

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
Навчально-науковий інститут електроенергетики
(інститут)
Електротехнічний факультет
(факультет)
Кафедра кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студент Іванський Ілля Іванович
(ПІБ)

академічної групи 151М-22-1
(шифр)

спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(офіційна назва)

на тему Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки
(назва за наказом ректора)

Консультанти	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Керівник кваліфікаційної роботи	проф. Бубліков А.В.			
розділів:				
Стан питання та постановка завдання	проф. Бубліков А.В.			
Спеціальна частина	проф. Бубліков А.В.			
Економічна частина	ст. викл. Яремчук І.О.			
Охорона праці	проф. Чеберячко Ю.І.			
Рецензент				
Нормоконтролер	проф. Бубліков А.В.			

Дніпро
2023

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
кіберфізичних та
інформаційно-вимірювальних систем
(повна назва)

_____ Бубліков А.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

«_____» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

студенту Іванському І. І. академічної групи 151М-22-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
за освітньо-професійною програмою 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(офіційна назва)

на тему Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 13.11.2023 р. №1372-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання та постановка завдання	На основі матеріалів виробничих практик, інших науково-технічних джерел сформулювати наукове завдання, конкретизувати предмет та мету досліджень	01.09.23 – 14.09.23
Спеціальна частина	Обґрунтувати теоретичну базу розв'язання наукового завдання, якому присвячено роботу Провести синтез системи та її дослідження із використанням обґрунтованих методів та інструментів Розробити програмне забезпечення системи керування на підставі запропонованого алгоритмічного забезпечення	15.09.23 – 14.11.23
Економічна частина	Обґрунтувати доцільність витрат на створення та експлуатацію системи керування	15.11.23 – 24.11.23
Охорона праці	Розробити організаційно-технічні заходи щодо реалізації правил безпеки при експлуатації системи	25.11.23 – 05.12.23

Завдання видано

(підпис керівника)

проф. Бубліков А.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі

01.09.2023

Дата подання до атестаційної комісії

10.12.2023

Прийнято до виконання

(підпис студента)

Іванський І.І.

(прізвище, ініціали)

Реферат

Об'єкт дослідження – система автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки.

Предмет дослідження – закони автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки.

Проведений аналіз сонячної установки як об'єкта автоматизації та за його результатами сформовані вимоги щодо якості функціонування системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки.

Запропонований новий емпіричний алгоритм пошуку максимального екстремуму генерованої сонячною панеллю потужності. Цей алгоритм заснований на покроковій та дискретній зміні координат в горизонтальній та вертикальній площинах з наступним аналізом значень потужності на два кроки назад. Протягом досліджень виявлені нові закономірності зміни у часі генерованої сонячною панеллю потужності в залежності від просторового положення панелі для сонячної та хмарної погоди. Дані закономірності використані дозволили підтвердити ефективність запропонованого алгоритму автоматичного керування положенням сонячної панелі.

На основі створеної імітаційної моделі системи автоматичного керування положенням сонячної панелі проведений обчислювальний експеримент, що підтвердив якість функціонування системи автоматичного керування за умови імітування реальних умов роботи сонячної установки.

Із використанням мови програмування пакету MATLAB створено програмне забезпечення системи автоматичного керування з перевіркою коректності його функціонування.

Ключові слова: *сонячна установка, синтез системи автоматичного керування, імітаційна модель, MATLAB.*

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОК – об'єкт керування

САК – система автоматичного керування

ФЕ – фотоелектрична установка

ПЛК – програмований логічний контролер

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

СЕС – сонячна електростанція

ФМ – фотоелектричний модуль

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Стан питання та постановка завдання	10
1.1 Галузь промисловості	10
1.2 Технологічний процес	11
1.3 Об'єкт управління	13
1.4 Аналіз існуючих рішень	14
1.5 Порівняльний аналіз принципів керування об'єкту автоматизації	20
1.5.1 Обурення та спостереження	22
1.5.2 Метод зростаючої провідності	23
1.5.3 Метод струмової розгортки	23
1.5.4 Метод постійної напруги	23
1.5.5 Порівняння методів	24
1.5 Формулювання задачі дослідження	25
2. Спеціальна частина	26
2.1 Модель системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки	26
2.2 Синтез та розробка програмного забезпечення системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки	34
2.3 Дослідження системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки	44
2.4 Висновки по розділу	50
3. Економічна частина	51
4. Охорона праці та безпека у надзвичайній ситуації	60
Висновки	67
Перелік посилань	68

Вступ

Актуальність. Сонячні електростанції, які ще кілька років тому можна було зустріти тільки на півдні України, стали поширеним новим бізнесом практично у кожному регіоні. Перед війною, наприклад у 2017 році, за даними Держенергоефективності загальна потужність введених в експлуатацію сонячних електростанцій (СЕС), склала 211 МВт, що в 2 рази більше ніж у попередньому році. На нинішній день більша частина фотоелектричних модулів використовується як для вироблення електроенергії в побуті, так і для індустріальних цілей. Проте, статистика по використанню сонячного випромінювання для цілей енергетики свідчить про економічну неефективність і комерційну непривабливість фотоелектричних модулів (надалі ФМ) в зв'язку з їх ціною на ринку. Зниження вартості виробництва електроенергії можливо двома способами: зниження вартості власне ФМ та підвищення ефективності вироблення енергії. У розрізі даного дослідження мова йде про другий спосіб, для реалізації якого фотоелементи обладнуються системою стеження за Сонцем, що дає найкраще співвідношення вартості до ефективності.

