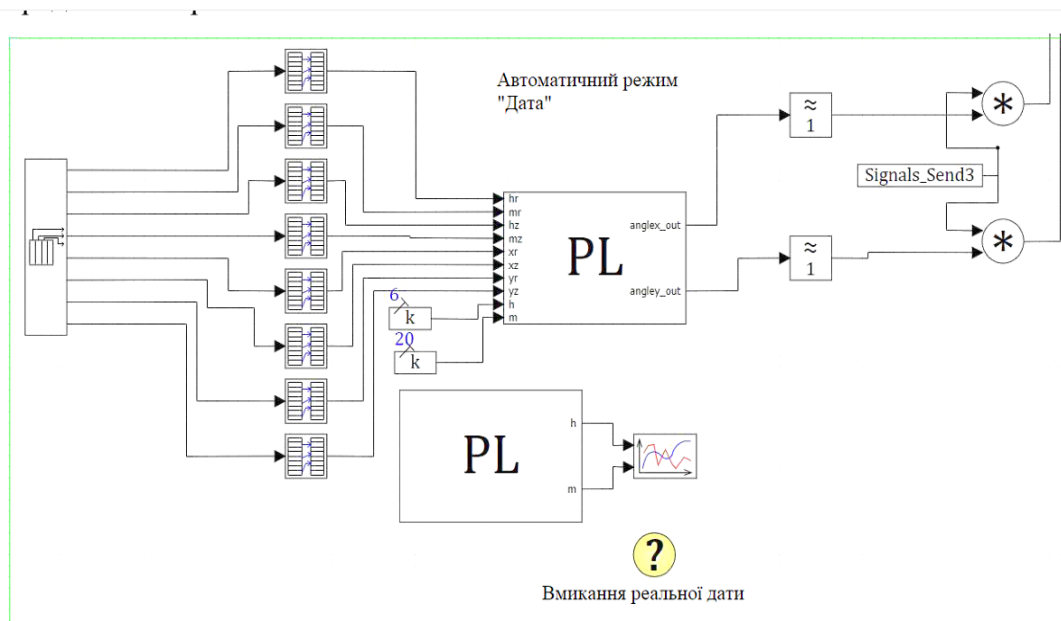


Рисунок 3.13 – Зображення схеми автоматичного режиму «дата».

Для цього режиму система імпортує дані у вигляді таблиці в форматі, який зображено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.1 – Таблиця для роботи в режимі «дата».

A	B	C	D	E	F	G	H
Схід години	Схід хвилин	Захід години	Захід хвилин	Точка сходу по осі X	Точка заходу по осі X	Точка сходу по осі Y	Точка зеніту по осі Y

Табличний формат даних представлено на рисунку 3.14.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	6	5	19	15	20	100	90	140
2	6	6	19	14	20	100	90	140
3	6	7	19	13	20	100	90	140
4	6	8	19	12	20	100	90	140
5	6	9	19	11	20	100	90	140
6	6	10	19	10	20	100	90	140
7	6	11	19	9	20	100	90	140
8	6	12	19	8	20	100	90	140
9	6	13	19	7	20	100	90	140
10	6	14	19	6	20	100	90	140
11	6	15	19	5	20	100	90	140
12	6	16	19	4	20	100	90	140
13	6	17	19	3	20	100	90	140
14	6	18	19	2	20	100	90	140
15	6	19	19	1	20	100	90	140
16	6	20	19	0	20	100	90	140
17	6	21	18	59	20	100	90	140

Рисунок 3.14 – Табличний формат даних для імпорту.

Значення з імпортованої таблиці передаються у блок програмування, де обчислюється необхідне положення трекеру. Зображення обчислень у блоці програмування наведено на рис. 3.15.

```

output h,m;
date=now;
h=hourof(date);
m=minuteof(date);

input hr, mr, hz, mz, xr, xz, yr, yz, h, m;
output anglex_out, angley_out;

ras= hr*60+mr;
zak=hz*60+mz;
tek=h*60+m;
zen=ras+((zak-ras)/2)

anglex_out=xr+(tek-ras)*((xz-xr)/(zak-ras));
if tek<zen then
begin
angley_out=yr+(tek-ras)*((yz-yr)/(zen-ras))
end
end

if tek>zen then
begin
angley_out=yz-(tek-zen)*((yz-yr)/(zen-ras))
end

if tek<=ras then
begin
anglex_out=xr
angley_out=yr
end

if tek>=zak then
begin
anglex_out=xr
angley_out=yr
end
end

```

Рисунок 3.15 – Зображення обчислень у блоці програмування для режиму «дата».

Значення, що визначенні у блоці програмування передаються до мікроконтролеру.

Розглянемо роботу блоку графіків, який дозволяє візуалізувати отримані параметри. Наприклад, для режиму автоматичного керування з використанням фоторезисторів можна вивести значення напруги, що виробляється сонячними панелями, пряме та відфільтроване значення, перетворені значення з фоторезисторів та порівняння показів (рис.3.16).

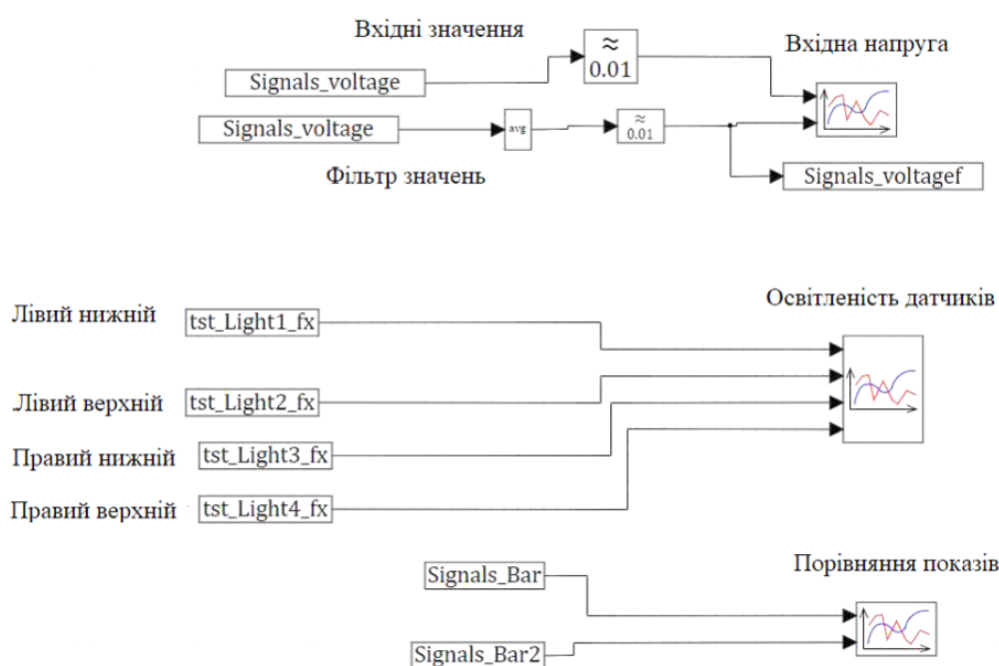


Рисунок 3.16 – Можлива візуалізація параметрів системи (режим «фоторезисторів»).

На рис.3.17 наведено приклад графіку освітленості датчиків.

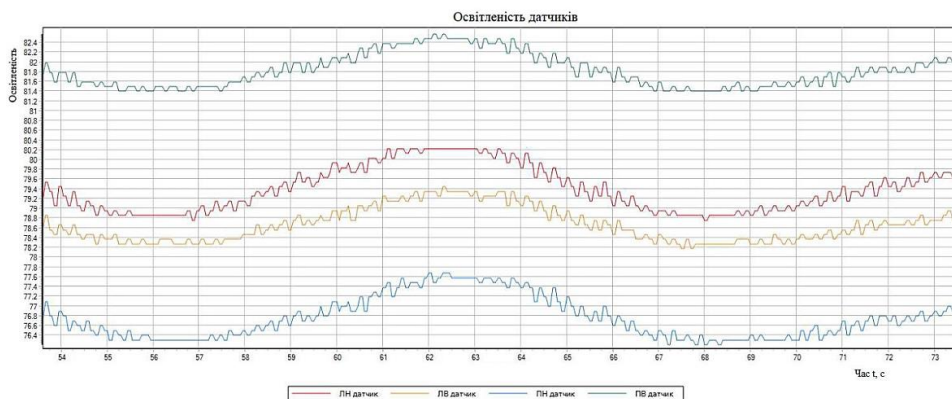


Рисунок 3.17 – Значення освітленості фотодатчиків.

Дана АСК дозволяє у зручній формі виконувати налаштування параметрів для керування кутом обертання сонячного трекеру та отримувати візуалізацію необхідних параметрів.

3.4 Моделювання системи електроприводу сонячного трекеру

У якості електромеханічного пристрою, що здійснює рух трекерної системи було обрано сервопривод з СДПМ. Далі розглянемо систему керування частотнорегульованого синхронного електроприводу (ЧРСЕ). Для розробки моделі використовувалося програмне забезпечення Matlab додаток Simulink, в якому вибрано модель керування СД з постійними магнітами. Загальний вигляд такої моделі представлено на рис.3.18.

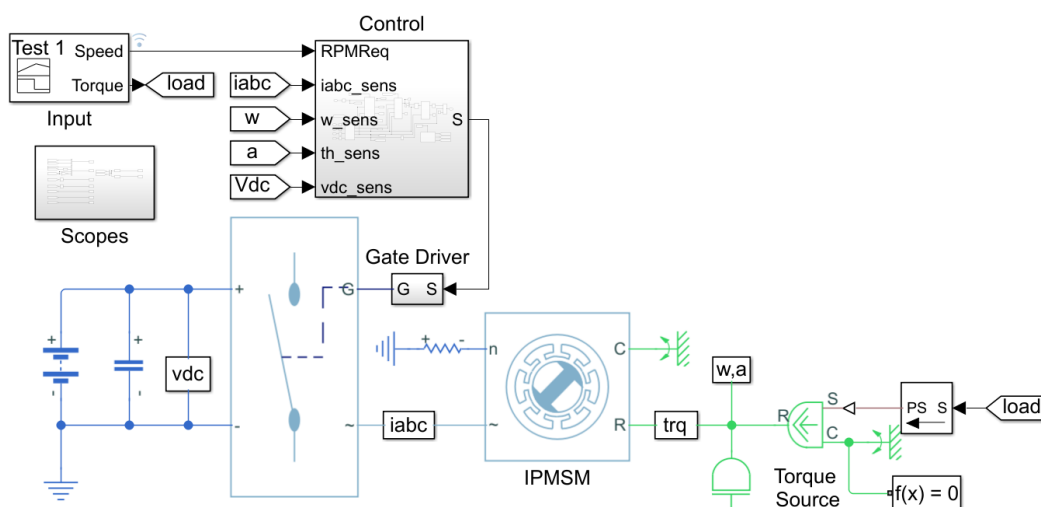


Рисунок 3.18- Загальний вигляд моделі СД з постійними магнітами.