Головною величиною, що впливає на вироблену потужність ФМ, є кут падіння сонячних променів на його поверхню, навіть за найефективнішого стаціонарного встановлення ФМ, втрати вихідної потужності становлять до 50% у порівнянні з безперервним орієнтуванням на Сонце. Застосування систем стеження дозволяє змінювати кут нахилу ФМ протягом дня таким чином, щоб зберігати прямий кут падіння сонячних променів на його поверхню. Це дозволяє збільшити кількість отриманого випромінювання, а, отже, і величину потужності, що виробляється. Головною перевагою даного способу є те, що він підходить для вже працюючих СЕС, для цього потрібно лише внести зміни в опорну конструкцію ФМ.

Постановка завдання дослідження.

Наразі для визначення траєкторії стеження на панелі встановлюється сонячний трекер - пристрій, призначений для відстеження положення сонця і

орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від батарей. Робота трекерів заснована на математичній астрономічній моделі, яка на основі знання про астрономічний час та координати СЕС дає можливість розрахувати кут падіння сонячних променів на поверхню землі. Але, це передбачає додаткові витрати, крім того потребує використання GPS-навігації. Щоб уникнути цього, сонячну панель можна використовувати, умовно кажучи, як давач виробленої панеллю потужності, відслідковуючи таким чином таке просторове положення панелі, яке забезпечує максимальну згенеровану потужність.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у підвищенні енергоефективності ФМ за рахунок створення алгоритму автоматичного керування просторовим положенням сонячної панелі на основі аналізу генерованої потужності. Головним критерієм якості роботи системи автоматичного керування є величина коефіцієнта корисної дії ФМ.

Для досягнення поставленої мети сформовані такі **наукові задачі**:

- створити імітаційну модель системи автоматичного керування просторовим положенням ФМ;
- запропонувати новий алгоритм пошуку оптимального положення сонячної панелі за критерієм максимуму виробленої ФМ електроенергії на основі аналізу заміряної генерованої потужності з урахуванням її різких перепадів через хмарність;
- провести дослідження режимів роботи синтезованої системи керування просторовим положенням сонячної панелі, що відповідає реальним умовам роботи ФМ з точки зору дії збурень.

Інструмент дослідження. Для дослідження алгоритмів автоматичного керування просторовим положенням сонячної панелі у застосунку Simulink математичного пакету MATLAB розроблена імітаційна модель системи автоматичного керування.

Запропоноване рішення поставленого завдання. За умови аналізу відомих алгоритмів оптимізації з метою синтезу системи автоматичного

керування положенням сонячної фотоелектричної установки були визначені наступні особливості процедури пошуку екстремуму залежності потужності, генерованої сонячною панеллю, від її положення:

1. Оптимізована функція, що описує залежність потужності на виході батареї, формується поступово у часі з повільною динамікою.

2. Ми завжди будемо знаходитися в початковій точці, відносно якої напрям максимального екстремуму є відомим.

З оглядом на це, в цій роботі запропонований емпіричний алгоритм пошуку максимального екстремуму потужності, генерованої сонячною панеллю, в залежності від двох змінних – кутів обертання панелі у горизонтальній та вертикальній площинах.

Запропонований новий алгоритм адаптований під хмарну погоду, коли спостерігаються різкі “провали” потужності.

Результати проведених досліджень. Проведене моделювання роботи сонячної фотоелектричної установки при нерухомій позиції панелі. Результати моделювання свідчать про коректну роботу моделі об’єкта керування: за умови руху сонця через зміну кута нахилу сонячних променів змінюється потужність, генерована панеллю. Спочатку вона зростає, коли сонце не досягло позиції, коли воно та панель знаходяться в одній площині за азимутом, а потім починає зменшуватись. Таким чином, спостерігається явно виражений максимальний екстремум. Далі проведене моделювання роботи сонячної установки, коли положення панелі визначається за запропонованим алгоритмом за умови сонячного дня. Результати дослідження дозволили зробити висновок про ефективність запропонованого алгоритму: потужність змінюється у вузькому діапазоні поблизу свого максимального значення 100%. Коливання потужності зумовлені встановленим діапазоном $\pm 2,5\%$, коли сонячна панель залишається нерухомою. Коригування положення панелі відбувається за умови виходу потужності з цього діапазону. Далі проведене моделювання роботи сонячної фотоелектричної установки за умови використання запропонованого алгоритму керування положенням панелі для випадку хмарного дня. Закриття сонця

хмарами імітовано шляхом випадкової зміни як величини зменшення потужності, так і тривалості цього зменшення. Результати дослідження дозволили зробити висновок, що запропонований алгоритм автоматичного керування положенням сонячної панелі залишається таким же ефективним і для випадку хмарної погоди. Після провалів потужності через перекриття сонця хмарами потужність після цього повертається до діапазону зміни значень 97 – 100%, і не виходить з нього, поки не настане наступне затьмарення сонця. Це означає, що алгоритм після паузи, що виникає через затьмарення сонця, продовжує працювати коректно. Наявність провалів потужності через закриття сонця хмарами не призводить до збою запропонованого алгоритму.

1. Стан питання та постановка завдання

1.1 Галузь промисловості

Сонячні електростанції, які ще кілька років тому можна було зустріти тільки на півдні України, стали поширеним новим бізнесом практично у кожному регіоні. Перед війною, наприклад у 2017 році, за даними Держенергоєфективності загальна потужність введених в експлуатацію сонячних електростанцій (СЕС), склала 211 МВт, що в 2 рази більше ніж у попередньому році [1]. На нинішній день більша частина фотоелектричних модулів використовується як для вироблення електроенергії в побуті, так і для індустріальних цілей. Проте, статистика по використанню сонячного випромінювання для цілей енергетики свідчить про економічну неефективність і комерційну непривабливість фотоелектричних модулів (надалі ФМ) в зв'язку з їх ціною на ринку. Зниження вартості виробництва електроенергії можливо двома способами: зниження вартості власне ФМ та підвищення ефективності вироблення енергії. У розрізі даного дослідження мова йде про другий спосіб, для реалізації якого фотоелементи обладнуються системою стеження за Сонцем, що дає найкраще співвідношення вартості до ефективності.