До складу моделі входять блоки завдання, що керують моментом навантаження та швидкістю. На вхід системи керування надходять сигнали, що представлені у графічному вигляді залежності між кутовою швидкістю та часом. Модель дозволяє розглянути роботу інвертора, який видає трифазну напругу синусоїдальної форми, що має параметри необхідні для відпрацювання завдання.

До складу системи керування входять наступні блоки:

- блок «Outer Loop Control» (зовнішнього кола регулятора);
- блок «Current Control» (регулятор струму);
- блок «Measurements» (вимірювання величин);
- блок перетворення фізичних величин.

Зображення блоків системи керування представлено на рис.3.19.

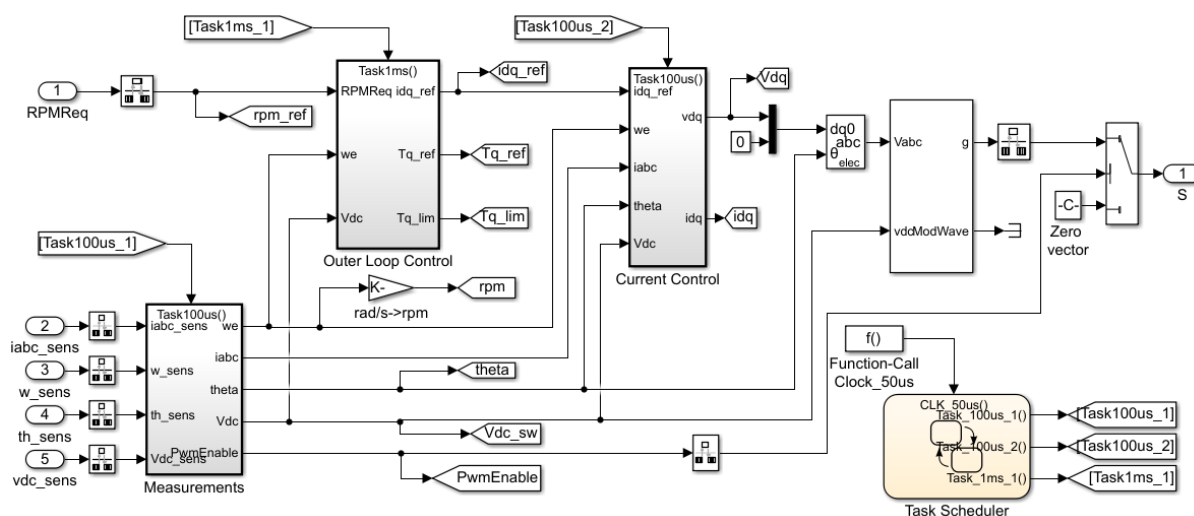


Рисунок 3.19 - Зображення блоків системи керування.

Розглянемо два основні блоки зовнішнього контуру регулювання (рис.3.20):

- блок «Velocity Controller» (регулювання швидкості - рис.3.21);
- блок «PMSM Current Reference Generator» (моделювання та управління моментом – рис.3.22).

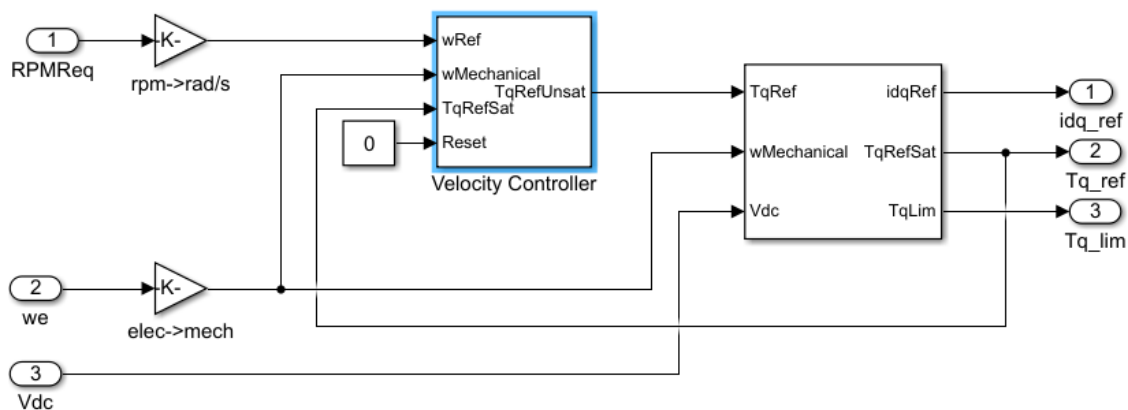


Рисунок 3.20 -Зображення зовнішнього контуру регулювання.

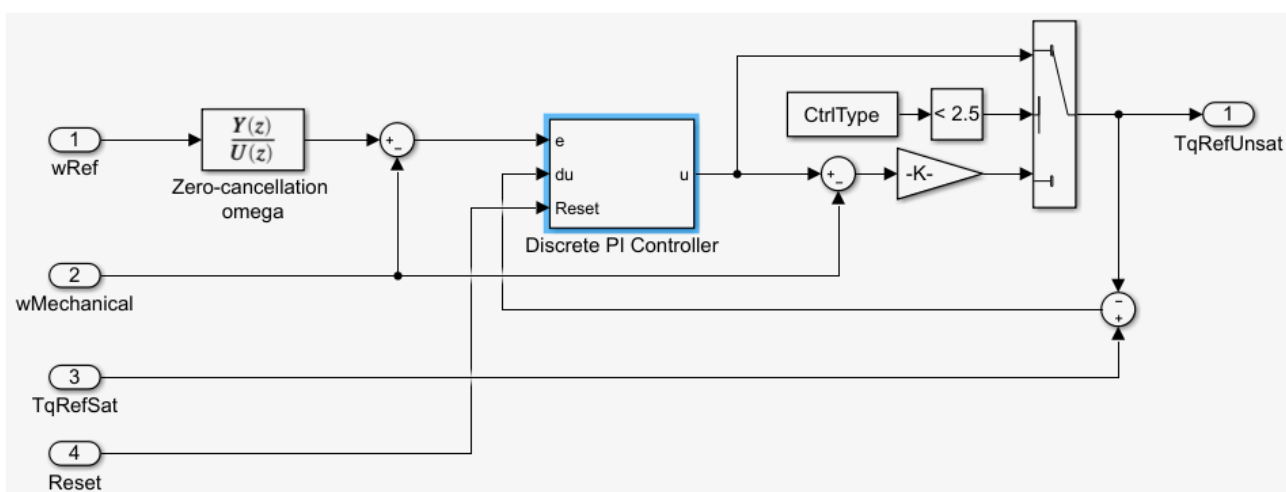


Рисунок 3.21 - Зображення блоку «Velocity Controller».

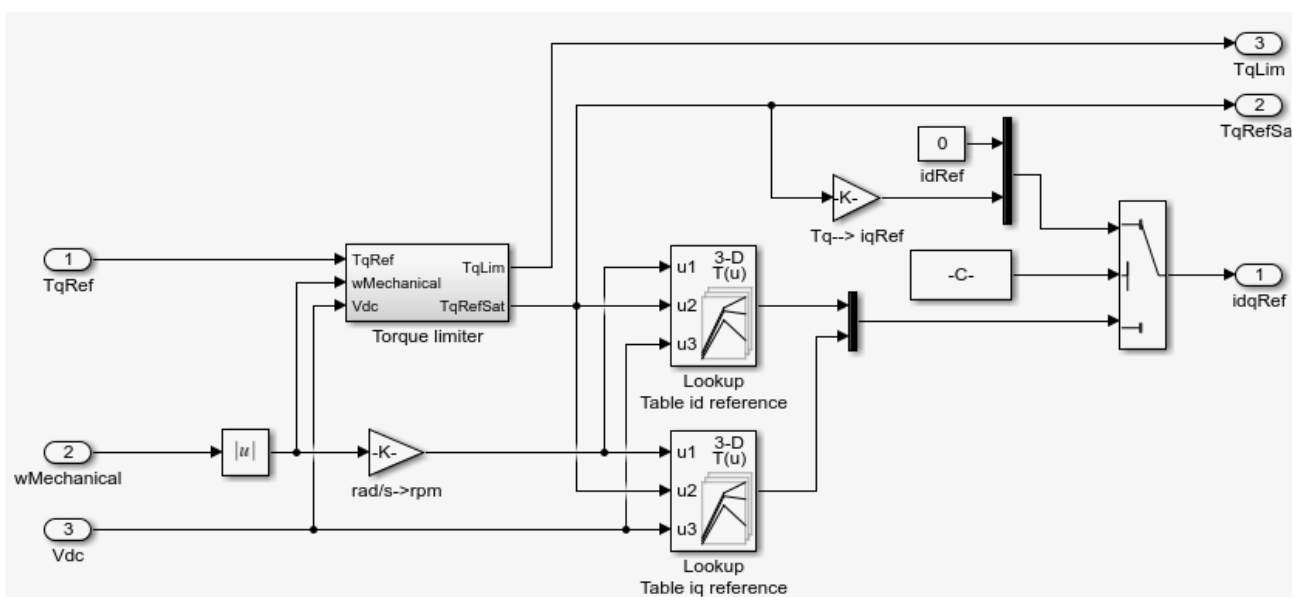


Рисунок 3.22 - Зображення блоку «PMSM Current Reference Generator».

У зовнішньому контурі регулювання формується значення струму, яке надходить на регулятор струму. Завданням регулятора струму є формування векторів керування у блоці «PMSM Current Controller with Pre-Control». Зображення блоку формування векторів керування наведено на рис. 3.23.

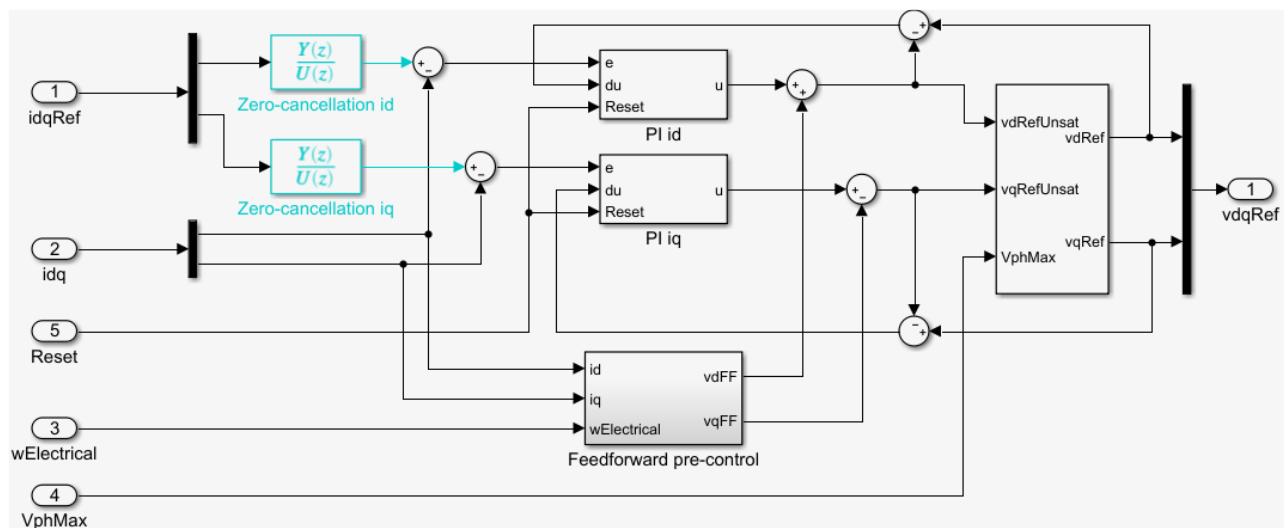


Рисунок 3.23 - Зображення блоку «PMSM Current Controller with Pre-Control»

Далі система передає сформований сигнал на інвертор, який відпрацьовує завдання і подає живлення на електропривод.

Вихідні параметри системи керування можливо отримати у спеціальному вимірювальному блоці (рис.3.24), що містить основні параметри, необхідні для аналізу системи.

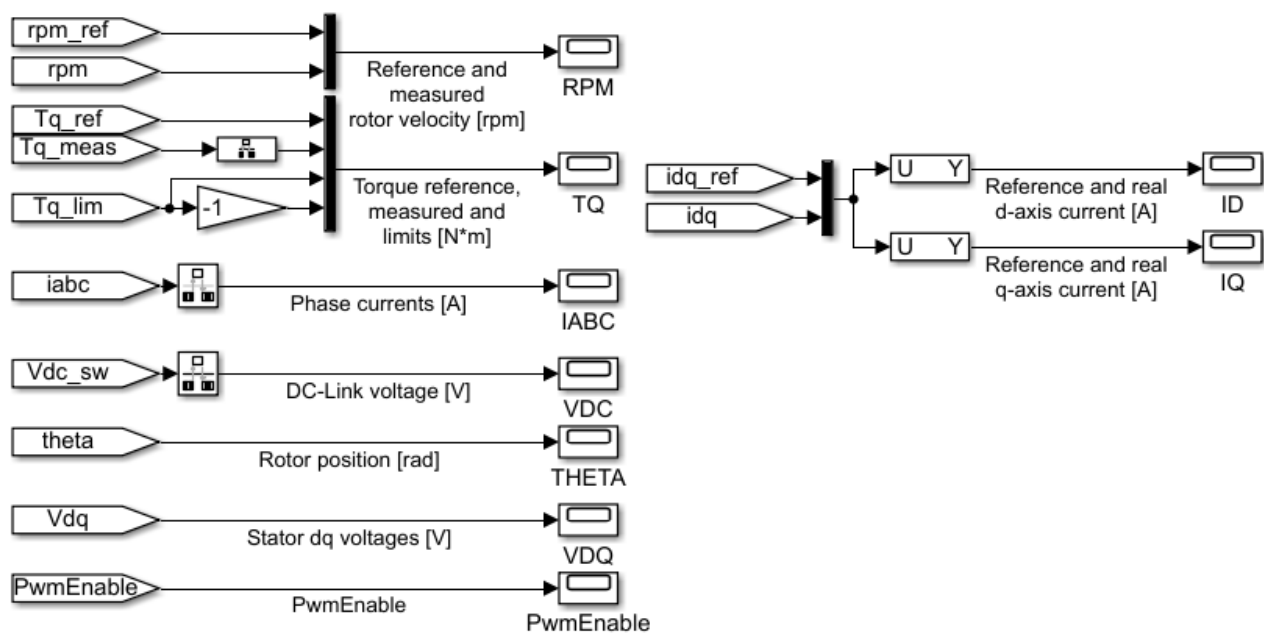


Рисунок 3.24 - Вихідні параметри системи керування.

У блоці Score були зняті показники кутової швидкості двигуна (рис.3.25) та моменту електропривода (рис.3.26).

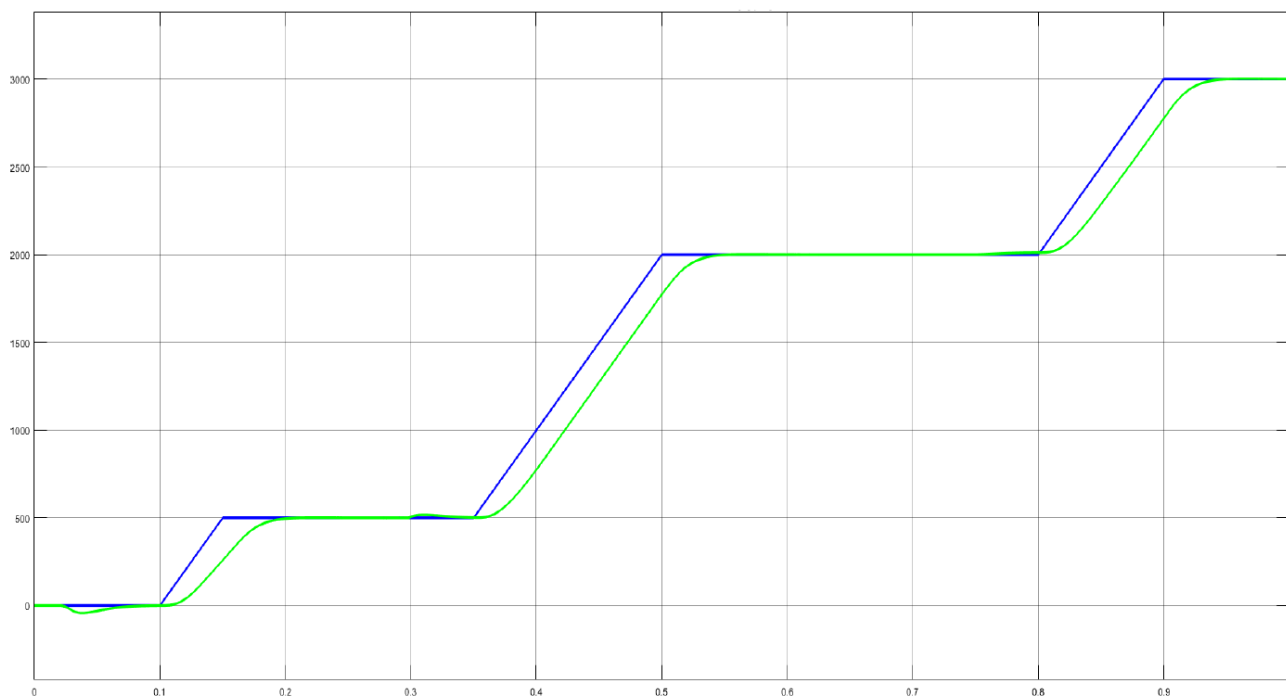


Рисунок 3.25 – Залежність кутової швидкості двигуна від часу,

де ■ - дійсна швидкість та ■ - завдання на швидкість.

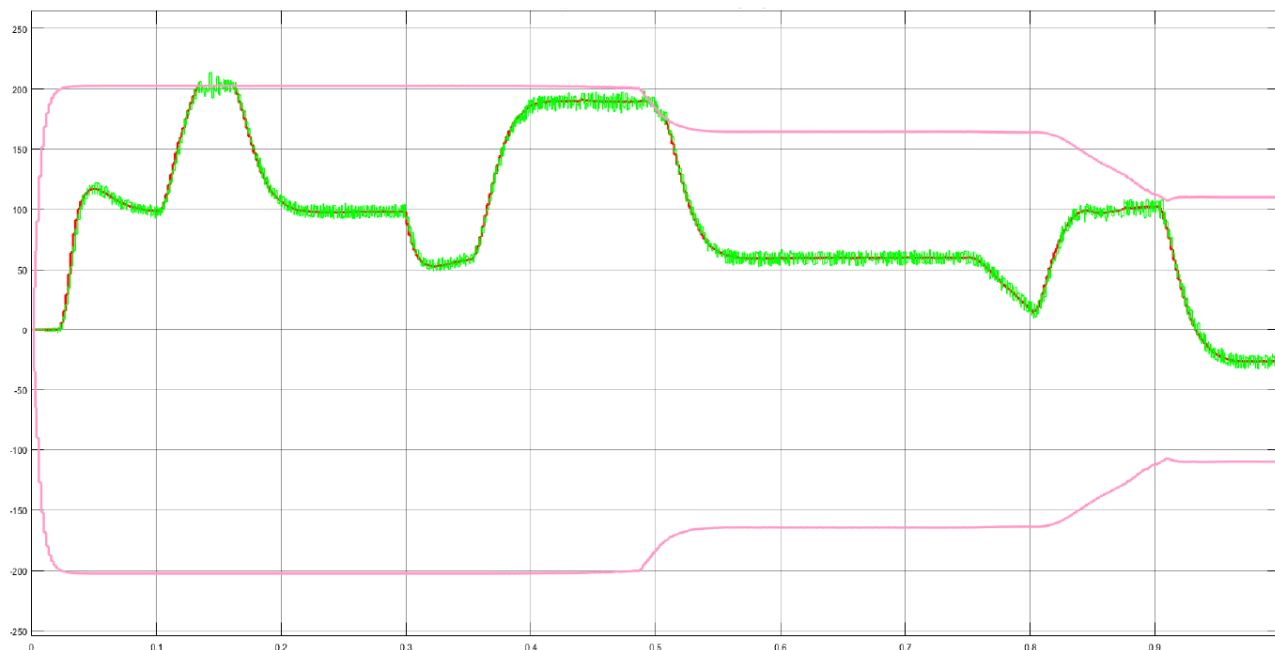


Рисунок 3.26 - Залежність моменту електропривода від часу,

де ■ - обмеження моменту, ■ - завдання на момент та ■ - дійсний момент.

З аналізу приведених графіків можна зробити висновок, про коректність роботи моделі. Значення дійсних параметрів співпадають зі значеннями завдання.

4 ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ У СКЛАДІ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРУ

4.1 Оцінка сумарної сонячної радіації на території України

Оцінити ефективність системи стеження за Сонцем можна за допомогою порівняння кількості енергії, доданої за рахунок системи, що стежить, порівняно зі стаціонарною станцією та кількістю енергії, витраченою на орієнтацію слідкуючого майданчика. Для такого порівняння, першим етапом, необхідно знайти енергію, яка буде отримана зі стаціонарної фотоелектричної станції певної площі, другим етапом, потрібно визначити кількість енергії, що виробляється такою ж станцією, але з пристроєм стеження.

Розрахунок виконуємо для географічних координат м. Кропивницький:

- широта: $48^{\circ}30'47''$ пн.ш.;
- довгота: $32^{\circ}15'34''$ сх.д.;
- висота над рівнем моря: 114 м.

На рис. 4.1 зображено розподіл сумарної сонячної радіації по території України ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) на рік, а на рис. 4.2 – розподіл потенційної енергії сонця (МВт).