Головною величиною, що впливає на вироблену потужність ФМ, є кут падіння сонячних променів на його поверхню, навіть за найефективнішого стаціонарного встановлення ФМ, втрати вихідної потужності становлять до 50% у порівнянні з безперервним орієнтуванням на Сонце. Застосування систем стеження дозволяє змінювати кут нахилу ФМ протягом дня таким чином, щоб зберігати прямий кут падіння сонячних променів на його поверхню. Це дозволяє збільшити кількість отриманого випромінювання, а, отже, і величину потужності, що виробляється. Головною перевагою даного способу є те, що він підходить для вже працюючих СЕС, для цього потрібно лише внести зміни в опорну конструкцію ФМ.

1.2 Технологічний процес

Використання одно- та двоосьових трекерів (відстежувачів систем) та систем із змінним кутом нахилу фотоелектричних модулів дозволяє

оптимізувати кут падіння сонячних променів на модулі в залежності від часу доби та пори року. Сонячний трекер (Solar tracker) – пристрій, призначений для відстеження положення сонця та орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від сонячних батарей (або інших пристроїв, встановлених на трекері). Концепція трекера проста - за декількома датчиками контролер визначає оптимальне положення для сонячної батареї і змушує серводвигун повертати платформу з пристроєм у необхідну сторону.

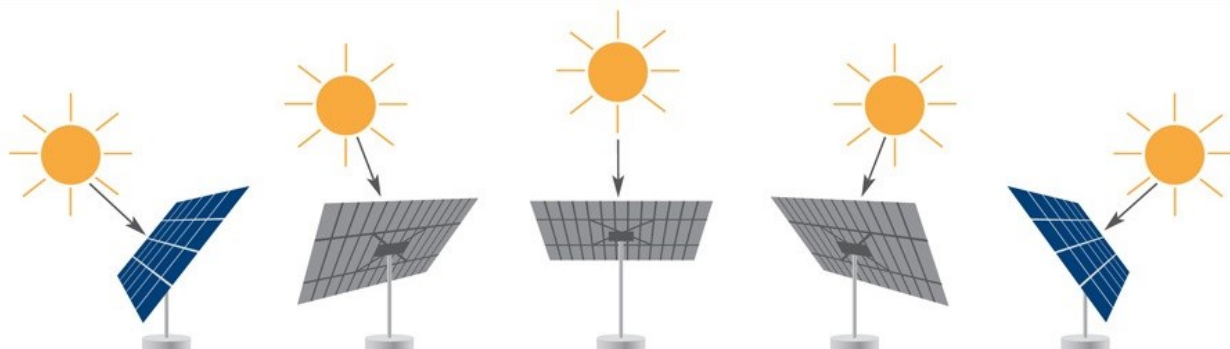


Рисунок 1.1 – Принцип роботи сонячного трекера

У розрізі використання таких пристроїв у фотоелектричних системах трекери застосовуються для відстеження положення сонця та періодичного повороту сонячних панелей для максимізації вироблення електроенергії протягом дня. Даний графік (рис.1.2) відображає залежність величини втрат під час вироблення електроенергії сонячними панелями та величини кута відхилення від оптимального положення площини панелі. З графіка залежності видно, що трекер з точністю $\pm 5^\circ$ забезпечує уловлювання панеллю понад 99,6% енергії прямих променів і 100% від розсіяного світла.

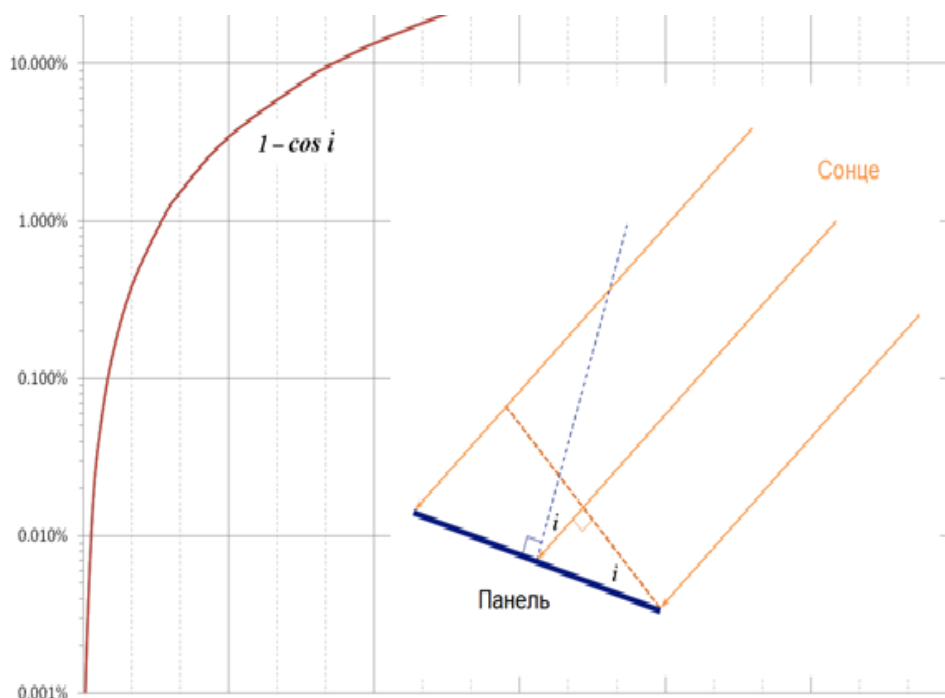


Рисунок 1.2 – Графік величини втрат залежно від кута падіння сонячних променів на площину панелі