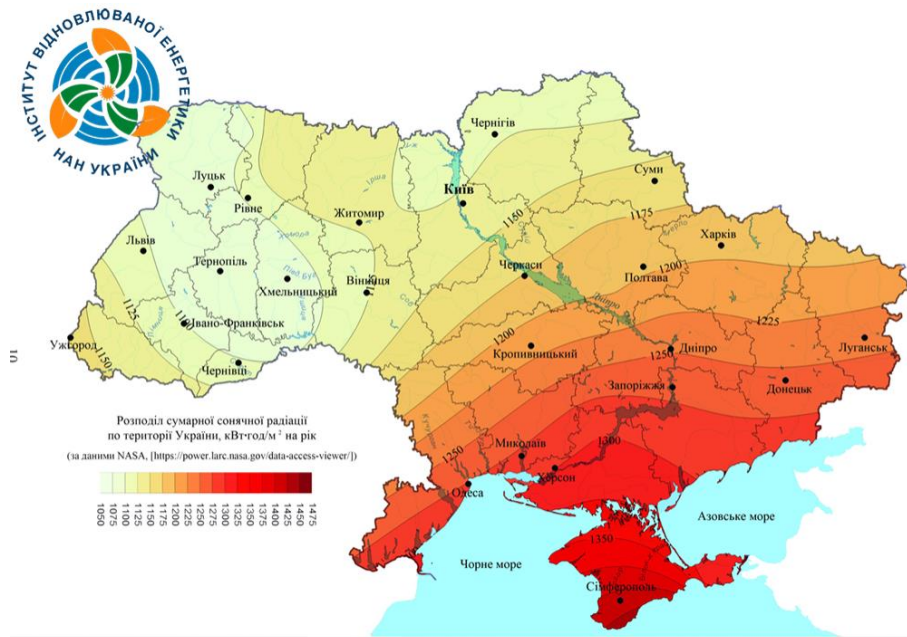


Рисунок 4.1 - Розподіл сумарної сонячної радіації по території України на рік

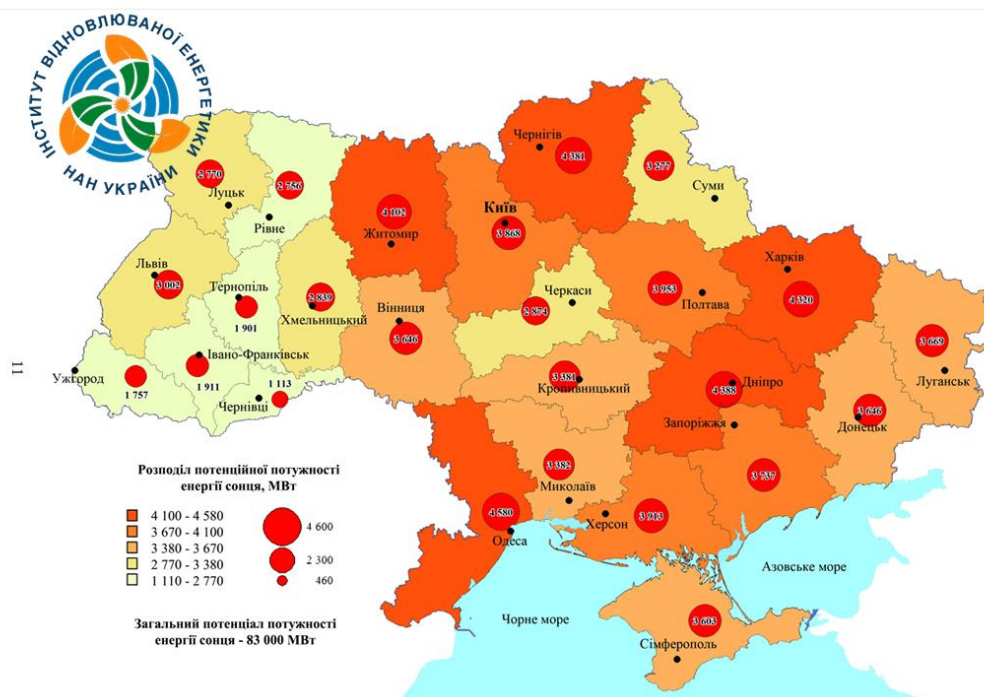


Рисунок 4.2 - Розподіл потенційної енергії сонця по території України

Більш точні дані про сонячну інсоляцію можна отримати з різноманітних джерел – атласи, довідники, кадастри, архіви метеосайтів, стандарти, сайт NASA, дані діючих СЕС [13-15]. Вибираємо дані про середньорічні та середньомісячні значення сумарної: прямої та розсіяної сонячної інсоляції, що надходить на горизонтальну поверхню для Кіровоградської області. Дані про сонячну інсоляцію наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Дані про надходження сонячної енергії для горизонтальної поверхні в Кіровоградській області: S - пряма сонячна радіація, D - розсіяна сонячна радіація, (S +D) - сумарна радіація.

Область / Місяць	Радіація, кВт·год/м ²	I	II	III	IV	V	VI
Кіровоградська	S	8,15	17,46	36,08	60,53	77,99	98,94
	D	19,79	29,1	48,89	55,87	82,64	77,99
	S+D	27,94	46,56	84,97	116,4	160,63	176,93
Область	Радіація, кВт·год/м ²	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Кіровоградська	S	102,43	89,63	69,84	34,92	9,31	4,66
	D	82,64	61,69	40,74	30,26	16,3	16,3
	S+D	185,07	151,32	110,58	65,18	25,61	20,96

Значення сонячної радіації за рік складає: $S = 609,94 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$; $D = 562,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$; $S+D = 1172,15 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$.

4.2 Визначення електроенергії, що виробляють стаціонарно встановлені сонячні панелі

Спочатку розраховуємо кількість енергії, що виробить за рік стаціонарна сонячна електростанція. Визначимо кількість сонячної енергії, яка приходить на похилу поверхню фотоелектричних панелей за рік. Оптимальний кут нахилу для обраної місцевості краще встановлювати окремо для зимових та літніх місяців. Кут нахилу для зими повинен бути в межах: географічна широта мінус 15-20 градусів, для літа відповідно плюс 15-20 градусів. Для України, в середньому, кут нахилу панелей взимку повинен складати приблизно 70 градусів, влітку – 30 градусів. Якщо немає можливості сезонно міняти кут нахилу, можна встановити за середнім значенням (35-50градусів). З урахуванням орієнтації роботи системи цілий рік приймаємо кут нахилу панелей для Кропивницького таким, що дорівнює 48° .

Кількість електроенергії, виробленої ФП, визначається за обсягом сонячної радіації, що надходить на його робочу поверхню з врахуванням ККД панелей, і визначається залежністю:

$$W_{\text{кор}} = I_{\text{сон}} \cdot \eta_s = S_s \cdot \eta_m \cdot \int_0^T g(t) dt, \quad (4.1)$$

де $W_{\text{кор}}$ – корисна електроенергія, що надходить до споживача, кВт.год;

$I_{\text{сон}}$ – енергія сонячної радіації, що поступає на ФП, кВт.год;

η_s – ККД сонячної ФП;

$g(t)$ – сонячна радіація, що надходить під заданим кутом, кВт/м²;

S_s – площа фотопанелей, м².

Для визначення ефективності сонячної станції потрібно знати інсоляцію на похилій площині. Підібраний кут нахилу сонячних панелей 48° , як оптимальний. Орієнтація південно-східна. Так як у довідниках представлені дані сумарної

сонячної радіації лише на горизонтальну поверхню, потрібно провести перерахунок її на похилу поверхню відповідно до формули:

$$I = k \cdot S + D \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (4.2)$$

де I – сумарна радіація на похилу поверхню під кутом 48° , кВт·год/м²;

k – коефіцієнт для перерахунку прямої сонячної радіації з горизонтальної поверхні на похилу;

S – пряма сонячна радіація, кВт·год/м² ;

D – розсіяна сонячна радіація, кВт·год/м²;

β - кут нахилу поверхні по відношенню до горизонтальної площини.

Виконаємо перерахунок для січня місяця:

$$I = k \cdot S + D \frac{1 + \cos \beta}{2} = 2,52 \cdot (8,15 + 22,12 \cdot \frac{(1 + \cos 48^\circ)}{2}) = 38,194,$$

Отримані результати перерахунку надано у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розподіл сонячної радіації на похилу поверхню (кут 48°)

Місяць	S , кВт·год/м ²	k	D , кВт·год/м ²	β , °	I , кВт·год/м ²
I	8,15	2,52	19,79	48	38,194
II	17,46	1,95	29,1	48	57,436
III	36,08	1,56	48,89	48	105,175
IV	60,53	1,3	55,87	48	121,720
V	77,99	1,15	82,64	48	172,329
VI	98,94	1,09	77,99	48	185,835
VII	102,43	1,26	82,64	48	169,913
VIII	89,63	1,22	61,69	48	161,528
IX	69,84	1,43	40,74	48	140,611
X	34,92	1,77	30,26	48	62,749
XI	9,31	2,76	16,3	48	31,168
XII	4,66	2,74	16,3	48	29,068

Далі визначаємо загальну ефективну площу сонячної станції за формулою:

$$S = N_m \cdot N_c \cdot S_c = 16 \cdot 108 \cdot 0,0181 = 31,28 \text{ м}^2,$$

де N_m – кількість сонячних модулів у станції;

N_c – кількість фотоелектричних осередків на одному модулі, для вибраної моделі LR5-54НІН-410М панелей дорівнює 2×54 ;

S_c – площа одного фотоелектричного осередку, m^2 .

Знаходимо кількість виробленої електроенергії з усієї фотоелектричної станції за січень:

$$W_1 = I_1 \cdot \eta_m \cdot S = 38.194 \cdot 0,213 \cdot 31,28 = 254,48, \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (4.3)$$

Для збільшення точності оцінки кількості енергії, що виробляється фотоелектричною станцією необхідно врахувати ККД інвертора, що здійснює перетворення постійного струму в змінний, для можливості подальшого підключення до мережі. Також враховуємо можливі втрати в провіднику, які приймаємо на рівні 1%. Вибираємо мережевий інвертор SMA SUNNY TRIPOWER 7000TL-20 (рис.4.3). Його основні технічні параметри наведено у табл. 4.3 [17].



Рисунок 4.3 - Мережевий інвертор SMA SUNNY TRIPOWER 7000TL-20

З врахуванням ККД інвертора та втрат в провідниках:

$$W_{1\Sigma} = 254,48 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 246,89, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.4)$$

Таблиця 4.3 - Характеристики інвертору SMA SUNNY TRIPOWER 7000TL-20

Параметр	Розмірність	Значення
Номинальна вихідна потужність	Вт	7000
Максимальна потужність	Вт	7000
Кількість фаз	-	3
Вихідна напруга	В	280
Максимальна вхідна потужність	Вт	7175
Частота вихідної напруги	Гц	50
Максимальний вхідний струм	А	15
Максимальний вихідний струм	А	10,2
Вхідна напруга постійного струму	В	1000
ККД	%	98
К-сть MPPT трекерів	-	2
Ступінь захисту	-	IP 65
Розміри	мм	490x519x185
Вага	кг	37

Дані за інші місяці зведено до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Значення виробленої електроенергії сонячними панелями за рік при стаціонарній установці під кутом 48°.