Враховуючи особливості щоденної траєкторії руху сонця, можна сказати, що ефективний кут повороту панелей – близько 150° . Панель, яка зафіксована в напрямку рівно по середині між точками заходу сонця і сходу втрачає до 75% від максимально можливого вироблення в ранковий і вечірній час. Окрім денного руху зі сходу на захід сонце здійснює сезонне переміщення між північною та південною сторонами світла на 46° . Панель, спрямована на середню точку між сезонними крайніми положеннями траєкторії сонця, зазнає втрат близько 8,3%. Таким чином, для досягнення максимального ефекту від використання сонячних батарей необхідно повертати їх, спрямовуючи в таке положення, яке забезпечить найбільший виробіток електроенергії. Постійне повертання сонячних модулів слідом за сонцем для отримання максимального вироблення електроенергії здійснюється за допомогою спеціально розроблених для цього пристроїв – трекерів. Трекери для фотоелектричних модулів бувають кількох конфігурацій, керуються різними алгоритмами під час вибору напрямку, мають різні приводні механізми. Незважаючи на масу можливих відмінностей

між трекерами, найчастіше вони поділяються на два типи – однокоординатні та двокоординатні. Однокоординатні трекери – це трекери, які використовують для стеження за сонцем лише один ступінь свободи. Вони жорстко закріплені на підставі, і в залежності від координат їх установки мають різну конструкцію.

1.3. Об'єкт управління

Головною частиною СУ є сонячна батарея, щоб зрозуміти важливість деяких елементів батареї розглянемо її структуру.



Рисунок 1.3 – Структура сонячної батареї

Сонячна батарея складається з наступних основних частин:

- алюмінієва рамка;
- загартоване скло з покриттям антивідблиску;
- передня ламінуюча плівка (EVA);
- елементи сонячної батареї, з'єднані з провідниками;
- задня ламінуюча плівка (EVA);
- задня захисна плівка (PET, TPE, TPT);
- з'єднання розпаювальних роз'ємів з діодами та запобіжниками.

Захисні діоди необхідні для запобігання перегріву та виходу з ладу частково затінених елементів сонячної панелі. Без них вся панель може вийти з ладу через вигорання одного з елементів.

Ламіновані плівки використовуються для повної герметизації елементів та їх щільного прилягання до скла (без повітряного зазору) з метою уникнути додаткового спотворення світла і, як наслідок, втрати потужності. Крім того, герметизація захищає елементи від атмосферних впливів та можливої корозії.

Як видно з рисунка вище, для того, щоб світло Сонця досягло елементів, йому необхідно пройти через скло та ламінування EVA. Таким чином, якість цих двох деталей дуже впливає на характеристики панелі. І якщо скло у більшості виробників не має значних відмінностей, а також не змінює своїх світлопропускних властивостей з часом, то плівка, що ламінує, буває різної якості.

Зниження потужності панелі з часом її експлуатації не пов'язане з самими елементами, а обумовлено, в основному, якістю плівки, що застосовується, тому при тривалому впливі ультрафіолетового випромінювання у нього погіршується прозорість. Відповідно, менше світла доходить до сонячних елементів і панель видає меншу потужність.

1.4. Аналіз існуючих рішень

Після різнобічного аналізу всіх елементів системи стало зрозуміло, що не всі способи та елементи підходять для вирішення поставленої задачі.

Для розробки системи трекінгу було розглянуто велику кількість різних одно- та двокоординатних трекерів. Серед них було вибрано кілька зразків для порівняння та огляду поточних рішень.

Трекер UST-AADAT

Трекер UST-AADAT виконаний у вигляді V-подібної несучої конструкції, розташованої на опорно-поворотному пристрої. Приводи осей – 2 трифазні двигуни. Управління здійснюється за допомогою блоку керування UST-DR-001.

До складу трекера входить мотостанція та 3 інвертори. При використанні PV-модулів потужністю 215 Вт максимальне виробництво одного повного комплексу енергосистеми з 64 модулів складе 13,76 кВт. Максимальна потужність енергосистеми: 15,480 кВт (72 PV-модулі по 215 Вт). З одного блоку управління вироблення електростанції, що складається з 64 трекерів, матимемо 960 кВт. Кількість блоків управління в електростанції не обмежена. Спостереження за сонцем здійснюється за алгоритмом сонячної позиції.



Рисунок 1.4 – Трекер UST-AADAT

Таблиця 1.1 – Характеристики трекера UST-AADAT

Осей обертання	2 (горизонтальна та вертикальна)
Робоча поверхня	96 кв.м.
Максимальна робоча поверхня	108 кв.м.
Потужність	13.76 кВт
Максимальна потужність	15480 кВт
Вертикальна ось обертання (азимутальні кути)	від -180° до 180°
Кут нахилу	від 0° до 76°
Двигуни с робочою напругою	380 В (трьохфазні)
Вага	3000 кг (без модулів та основи)
Максимальна вага модулів	1300 кг
Програмована система захисту від вітра	горизонтальне позиціонування на швидкості понад 70 км/год
Захист	від складних опадів, з переходом у вертикальне положення
Максимальна швидкість вітру	140 км/год
Температурний режим	від -40°C до +90°C

Трекер UST-VSAT



Рисунок 1.5 – Трекер UST-VSAT

Одноосьовий азимутальний трекер UST-VSAT з сезонною орієнтацією виконаний у вигляді несучої конструкції, розташованої на одноповоротному пристрої. Привід по азимуту – 1 трифазний двигун. Сезонна орієнтація зеніту здійснюється за допомогою гвинтових домкратів вручну. Управління: блок керування трекером UST-DR-001.

До складу трекера входить 3 інвертори. Корисне навантаження: PV, CPV, HSPV-модулі. При використанні PV-модулів потужністю 215 Вт максимальне виробництво одного повного комплекту енергосистеми з 72 модулів складе 15,48 кВт. Максимальна потужність енергосистеми: 17,415 кВт (91 PV-модуль 215 Вт). З одного блоку управління вироблення потужності електростанцією, що складається з 64 трекерів, становитиме 1114,56 кВт.

Кількість блоків керування в електростанції не обмежена. Спостереження за сонцем здійснюється за алгоритмом сонячної позиції.