Місяць	I , кВт·год/м ²	η_s	S_s , м ²	η_{inv}	Втрати в провідниках	$W_{кор.}$ кВт·год
I	38,194	0,213	31,28	0,98	0,99	246,89
II	57,436	0,213	31,28	0,98	0,99	371,27
III	105,175	0,213	31,28	0,98	0,99	679,86
IV	121,720	0,213	31,28	0,98	0,99	786,81
V	172,329	0,213	31,28	0,98	0,99	1113,95
VI	185,835	0,213	31,28	0,98	0,99	1201,25
VII	169,913	0,213	31,28	0,98	0,99	1098,34
VIII	161,528	0,213	31,28	0,98	0,99	1044,13
IX	140,611	0,213	31,28	0,98	0,99	908,92
X	62,749	0,213	31,28	0,98	0,99	405,62
XI	31,168	0,213	31,28	0,98	0,99	201,47
XII	29,068	0,213	31,28	0,98	0,99	187,90
За рік						8120,61

На рис.4.4 показано вироблення електроенергії стаціонарно встановленими СП протягом року по місяцям.

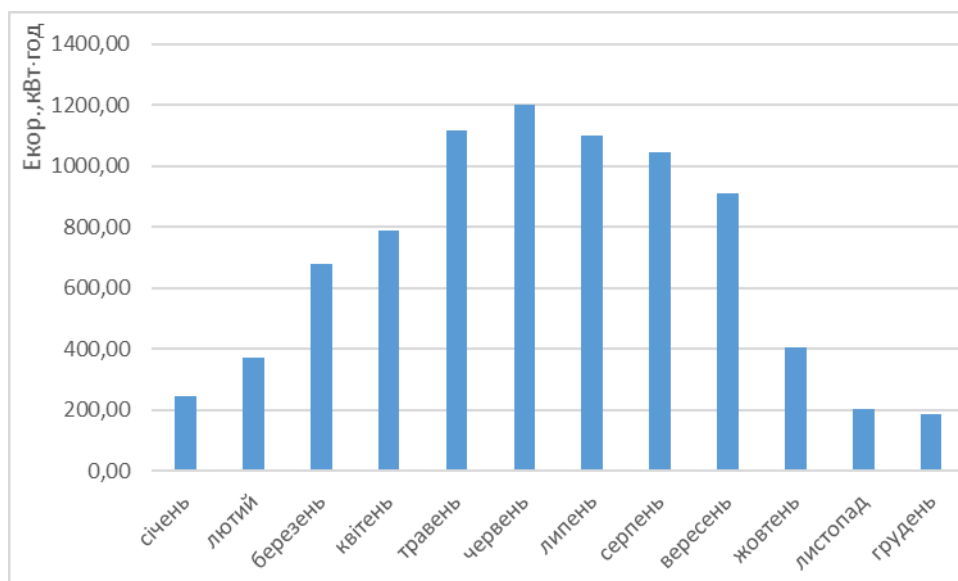


Рисунок 4.4 - Вироблення електроенергії стаціонарно встановленими СП протягом року по місяцям.

4.3 Визначення електроенергії, що виробляють сонячні панелі у складі трекеру

В наступних розрахунках визначимо кількість електроенергії, яка виробляється та споживається ФЕМ з трекерною системою. Для цього використовуються тіж самі значення сонячної радіації, що і для стаціонарної системи, але тепер вже потрібно враховувати постійно змінюючийся ку нахилу сонячних панелей, як в горизонтальній, так і в вертикальній площині. Тобто кількість змінних зростає, що суттєво ускладнює розрахунки. Враховуючи, що в наш час існують спеціалізовані програми для розрахунку фотоелектричних систем, доцільно скористатися однією з них, а саме програмою PVsyst V6.43 [11]. Для роботи в цій програмі, користувачеві потрібно задати параметри фотоелектричної системи. Відзначимо основні: марка та потужність сонячної панелі, кількість панелей у складі трекерної системи, марка та потужність інвертора, загальна площа сонячних панелей, широта, довгота та висота над рівнем моря місцевості, для якої будуть виконуватися розрахунки та інші. Все це заноситься у розділ програми «Grid-Connected System: Simulation parameters».

Наприклад, завдання місцезнаходження СП наведено на рис.4.5, а основних параметрів - на рис.4.6.

PVSYST V6 43			20/11/23	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project:	Dissertation. Dynamic			
Geographical Site	Ilarionove	Country Ukraine		
Situation	Latitude 48.3°N	Longitude 32.2°E		
Time defined as	Legal Time zone UT+2	Altitude 114 m		
	Albedo 0.20			
Meteo data:	Ilarionove	Meteonorm7.1 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic		
Simulation variant:	New simulation variant			
	Simulation date 20/11/23 21h18			

Рисунок 4.5 – Завдання місцезнаходження СП в програмі PVsyst.

Simulation parameters					
Tracking plane, two axis	Minimum Tilt	0°	Maximum Tilt	75°	
Rotation Limitations	Minimum Azimuth	-165°	Maximum Azimuth	165°	
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteonorm		
Horizon	Free Horizon				
Near Shadings	No Shadings				
PV Array Characteristics					
PV module	Si-mono	Model	LR5-54HIH-410M		
original PVsyst database		Manufacturer	longi solar		
Number of PV modules		In series	12 modules	In parallel	3 strings
Total number of PV modules		Nb. Modules	16	Unit Nom. Power	410 Wp
Array global power		Nominal (STC)	6,56 kWp	At operating cond.	6.08 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	327 V	I mpp	25 A
Total area		Module area	31,28 m²	Cell area	28.3 m²
Inverter					
Original PVsyst database		Model	SUNNY TRIPOWER 7000TL-20		
Characteristics		Manufacturer	SMA		
Inverter pack		Operating Voltage	300-480 V	Unit Nom. Power	7.00 kWac
		Nb. of inverters	1 units	Total Power	7.0kWac
PV Array loss factors					
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/nΓK / m/s	
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	223 mOhm	Loss Fraction	1.5 % at STC	
Module Quality Loss			Loss Fraction	-0.8 %	
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	1.0 % at MPP	
Incidence effect, ASH RAE parametrization	IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)		bo Param.	0.05	
User's needs : Unlimited load (grid)					

Рисунок 4.6 – Завдання основних параметрів СП в програмі PVsyst для сонячного трекеру.

Дуже суттєвим є те, що програма використовує в своїх розрахунках метеорологічні виміри бази даних Meteonorm та власну базу даних з обладнання. В результаті проведення моделювання користувач отримує звіт про роботу фотоелектричної системи, розділ «Grid-Connected System: Main results».

Для фотоелектричної системи, яка складається з 16 сонячних панелей Longi Solar LR5-54HIH-410M, встановлених на поворотну платформу та одного інвертора SMA sunny tripower 7000TL-20, отримано річне вироблення електричної енергії: 12,57 МВт · год. Фрагменти звіту програми PVsyst V6.43 наведено на рисунку 4.7.

Grid-Connected System: Main results				
Project:		Dissertation.		
Simulation variant:		New simulation variant		
Main system parameters		System type	Grid-Connected	
PV Field Orientation		Tracking two axis		
PV modules		Model	LR5-54HIH-410M	Pnom 410 Wp
PV Array		Nb. modules	16	Pnom toffl 6.56 kWp
Inverter		Model	SUNNY TRIPOWER 7000TL-20	Pnom 7.00 kWac
Users needs		Unlimited load (grid)		
Main simulation results				
System Production		Produced Energy	12.57 MWh/year	Specific prod 1745 kWh/kWp/year
		Performance Ratio PR	87.2 %	

a)

New simulation variant
Balances and main results

	<u>GlobHor</u> kWh An ²	<u>T Amb</u> °C	<u>GlobInc</u> kWh/m ²	<u>GlobEff</u> kWh/m ²	<u>EArray</u> MWh	<u>E_Grid</u> MWh	<u>EffArrR</u> %	<u>EffSysR</u> %
<u>January</u>	29.7	-3.24	64.2	63.2	0.451	0.437	14.99	14.53
<u>February</u>	49.0	-2.92	92.1	90.8	0.637	0.621	14.74	14.38
<u>March</u>	93.1	2.74	152.1	149.8	1.027	1.006	14.40	14.10
<u>April</u>	133.4	10.21	201.9	199.0	1.311	1.286	13.84	13.58
<u>May</u>	183.4	16.39	268.9	265.7	1.600	1.570	13.19	12.95
<u>June</u>	182.7	19.12	256.9	253.1	1.664	1.635	13.28	13.03
<u>July</u>	185.3	22.72	267.1	263.3	1.647	1.619	13.00	12.77
<u>August</u>	174.4	22.23	270.7	267.4	1.630	1.600	12.97	12.75
<u>September</u>	111.3	15.78	179.4	176.8	1.139	1.116	13.52	13.26
<u>October</u>	73.9	9.73	137.3	136.5	0.896	0.877	13.90	13.60
<u>November</u>	33.0	3.25	69.0	68.0	0.469	0.455	14.48	14.04
<u>December</u>	23.0	-1.97	51.5	50.6	0.362	0.350	14.99	14.49
<u>Year</u>	1272.1	9.58	2011.0	1983.2	12.832	12.570	13.60	13.32

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation EArray Effective energy at the output of the array
 T Amb Ambient Temperature E_Grid Energy injected into grid
 GlobInc Global incident in col. Plane EffArrR Effie. Eout array /rough area

б)

Рисунок 4.7 – Результати розрахунків: а) загальна генерація; б) з розбивкою по місяцям.

Такі ж розрахунки було проведено і для стаціонарної фотоелектричної установки. Фрагмент завдання постійного кута нахилу 48° приведено на рис.4.8.

PVSYST V6 43			20/11/23	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters				
Project:	Dissertation. Dynamic			
Geographical Site	Ilarionove	Country Ukraine		
Situation	Latitude 48.3°N	Longitude 32.2°E		
Time defined as	Legal Time zone UT+2	Altitude 114 m		
	Albedo 0.20			
Meteo data:	Ilarionove	Meteonorm7.1 (1991-2010), Sat=100% - Synthetic		
Simulation variant: New simulation variant				
	Simulation date 20/11/23 21h18			
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation	Tilt 48°	Azimuth 0°		
Models used	Transposition Perez	Diffuse Perez, Meteonorm		
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	No Shadings			
PV Array Characteristics				
PV module	Si-mono	Model	LR5-54HH-410M	
original PVsyst database		Manufacturer	longi solar	

Рисунок 4.8 – Фрагмент завдання постійного кута нахилу 48° в програмі PVsyst для стаціонарного сонячного трекеру.

Результати розрахунків виробленої електроенергії з розбивкою по місяцям наведено на рис. 4.9.