Таблиця 1.2 – Характеристики трекера UST-VSAT

Осей обертання	1 (вертикальна)
Робоча поверхня	107,13 кв.м.
Максимальна робоча поверхня	135,4 кв.м.
Потужність	15.48 кВт
Максимальна потужність	17415 кВт
Вертикальна ось обертання (азимутальні кути)	від -180° до 180°
Кут нахилу	від 0° до 76°
Двигуни з робочою напругою	380 В (трьохфазні)
Вага	2500 кг (без модулів)
Максимальна вага модулів	1500 кг
Максимальна швидкість вітру	140 км/год
Температурний режим	від -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$

Трекер UST-PASAT-44



Рисунок 1.6 – Трекер UST-PASAT-44

Трекер UST-PASAT-44 складається з групи похилих осей по лінії північ-південь (полярна орієнтація), де обертаються PV-панелі (сонячні модулі). Усі осі з'єднані у вигляді передачі. МАХ робоча площа поверхні трекера – до 730 кв.м. При використанні PV-модулів потужністю 260 Вт максимальне вироблення одного повного комплексу енергосистеми складе 114,4 кВт. З одного блоку управління вироблення потужності електростанцією (64 трекери) складе 7,3216 МВт. Кількість блоків управління в електростанції не обмежена. Спостереження за сонцем здійснюється за алгоритмом сонячної позиції.

Таблиця 1.3 – Характеристики трекера UST-PASAT-44

Тип трекера	трекер с полярно орієнтованою віссю обертання - Polar aligned single axis trackers (PASAT)
Пікова потужність	до 114,4кВт (пікова потужність на трекере з однією віссю з модулями по 260 Вт - 2,6 кВт)
Максимальна кількість осей	44
Керування	блок керування трекером UST-DR-001
Захист від вітру	з використанням метеостанції
Кут нахилу	від 20° до 60°
Кути обертання	від 45° до -45°
Система обертання	електромеханічна
Система передачі руху	лінійна, керує 44 осями обертання
Потужність двигуна	0,75 кВт
Живлення	від інвертора енергосистеми
МАХ площа одного модуля	730 кв.м.
МАХ швидкість вітру	140 км/год

Вага без модулів	10500 кг
Вага енергосистеми	22820 кг

1.5 Порівняльний аналіз принципів керування об'єкту автоматизації

У сонячних трекерів є кілька алгоритмів вимірювання становища сонця. Перший спосіб ґрунтується на додаткових фотодатчиках, за допомогою яких визначають відхилення сонячної панелі в одну із сторін. На рисунку 1.7 представлена блок-схема логіки роботи такого способу. Така система відрізняється простотою виконання, мінімумом способів контролю та дешевизною. У той же момент вона не може працювати більш ніж на 1 осі, і є системою з малою точністю, через неідеальність фотодатчиків.

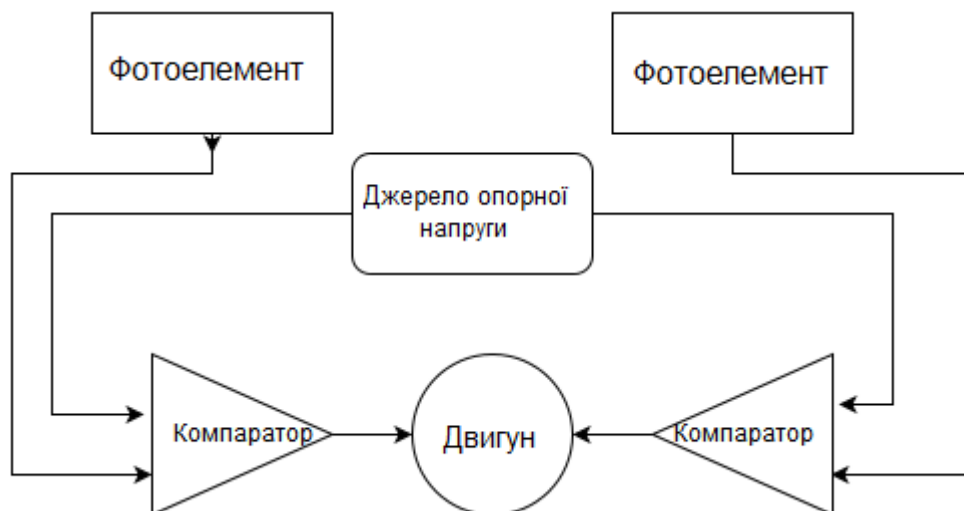


Рисунок 1.7 – Поворотна система на фотодатчиках

Другим способом є позиціонування сонячної панелі по заздалегідь відомим координатам і часу. Для цього використовується система GPS навігації, а в самому трекері зберігаються дані про положення сонця в кожний момент часу. Така система відрізняється точністю позиціонування, але дуже залежить від

якості зв'язку з супутниками системи GPS, а також чутлива до різного роду радіоперешкод.

Третій спосіб, один з найбільш розвинених, називається MPPT.