New simulation variant								
Balances and main results								
	GlobHor kWh An ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Gnd MWh	EffArrR %	EffSysR %
January	29.7	-3.24	55.5	54.1	0.299	0.290	15.05	14.88
February	49.0	-2.92	77.7	75.8	0.425	0.412	14.81	14.48
March	93.1	2.74	122.8	119.5	0.689	0.667	14.40	14.11
April	133.4	10.21	147.0	142.6	0.881	0.853	13.82	13.54
May	183.4	16.39	175.6	170.0	1.075	1.042	13.26	12.97
June	182.7	19.12	162.7	157.0	1.120	1.084	13.28	13.01
July	185.3	22.72	169.8	163.8	1.109	1.074	13.02	12.74
August	174.4	22.23	185.5	179.8	1.096	1.061	12.95	12.69
September	111.3	15.78	140.2	136.3	0.765	0.741	13.56	13.29
October	73.9	9.73	112.6	109.8	0.600	0.582	13.98	13.69
November	33.0	3.25	58.1	56.6	0.311	0.302	14.53	14.17
December	23.0	-1.97	45.0	43.9	0.239	0.232	15.03	14.63
Year	1272.1	9.58	1452.2	1409.2	8.610	8.340	13.69	13.40

Рисунок 4.9 – Фрагмент результатів розрахунку виробленої електроенергії з розбивкою по місяцям для стаціонарної СП.

В цьому випадку кількість виробленої електроенергії склала 8,34 МВт · год. Це значення відрізняється від отриманого у ручному розрахунку (8,12 МВт · год). Таке розходження у результатах розрахунку можна пояснити різними метеорологічними базами, що використовувалися для розрахунків та точністю виконання розрахунків. Але основні тенденції, які простежуються при розрахунках виробленої електроенергії по місяцях року співпадають.

Порівняння кількості електроенергії, що була вироблена стаціонарною електростанцією та ТС з точністю позиціонування в 1° наведено на рис. 4.10.

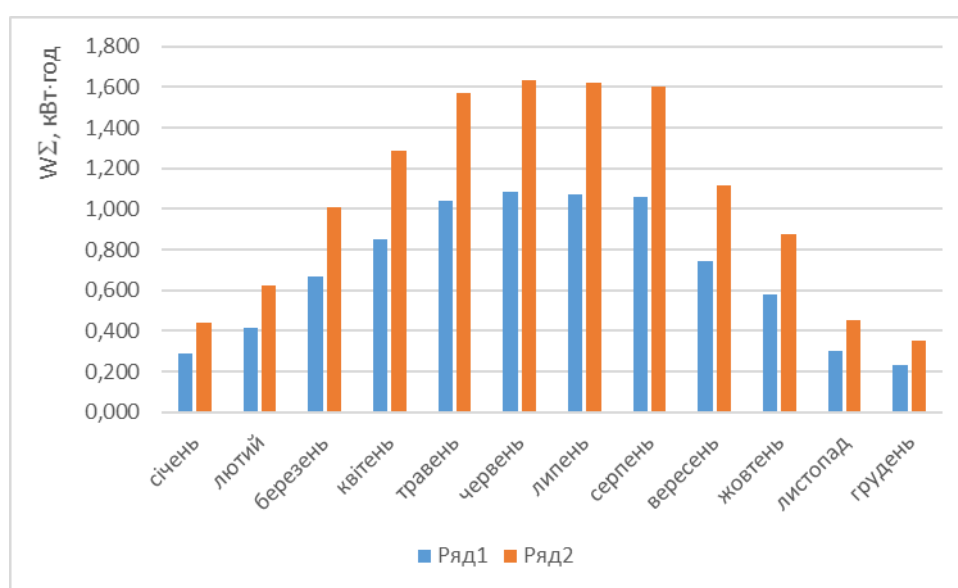


Рисунок 4.10 – Порівняння продуктивності стаціонарної СЕС та ТС.

Проаналізуємо, яку кількість електричної енергії було витрачено на виконання переміщення СП. Тобто, потрібно визначити кількість енергії, що споживається серводвигунами. Для цього орієнтовно визначимо необхідну кількість включень двигунів за день, на яку буде впливати тривалість світового дня та значення градусу, на який повертається панель.

Напочатку, встановимо кількість потрібних включень приводу, що обертає панелі для встановлення під правильним кутом нахилу. Визначаємо проміжок часу, за який Сонце змінює свій кут висоти на 1°. Для цього вибираємо 4 опорні дати у році:

- весняне рівнодення – 20 березня;
- літнє сонцестояння – 21 червня;
- осіннє рівнодення – 22 вересня;
- зимове сонцестояння – 21 грудня.

Значення кутів висоти Сонця над горизонтом для розрахункової широти 48° записані у табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Значення кутів висоти Сонця для ключових дат.

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

Далі визначимо на скільки градусів Сонце змінює свій кут за один день. Для цього поділимо проміжок між двома датами на кількість днів між ними:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_{лс} - \alpha_{вр}}{N_{лс} - N_{вр}} = \frac{65,5 - 42}{171 - 79} = 0,25^\circ / \text{добу}.$$

Отримаємо, що за один день Сонце змінює цей кут $0,25^\circ$, тобто за 4 дні на 1° .

Потім визначимо проміжок часу, за який азимутальний кут буде змінено на 1° . Оскільки, земля здійснює одне обертання навколо своєї осі протягом 24 годин, визначити зміну азимутального кута можливо за формулою:

$$\Delta\gamma = \frac{360}{24 \cdot 60} = 0,25^\circ /_{\text{хв}}$$

Кількість включень двигуна буде залежати від кута повороту системи та заданого алгоритму зміни кута. У роботі прийнято, що кут повороту трекерної системи обмежується значеннями 15° та 345° , тоді повний оборот буде виконано за $345^\circ - 15^\circ = 330^\circ$. З використанням частотного регулювання система дозволяє досягти мінімально можливої швидкості повороту, яка

дорівнює 0,1 об/хв. Тоді, при зміні положення кута на 1° привід буде підключатися через 4 хвилини і працювати протягом:

$$t_{np} = \frac{60}{330 \cdot 0,1} = 1,8 \text{ с.}$$

Довжина світлового дня визначається за даними про схід і захід сонця для обраної місцевості. Наприклад, для 1-го січня 2023 року для м.Кропивницький схід Сонця відбувся о 7.32, захід – 15.56. Тривалість дня склала 8 год 24 хв. Тоді, кількість вмикань поворотного двигуна:

$$n_{\text{вмик}} = \frac{8 \cdot 60 + 24}{4} = 126 \text{ вмикань.}$$

Орієнтовна кількість електроенергії спожита двигуном потужністю 0,75 кВт за одне вмикання склала 1,67 Вт·год. Аналогічно розраховуємо споживання електроенергії за добу: 210,42 Вт·год./добу. Розрахунок споживання за місяць та рік внесено до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11. Розрахунок споживання електроенергії ТС при точності позиціонування 1°.

Місяць	Кіл-ть днів	Середньодобова кількість вмикань	Споживання ел.енергії за одне вмикання, Вт·год	Споживання ел.енергії за місяць, кВт·год
січень	31	132,19	1,67	6,84
лютий	28	153	1,67	7,92
березень	31	162,45	1,67	7,60
квітень	30	192,43	1,67	9,96
травень	31	202,16	1,67	10,13
червень	30	224,37	1,67	11,62
липень	31	211,03	1,67	10,57
серпень	31	186,15	1,67	9,64
вересень	30	163,17	1,67	8,45
жовтень	31	141,55	1,67	7,09
листопад	30	128,14	1,67	6,63
грудень	31	112,97	1,67	5,66
За рік	365			102,11

Для визначення річного споживання визначаємо середню кількість вмикань двигуна за інші місяці, тоді результуюче споживання буде становити:

$$E_{нов} = \sum_{1}^{365} E_{нов,i} = 102,11 \text{ кВт}\cdot\text{год./рік.}$$

Для двигуна, що здійснює переміщення по другій вісі, розрахунки виконуються аналогічно.

$$E_{нах} = \sum_{1}^{365} E_{нах,i} = 2,042 \text{ кВт}\cdot\text{год./рік.}$$

Сумарне споживання електроенергії за рік трекерною системою:

$$E_{спож} = E_{нов} + E_{нах} = 104,152 \text{ кВт}\cdot\text{год./рік}$$

Зменшити споживання електроенергії можливо за рахунок зміни точності позиціонування, наприклад, обрати зміну положення кута на 2° . Тоді двигун буде вмикатися меншу кількість разів, але одночасно з цим зменшиться вироблення електроенергії сонячними панелями. Проведемо аналогічні розрахунки для точності позиціонування для 2° , 5° та 10° . Результати розрахунку наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 - Кількість виробленої та витраченої енергії при зміні точності позиціонування.

Задана точність позиціонування	1°	2°	5°	10°
Вироблення електроенергії СП за рік, МВт·год	12,570	12,530	12,474	12,379
Витрачено енергії ТС за рік, кВт·год	104,152	65,85	40,22	32,24

Розрахунки показують, що при зниженні точності позиціонування, зменшується як вироблена СЕС електроенергія, так і витрати в самій трекерній системі. При переході на точність позиціонування в 2° , порівняно з 1° , вироблення електроенергії знижується на 0,36 %, для 5° на 0,79 %, та для 10°

на 1,49 % відповідно. При цьому зниження витрат електроенергії в ТС складає: для 2° - 36,8 %; для 5° - 61,4 %; для 10° - 69,1 %.

Практичні дослідження підтверджують, що для трекерних систем з точністю позиціонування 10°, електроенергія, що виробляється, складає 98,5 % від кількості виробленої електроенергії з точністю позиціонування в 1°[19].

Для порівняння енергетичної ефективності різних алгоритмів керування системи стеження за Сонцем, визначимо долю споживаної електроенергії, відносно доданої, в порівнянні зі стаціонарною станцією.

При точності позиціонування 1° отримаємо:

$$k = \frac{E_{вит}}{E_{з.тр.} - E_{з.ст.}} \cdot 100\% = \frac{0.104}{12,57 - 8,34} \cdot 100\% = 2,46\%.$$

Для інших значень точності позиціонування, виконав аналогічні розрахунки, отримаємо: 2° - 1,58 %; 5° - 0,96 %; 10° - 0,59 %.

Кращий показник має система з точністю позиціонування в 10°. Це пояснюється тим, що витрачається значно менше енергії, хоча не спостерігається суттєвого зниження генерації електроенергії. Така тенденція обмежується для монокристалічних панелей точністю позиціонування 10° [19]. Але, в реальних умовах, при виборі алгоритма керування системою СТ, потрібно розраховувати техніко-економічні показники.

4.4 Розрахунок економічної ефективності від застосування трекерної установки з різною точністю позиціонування

Розрахунок економічного ефекту ведеться з припущення, що електрична енергія, вироблена трекерними сонячними станціями продається в мережу за «зеленим» тарифом. Цей тариф застосовується для закупівлі електричної енергії, яка виробляється альтернативними джерелами енергії. Розрахунки виконані для

сонячної електростанції з трекерними системами з врахуванням різних алгоритмів керування та СЕС зі стаціонарними панелями.

Потрібно відзначити, що ставка «зеленого» тарифу залежить від дати запуску СЕС та його дія закінчується 1 січня 2030 року.

В Україні ставки «зеленого» тарифу, що діють на даний момент, визначаються як одні з найвищих в Європі. Для сонячних електростанцій, які введені в експлуатацію у приватних домогосподарствах з 1 січня 2020 по 31 грудня 2024 року, тариф становить 0,163 €/кВт·год. Для наземних та дахових станцій юридичних осіб відповідні ставки становлять 0,141 € / кВт · год і 0,152 €/кВт · год.