Відстеження точки максимальної потужності (ВТММ, англ. maximum power point tracking, MPPT) – це спосіб, що використовується для отримання максимальної можливої потужності на виході фотомодулів та вітроустановок. Для ВТММ використовуються цифрові пристрої, що аналізують вольт-амперну характеристику визначення оптимального режиму роботи фотомодуля. Мета пристрою відстеження точки максимальної потужності – виміряти вихідні характеристики фотоелемента та застосувати відповідний опір (навантаження) для отримання максимальної потужності за будь-яких умов навколишнього середовища. Подібні пристрої зазвичай інтегруються в перетворювач електричної енергії, який забезпечує перетворення струму або напруги, фільтрацію та керування різними навантаженнями, у тому числі електричними мережами, акумуляторними батареями або двигунами. Фотомодулі мають складний взаємозв'язок між умовами навколишнього середовища та максимальною потужністю, що виробляється. Коефіцієнт заповнення ($K_{\text{зап}}$) – це параметр, що визначає нелінійну електричну поведінку фотоелемента. Коефіцієнт заповнення визначається як відношення максимальної потужності фотомодуля до напруги холостого ходу $U_{\text{ХХ}}$ і струму короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$. У довідкових даних він часто використовується для визначення максимальної потужності, яку фотоелемент може забезпечити з оптимальним навантаженням за заданих умов: $P = K_{\text{зап}} \cdot U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}}$. Для більшості цілей знання $K_{\text{зап}}$, $U_{\text{ХХ}}$ і $I_{\text{КЗ}}$ достатньо, щоб дати корисну наближену модель електричної поведінки фотоелемента у типових умовах. Для будь-яких умов експлуатації фотоелементи мають одну робочу точку, в якій миттєві значення струму (I) і напруги (U) фотоелемента визначають миттєву потужність в робочій точці. Відповідно до закону Ома, ці значення відповідають конкретному опору навантаження, що еквівалентно U/I . Потужність P визначається за формулою $P = U \cdot I$. На корисній ділянці вольт-амперної характеристики фотоелемент діє джерелом постійного

струму [2]. В області максимальної потужності ВАХ фотоелемент має зворотну експоненційну залежність між струмом та напругою. З теоретичних основ електротехніки, потужність є оптимальною в місці, де похідна функції dI/dU ВАХ дорівнює і протилежна відношенню I/U (де $dP/dV = 0$). Це місце на вольт-амперній характеристиці називається точкою максимальної потужності (ТММ) і відповідає вигину кривої. Зворотна величина від навантаження з опором $R = V/I$ визначає максимальну потужність пристрою. Цей опір іноді називають характеристичним опором фотоелемента. Характеристичний опір – це динамічна величина, яка залежить від рівня інсоляції, температури, віку фотоелемента та інших факторів. Якщо опір більше або менше цієї величини, то вихідна потужність буде меншою за максимальну доступну потужність і, отже, фотоелемент не буде використовуватися з усією доступною ефективністю. Використовують різні типи ланцюгів керування для пошуку цієї точки таким чином, щоб отримати максимальну доступну потужність з фотоелемента. Контролери трекерів зазвичай використовують один із трьох алгоритмів для оптимізації вихідної потужності фотомодулів. У деяких пристроях для відстеження точки максимальної потужності реалізовано кілька алгоритмів і перемикання між алгоритмами ґрунтуються на робочих умовах масиву.

1.5.1 Обурення та спостереження

У цьому методі пристрій ВТММ на невелику величину змінює вхідний опір, внаслідок чого змінюється напруга сонячної установки і вимірює потужність, якщо потужність збільшується – контролер продовжує змінювати напругу в цьому напрямку, поки потужність не перестане збільшуватися. Цей метод є найпоширенішим, незважаючи на те, що він призводить до коливань потужності. Також цей метод згадується як метод сходження, тому що він залежить від кривої $P = f(U)$, яка зростає до точки максимальної потужності та зменшується після цієї точки. Поширеність цього методу обумовлена простотою його реалізації. Метод обурення та спостереження буде вискоєфективним, якщо забезпечити точний передбачуваний та адаптований алгоритм сходження.

1.5.2 Метод зростаючої провідності

У цьому методі контролер вимірює збільшення струму та напруги сонячної установки, щоб передбачити ефект від зміни напруги. Метод зростаючої провідності вимагає більше обчислень у контролері, але він може відслідковувати зміни умов швидше за метод обурення та спостереження (ViC). Як і метод ViC, він призводить до коливань потужності. Цей метод використовує зростаючу провідність (dI/dU) масиву фотомодулів для обчислення знаку зміни потужності по відношенню до напруги (dP/dU). Коли ці величини однакові ($I/V = I/\Delta V$), вихідна напруга є напругою максимальної потужності. Контролер підтримує цю напругу, доки не зміниться інсоляція, після зміни процес повторюється.

1.5.3. Метод струмової розгортки

Цей метод використовує сигнал розгортки струму масиву фотомодулів для оновлення ВАХ через фіксовані проміжки часу. Напруга максимальної потужності обчислюється за характеристикою з тією самою періодичністю.

1.5.4 Метод постійної напруги

Термін "метод постійної напруги" у відстеженні точки максимальної потужності використовується для опису різних технік різними авторами. Цим терміном називають метод, при якому вихідна напруга регулюється постійною величиною, незалежно від умов, або метод, в якому величина визначається відношенням поточної вихідної напруги до напруги холостого ходу (VOC). Деякі автори називають останній метод "напруга холостого ходу". Коли вихідна напруга масиву не змінюється, контролер не намагається відстежувати точку максимальної потужності, тобто строго кажучи, робоча точка не є точкою максимальної потужності. Але цей метод у складних випадках, коли інші методи помиляються, продовжує працювати, тому його іноді використовують разом з іншими методами. Керованим постійним коефіцієнтом, наприклад, є 0,76 від напруги холостого ходу $U_{ХХ}$. Як правило, це значення визначається як точка максимальної потужності або емпірично, або на основі моделювання для

очікуваних умов експлуатації. Таким чином, робоча точка масиву фотомодуля встановлюється поруч із точкою максимальної потужності шляхом регулювання напруги масиву та зіставлення його з фіксованою опорною напругою $V_{ref} = k_{VOC}$. Значення V_{ref} може бути налаштовуватися для того, щоб отримати оптимальну продуктивність по відношенню до інших факторів, у тому числі точки максимальної потужності, але основна ідея цієї методики в тому що V_{ref} визначається як відношення до V_{OC} . Одним із властивих наближень цього методу є те, що відношення напруги максимальної потужності до V_{OC} є приблизною постійною, і залишає простір для подальшої можливої оптимізації.