Розраховуємо вартість електроенергії, яка може бути реалізована в систему по ставці «зеленого» тарифу.

Для стаціонарної системи СБ:

$$C_e = W_T \cdot C_o = 8,34 \cdot 10^3 \cdot 0,163 = 1359,42 \text{ євро} = 53,37 \text{ тис. грн.},$$

де W_T – електроенергія, яка згенерована протягом року стаціонарною системою СБ, кВт · год;

де C_o – вартість електроенергії за ставкою «зеленого» тарифу, що складає 0,163 €/кВт·год. (на 18.11.2023 року за офіційним курсом НБУ 1 євро дорівнює 39,2582 грн.).

Повторюємо розрахунок для трекерної системи при точності позиціонування 1°:

$$\begin{aligned} C_e &= (W_T - W_{\text{вит.}}) \cdot C_o = (12,57 \cdot 10^3 - 104,152) \cdot 0,163 = 2031,9 \text{ євро} = \\ &= 79,77 \text{ тис. грн.}, \end{aligned}$$

де $W_{\text{вит.}}$ - електроенергія, яка спожита трекерною установкою.

Аналогічні розрахунки проведені при точності позиціонування 2°, 5° та 10°. Результати розрахунків наведено у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13- Вартість згенерованої електроенергії для реалізації в систему по ставці «зеленого» тарифу.

Вартість/ тип системи СБ	Стаціонарна система	Задана точність позиціонування			
		1°	2°	5 °	10 °
Вартість згенерованої електроенергії, євро	1359,42	2031,96	2031,83	2026,82	2012,55
Вартість згенерованої електроенергії, тис.грн.	53370	79771,01	79765,87	79569,26	79009,15

Отримані розрахунки показують, що кращий дохід приносить СЕС з більшою точністю позиціонування. При застосуванні найточнішого алгоритму керування, економічний ефект складає 26401 грн. порівняно зі стаціонарною станцією та 762 грн. порівняно з точністю позиціонування в 10°. Для точнішого визначення економічного ефекту, потрібно враховувати витрати, що виникають при експлуатації трекерної системи. Термін окупності такої трекерної системи становить близько 7,8 року.

Застосування ТС з комбінованим алгоритмом стеження за положенням Сонця дозволило підвищити рівень генерації електроенергії на 33 % порівняно зі стаціонарною системою.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВСТАНОВЛЕННЯ, РОБОТИ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ СОНЯЧНИХ СТАНЦІЙ

Встановлення, управління та технічне обслуговування сонячних батарей вимагає належного рівня технічних знань. Усі роботи із системою повинні виконуватися виключно з дотриманням правил техніки безпеки при електромонтажних та налагоджувальних операціях. Перед встановленням і підключенням чи обслуговуванням фотоелектричної системи обов'язково слід прочитати інструкцію по експлуатації сонячних електростанцій та їх складових. Невиконання вимог безпеки може призвести до серйозних травм чи поломки обладнання.

Важливі вимоги з безпеки включають те, що сонячні батареї мають використовуватися відповідно до їх призначення, заборонено вносити технічні зміни в їх конструкцію, а монтаж повинен відповідати усім нормам безпеки. Також слід дотримуватися вимог безпеки при монтажі та експлуатації інших компонентів системи. Важливо пам'ятати, що декілька з'єднаних сонячних батарей можуть генерувати високу напругу.

Розглянемо процес збірки невеликої СЕС, схему якої зображено на рисунку 5.1.

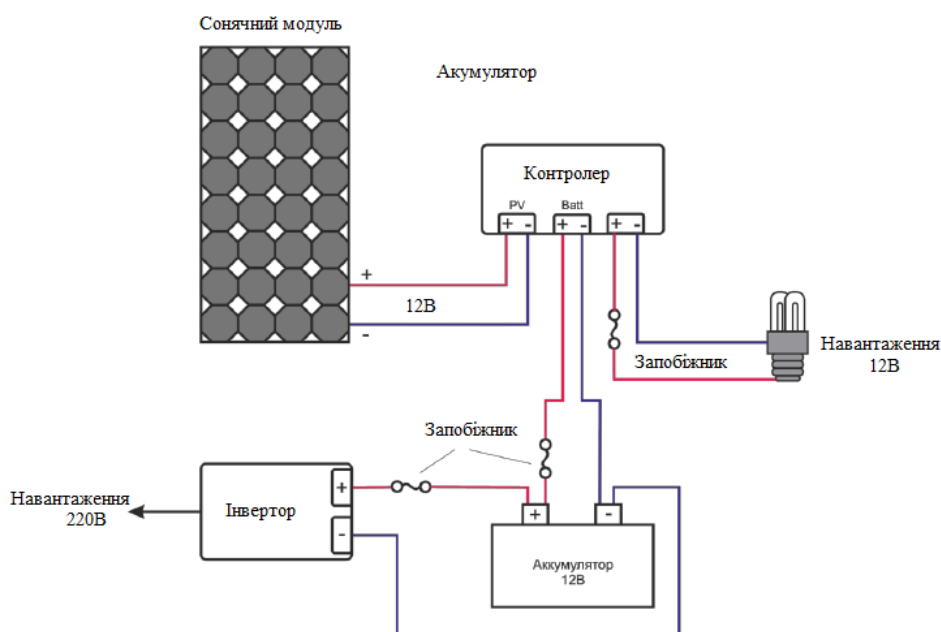


Рисунок 5.1 – Приклад схеми невеликої СЕС.

Основні елементи для збірки: сонячна батарея, акумулятор, контролер заряду, інвертор, запобіжники, комплект конекторів MC4. Акумулятор краще вибирати герметичний, якщо він призначений для встановлення в приміщенні.

Необхідна послідовність підключень:

- 1) Акумулятор слід підключити до контролера через відповідні роз'єми, дотримуючись полярності. Для з'єднання використовувати дроти відповідного до потужності контролера перерізу.
- 2) Приєднати сонячну батарею до контролера через відповідні роз'єми, також дотримуючись полярності. Для здійснення безпечного приєднання використовувати конектори MC4.
- 3) Підключити навантаження до відповідних роз'ємів контролера.
- 4) У випадку необхідності перетворення постійної напруги 12 В на 220 В змінного струму, підключити інвертор до акумулятора, дотримуючись полярності. Уникати прямого підключення інвертора до контролера.
- 5) Приєднати електричні прилади 220 В до виходу інвертора.

Для запобігання пошкодження контролера необхідно підключити компоненти СЕС у правильній послідовності. Далі потрібно заземлити СБ. Наступним кроком є встановлення запобіжників між акумулятором та контролером, між акумулятором та інвертором. Це дозволить запобігти виникненню КЗ.

Вимоги техніки безпеки:

- заборонено вставляти будь-які електропровідні предмети в роз'єми, крім тих, які відповідають стандарту MC4;
- під час роботи з дротами слід завжди використовувати інструменти з ізоляцією, а також ізолюючі рукавички;
- заборонено спрямовувати штучно зосереджене сонячне випромінювання на сонячну батарею;

- контактні роз'єми MC4 (рис. 5.1) мають захист від випадкового дотику, проте слід вживати всі необхідні заходи для уникнення загоряння, іскріння та ударів струмом;



Рисунок 5.2 – Роз'єми стандарту MC4

- інструменти та робоча зона повинні залишатися сухими. Портативні сонячні панелі та роз'єми також мають залишатися сухими;
- встановлення сонячних панелей заборонено в дощову погоду;
- заборонено розбирати сонячні батареї чи видаляти деталі або етикетки виробника;
- слід використовувати лише справні сонячні батареї, і у разі пошкодження або деформації їх не слід підключати;
- не допускати контакту гострих предметів із сонячною батареєю, не фарбувати чи не клеїти на неї щось;
- інші компоненти системи також можуть мати високий напруговий рівень. Слід дотримуватися інструкцій виробників щодо інших компонентів.

Встановлення сонячних батарей:

- необхідно забезпечити особисту безпеку та інших осіб від можливих падінь, уникати проведення установочних робіт при сильному вітрі. Робоча зона повинна бути підготовлена так, щоб уникнути можливих травм;
- уникати перевищення максимально допустимого рівня механічних навантажень. Перед установкою слід переконатися, що погодні умови не можуть призвести до пошкоджень сонячних батарей. Панелі можуть прогинатися під навантаженням в певних умовах. Щоб уникнути пошкоджень від нерівностей та

деформації, не розміщувати кріпильні елементи або дроти між настановним профілем і задньою частиною сонячної батареї;

- переконалися, що сонячні панелі заземлені. Заземлення сонячних батарей зменшує ризик ураження електричним струмом та пожежі відповідно до правил безпеки;
- встановлення систем на даху може впливати на пожежну безпеку будівлі. Сонячні батареї, які встановлені неправильно, можуть стати джерелом небезпеки під час пожежі. Тому панелі на даху повинні бути розташовані над несприйнятливою до горіння поверхнею. Також важливо уникати встановлення панелей поблизу від вогню, горючих матеріалів чи газів.
- необхідно проконтролювати, що на встановлені панелі не направлено штучно концентроване сонячне випромінювання, на них не потрапляє вода під тиском та вони не занурені у воду. Потрібно виключити вплив сірки або солі, через можливість виникнення корозії. Потрібно переконалися, що на панелі не впливають ніякі хімічні речовини. Потрібно оцінити можливість встановлення панелей поблизу виробничих потужностей. Якщо є ймовірність викиду шкідливих речовин таке встановлення не рекомендується.
- необхідно перевірити відповідність технічних параметрів всієї системи та встановлюємих сонячних батарей. Виключити можливість негативного електричного або механічного впливу інших компонентів системи. Дозволяється послідовне підключення сонячних панелей тільки при однакових номінальних значеннях напруги та струму. Не рекомендується робота СБ при більш високій напрузі системи, допустимо працювати у межах сумарної напруги системи.
- потрібно контролювати відповідність системи кріплення місцевим погодним умовам. Система кріплення повинна витримувати снігові та вітрові навантаження. Не допускається встановлювати сонячні панелі замість фасаду чи скління даху.

Розглянемо проведення обслуговування і догляду сонячних батарей.

Як правило, сонячні батареї автоматично очищаються під дощем або при зміщенні снігу. Якщо сонячні панелі розміщені під кутом нахилу від 70 до 90

градусів відносно площини землі, вони, як правило, не вимагають додаткового догляду. У випадку значного забруднення панелей рекомендується промивати їх простою водою, уникаючи використання мийних засобів. Найкраще очищення панелей здійснюється за допомогою шланга і м'якої губки. Для запобігання мікроподряпинам, які можуть призвести до зниження електроенергії, що виробляється сонячними панелями, важливо уникати витирання запиленої поверхні панелей сухими предметами.

Потрібно виконувати перевірку та огляд системи регулярно, не менше 1 разу на рік. При проведенні огляду перевіряють цілісність СБ, відсутність корозії та жорсткість кріплень, цілісність та якість електричних з'єднань.