1.5.5 Порівняння методів

“Обурення та спостереження” та метод зростаючої провідності є прикладами методів «сходження», які можуть знайти локальний максимум потужності для робочого стану масиву і таким чином забезпечити справжню точку максимальної потужності. Метод обурення і спостереження може створювати коливання вихідної потужності масиву фотомодулів навіть при постійній інсоляції. Але цей метод при атмосферних умовах, що швидко змінюються, може працювати хаотично і створювати коливання потужності. Також, в порівнянні з методом O_iC , збільшується час обчислень через ускладнення алгоритму, що призводить до зниження частоти дискретизації на заздалегідь задану частину від вимірної напруги, як правило, близько 76%. На час, поки струм встановлений нульовим, втрачається вироблена енергія. Наведена величина відношення V_{MM}/V_{OC} , що дорівнює 76%, не завжди є точною. Метод постійної напруги, незважаючи на простоту реалізації, є неефективним і неточним через перерви в роботі, необхідні для визначення напруги холостого ходу. Проте ефективність деяких систем може досягати 95%.

1.5 Формулювання задачі дослідження

Наразі для визначення траєкторії стеження у більшості випадків на панелі встановлюється сонячний трекер – пристрій, призначений для відстеження положення сонця і орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від батарей. Робота трекерів заснована на математичній астрономічній моделі, яка на основі знання про астрономічний час та координати СЕС дає можливість розрахувати кут падіння сонячних променів на поверхню землі. Але, це передбачає додаткові витрати, крім того потребує використання GPS-навігації. Щоб уникнути цього, сонячну панель можна використовувати, умовно кажучи, як давач виробленої панеллю потужності, відслідковуючи таким чином таке просторове положення панелі, яке забезпечує максимальну згенеровану потужність.

Мета наукової роботи полягає у підвищенні енергоефективності ФМ за рахунок створення алгоритму автоматичного керування просторовим положенням сонячної панелі на основі аналізу генерованої потужності. Головним критерієм якості роботи системи автоматичного керування є величина коефіцієнта корисної дії ФМ.

Для досягнення поставленої мети сформовані такі наукові задачі:

- створити імітаційну модель системи автоматичного керування просторовим положенням ФМ;
- запропонувати новий алгоритм пошуку оптимального положення сонячної панелі за критерієм максимуму виробленої ФМ електроенергії на основі аналізу заміряної генерованої потужності з урахуванням її різких перепадів через хмарність;
- провести дослідження режимів роботи синтезованої системи керування просторовим положенням сонячної панелі, що відповідає реальним умовам роботи ФМ з точки зору дії збурень.

2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Модель системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

З метою синтезу й дослідження системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки в застосунку Simulink пакету MATLAB створена імітаційна модель системи керування, схема якої показана на рис.2.1.

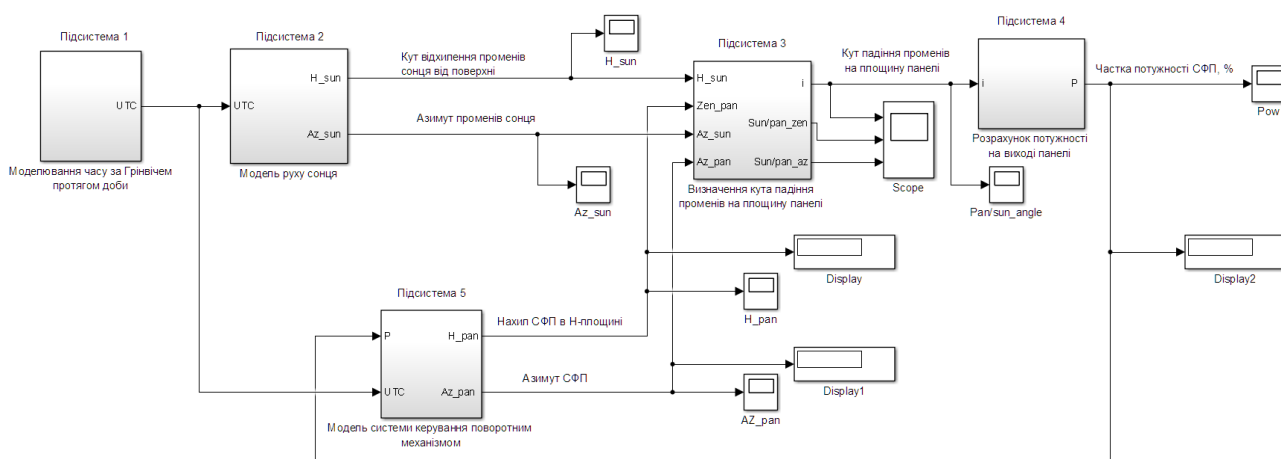


Рисунок 2.1 – Схема імітаційної моделі системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

Модель системи керування на рис.2.1 складається з п'яти основних частин (підсистем). Чотири з цих підсистем складають основу моделі об'єкта керування. Розглянемо їх більш детально, однак при цьому не зосереджуючись на описі відомих математичних формул, використаних для визначення положення сонця відносно землі та кута падіння сонячних променів на поверхню землі [3-8].

В першій підсистемі відбувається імітація зміни часу за Грінвічем. Тобто, часовий масштаб пакету MATLAB адаптується під інший часовий масштаб, який використовується зазвичай. Модель побудована на основі імпульсного

генератора та двох лічильників (рис.2.2). Виходом моделі є, відповідно, час за Грінвичем.