Вимоги техніки безпеки при кріпленні сонячних панелей включають ряд заходів для запобігання травмам, забезпечення надійності кріплення та збереження ефективності сонячної енергетичної системи. Основні аспекти техніки безпеки включають:

Техніка безпеки при монтажі сонячних панелей:

- Дотримання місцевих будівельних норм, стандартів та правил щодо встановлення сонячних панелей.
- Перед початком робіт важливо провести огляд робочого місця та визначити потенційні небезпеки.
- Робочий персонал повинен мати необхідні навички та знання щодо монтажу сонячних панелей.
- Використання захисного обладнання, такого як ремені безпеки та захисний одяг
- Забезпечення належного закріплення для робочих, які працюють на висоті, наприклад, застосування страхувальних ременів.
- Використання сходиць або стрілочних мостів для доступу до місць монтажу.
- Відключення електропостачання перед роботою з сонячними панелями.
- Використання ізольованих інструментів для уникнення можливості короткого замикання.

- При монтажі важливо дотримуватися вимог до роботи в певних погодних умовах, зокрема у випадку сильного вітру або дощу.
- Періодична перевірка надійності кріплення та ефективності системи.

Виконання надійного кріплення СП.

Закріплення СБ для надійного кріплення, повинно здійснюватися мінімум у чотирьох точках. Алюмінієва рама кріплення, призначена для фіксації по довгій стороні, не має застосовуватися для кріплення по короткій стороні. Правильний варіант кріплення зображено на рис. 5.3.

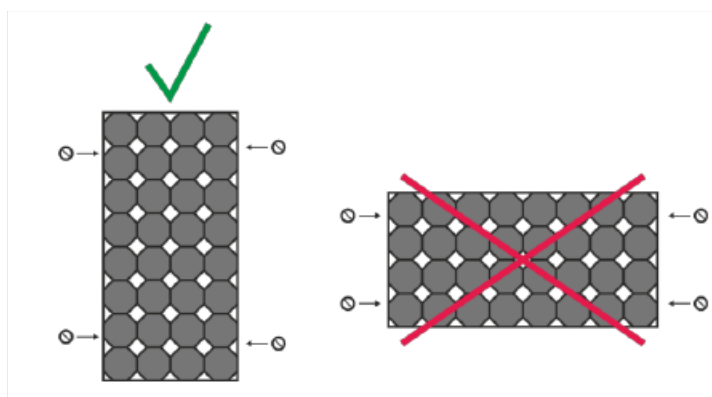


Рисунок 5.3 – Правильне розташування сонячної панелі при кріпленні.

Кріплення сонячних батарей може здійснюватися кількома способами, зокрема використанням притискних фіксаторів або з'єднання болтами через отвори у нижній частині рами.

Для закріплення необхідно використовувати лише спеціально визначені отвори в рамі панелі та використовувати з'єднання з матеріалів, стійких до корозії.

Розглянемо виконання підключення СБ.

Дроти для з'єднання повинні мати стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Для надійного герметичного з'єднання на кінцях проводів використовуються роз'єми стандарту MC4.

Перед підключенням сонячних батарей до системи завжди слід перевіряти вірність електромонтажу. Перевірка включає оцінку полярності та напруги

холостого ходу масиву сонячних батарей. Якщо ці значення відрізняються від паспортних, це може свідчити про неправильне з'єднання.

При з'єднанні сонячних батарей слід дотримуватися технічних вимог до максимальної напруги та допустимого струму, не перевищуючи технічні обмеження інших пристроїв. Важливо враховувати технічні вимоги виробників інвертора та контролера заряду.

Немає необхідності розбирати розподільну коробку сонячної батареї без наявності конкретних потреб. Панелі вже оснащені всіма необхідними дротами та з'єднувальними роз'ємами для зручного підключення до системи.

Для з'єднання рекомендується використовувати виключно мідні одножильні провідники з перерізом, який залежить від величини струму, але не менше 4 мм². Обов'язково є використання ізоляції, що стійка до ультрафіолетового випромінювання. При використанні проводу, що нестійкий до ультрафіолетового випромінювання, його слід обов'язково прокладати в спеціальній гофрі для зовнішньої установки.

Рекомендується прокладати дроти так, щоб вони уникали прямих сонячних променів, якщо це можливо. З'єднання провідників і конекторів виконується за допомогою пайки або спеціального обтискного інструменту.

Таким чином, загальна мета вимог техніки безпеки - запобігти травмам, забезпечити надійність робіт та максимізувати безпечність в усьому процесі монтажу та експлуатації сонячних панелей.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено дослідження підвищення ефективності функціонування сонячних панелей у складі трекерної системи.

З цією метою, на підставі проведеного аналізу сучасних видів сонячних панелей та динамічних трекерних систем, було обрано монокристалічні панелі Longi Solar потужністю 410 Вт. На рамі закріплено 16 панелей, тобто потужність установки складає 6,56 кВт. ККД такої панелі 21%. Рама з панелями кріпиться на двовісний трекер.

Для здійснення переміщення рухомої частини трекеру було вибрано основне обладнання: сервоперетворювач Lexium 32 D18N4, серводвигун ВМН 100 2Т (потужністю 0,75 кВт), редуктора GBX 160, черв'ячної передачі, програмований логічний контролер та інвертор.

Для керування положенням кута нахилу обрано автоматизовану систему керування, яка здійснює безперервне стеження за положенням Сонця. Це комбіновану слідкуючу систему, що має три режима роботи: безперервне стеження за допомогою фотодатчиків, у випадку виходу їх з ладу, включається алгоритм «дата», можливо ручне завдання кута.

На імітаційній моделі досліджено роботу синхронного двигуна з постійними магнітами. Моделювання проводилося в програмі MATLAB, бібліотеці Simulink. В результаті побудовані залежності кутової швидкості та моменту двигуна від часу.

Для оцінки ефективності роботи змодельованого сонячного трекера порівняно кількість виробляємої електроенергії змодельованою та стаціонарною системами. Вироблення електроенергії залежить від сонячної радіації, що надходить на панель. Для проведення розрахунків зібрані дані розподілу сонячної радіації для Кіровоградської області. Розрахунок виконувався для м. Кропивницький, що має широту 48° , довготу 32° та висоту над рівнем моря 114 м. Для виконання розрахунків було задіяно програму для розрахунку фотоелектричних систем PVsyst V6.43.

Були виконані дослідження впливу точності позиціонування на ефективність трекерної системи, для цього було прораховано декілька варіантів, при зміні кута стеження на 1° , 2° , 5° та 10° .

Виконані розрахунки дозволяють зробити висновки, що більший дохід приносить трекерні системи з більшою точністю позиціонування. При застосуванні найточнішого алгоритму керування, економічний ефект складає 26401 грн. порівняно зі стаціонарною СП та 762 грн. порівняно з точністю позиціонування ТС в 10° . Для точнішого визначення економічного ефекту, потрібно враховувати витрати, що виникають при експлуатації трекерної системи. Термін окупності такої ТС становить близько 7,8 року.

Застосування сонячних трекерів з комбінованим алгоритмом стеження за положенням Сонця дозволило підвищити рівень генерації електроенергії на 33 % порівняно зі стаціонарною системою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячна енергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://alteco.in.ua/technology/solar-energy>
2. Трекеры для солнечных электростанций [Electronic resource]. URL: <https://setech.in.ua/hotovi-rishennya/dostupn-elektrostants-na-treker/>
3. Система стеження за сонцем ST1500 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://greenchip.com.ua/169-0-0-1.html>
4. Сонячні трекери та електростанції. Динамічні системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ussolar.systems/ua/dinamichni-sistemi>
5. Сонячні панелі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://onlysolar.in.ua/katalog/soniachna-panel-longi-lr5-54hih-410m-410-vt/>
6. Каталог сонячних систем кріплення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.enfsolar.com/pv/mounting-system>
7. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. - К: Кондор. - 408 с.2005
8. Полікристалічні сонячні батареї [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://plusenergy.com.ua/ua/g17605391-polikristallicheskie-solnechnye-batarei>
9. Серводвигун з сервоперетворювачем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.electrocentr.com.ua/ru/products/motion-controls/schneider-electric/lexium/lexium32.html>
10. Розрахунок окупності сонячної панелі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eco-electrics.com.ua/articles/chi-varto-obzavoditis-vlasnoiu-soniachnoiu-elektrostantsieiu-pidrahuimo>
11. Програмний пакет PVsyst для вивчення фотоелектричних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pvsyst.com/software-evaluation/>

12. NASA Science [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://science.nasa.gov/>
13. Проект POWER [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov/>
14. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
15. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: розрахункова робота. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.Ф. Рєзцов, М.П. Кузнєцов, О.А. Мельник –Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 27 с.
16. Визначення кута висоти сонця [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mapgroup.com.ua/glavnaya/astronomicheskie-kalkulyatory/1005-azimut-i-vysota-polozhenie-solntsa-po-gorodam>
17. Мережевий інвертор SMA SUNNY TRIPOWER 7000TL-20 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kworum.com.ua/p/sunny-tripower-7000tl-20>
18. Astro Home Site [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://astro.km.ua/calendar/solar_risaset/2022/1
19. Poulek V, Libra M.. New bifacial solar trackers and tracking concentrators; 2007.
20. Сонячні трекери Konza [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.konzasolar.com/>
21. Трекєрні системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hanning-hew.com/en/products/hamatic-moving/>
22. Енергія природи: інформаційний портал про альтернативні джерела енергії у світі та Україні. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://alternative-energy.com.ua/>

23. Тарасенко А.Б. Техніко-економічні аспекти мережевої сонячної енергетики в Україні. / А.Б. Тарасенко, В.Л Кочаков, Е.Е.Терукова // Журнал технічної фізики. – 2014. – К. – 85-92 с.
24. Sharma P., Malhotra N. Solar Tracking System Using Microcontroller // Proc. 1st Int. Conf. Non Conv. Energy. 2014. P. 77–79.
25. Grover R. et al. A Competition-Based Approach for Undergraduate Mechatronics Education Using the Arduino Platform // 4th Interdiscip. Eng. Des. Educ. Conf. 2014. P. 78–83.
26. Mukul G. et al. Smart Solar Tracking System // Int. J. Eng. Res. Technol. 2015. Vol. 4, № 2. P. 367–369.
27. Normanyo E., Awingo A. A Solar Radiation Tracker for Solar Energy Optimisation // Br. J. Appl. Sci. Technol. 2016. Vol. 14, № 4. P. 1–12.
28. Elsherbiny M.S. et al. Design Of Single-Axis And Dual-Axis Solar Tracking Systems Protected Against High Wind Speeds // Int. J. Sci. Technol. Res. 2017. Vol. 6, № 09. P. 84–89.
29. Brandemurhl, M.J.; Beckman, W.A. Transmission of Diffuse Radiation through CPC and Flat Plate Collector Glazing. Sol. Energy 1980, 24, 511–513.
30. Dubey, S.; Sarvaiya, J.N.; Seshadri, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and its Effect on PV Production in the World—Review. Energy Procedia 2013, 33, 311–321.
31. Ekoplaki, E.; Palyvos, J.A. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. Sol. Energy 2009, 83, 614–624.