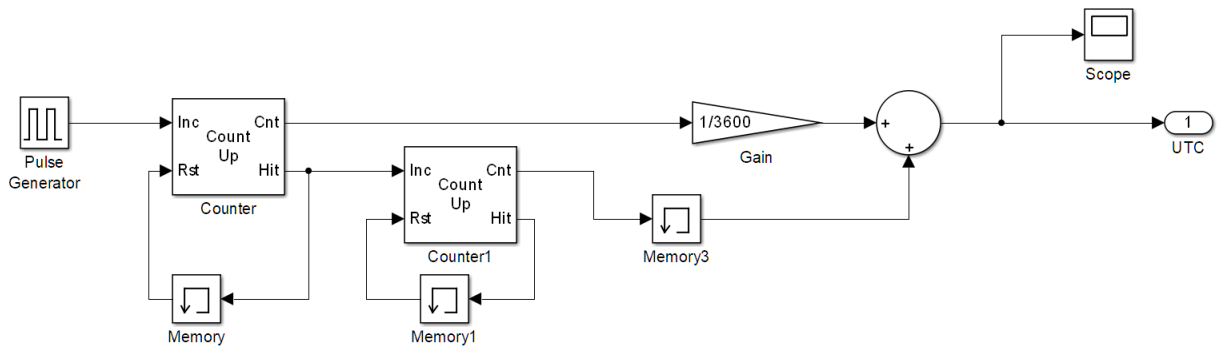


Рисунок 2.2 – Схема моделі імітування часу

В другій підсистемі (“Модель руху сонця”) реалізований давно відомий алгоритм відстеження положення Сонця у певний момент часу, що використовується в трекерних системах [7,8]. Вхідним параметром моделі є час за Грінвичем, координати точки спостереження, а також дата спостереження, а вихідними величинами є кути схилення γ (висота Сонця над горизонтом) та азимуту φ (відхилення від напрямку на північ) Сонця (рис. 2.3). В астрономії прийнято використовувати астрономічний азимут, що є кутом між об’єктом та напрямком на південь. Проте для спрощення сприйняття термінології у даній роботі будемо здійснювати відстеження Сонця за стандартним азимутом (на північ).

Схема моделі руху сонця показана на рис.2.4. Згідно з нею, спочатку визначається модифікована юліанська дата, яка є вхідним аргументом функції, що реалізує алгоритм розрахунку місцевого зоряного часу. Іншим необхідним вхідним аргументом для імітації руху сонця є його координати в еліптичній системі координат, що визначаються у відповідній функції на рис.2.4. В підсумковій функції моделі руху сонця, використовуючи розраховані та перелічені вище параметри, визначаються координати сонця в геоцентричній системі координат (рис.2.4), на основі яких, у свою чергу, обчислюються кути

нахилу променів сонця відносно поверхні землі у вертикальній та горизонтальній (азимут) площинах.

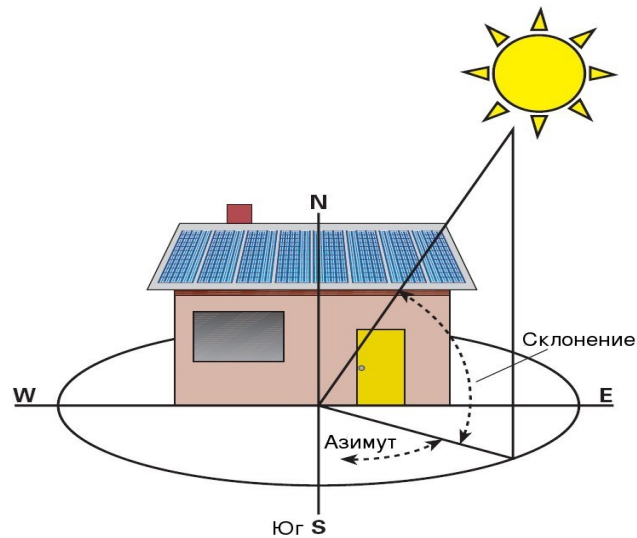


Рисунок 2.3 – Астрономічний азимут та схилення (висота) Сонця [8].

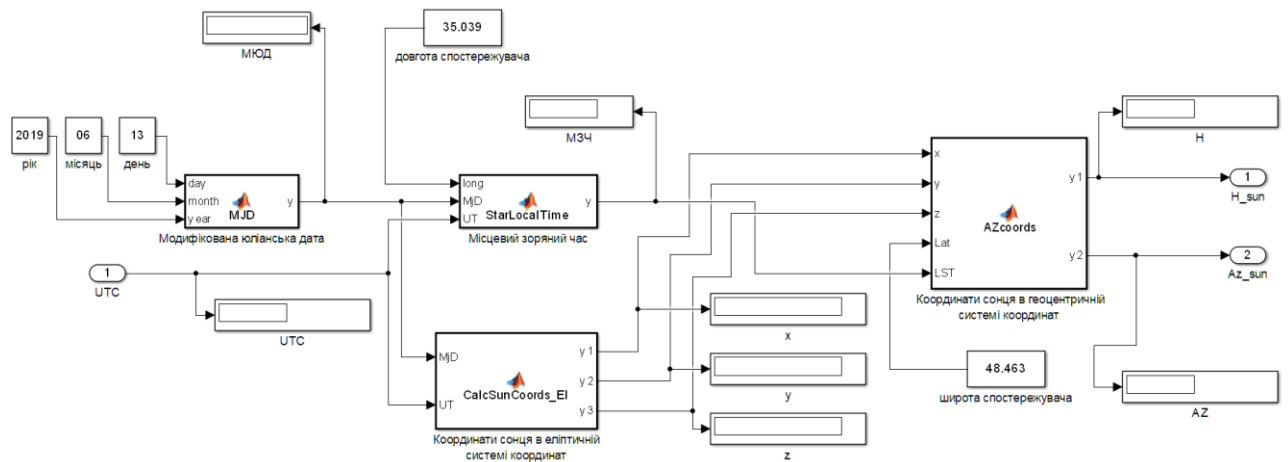


Рисунок 2.4 – Схема моделі руху сонця

Кути нахилу сонця відносно поверхні землі, а також кути нахилу сонячної панелі відносно поверхні землі дозволяють обчислити кут нахилу променів сонця відносно поверхні панелі. Це відбувається в підсистемі з відповідною назвою на рис.2.1. Схема, що закладена в цю підсистему, реалізована в застосунку Simulink та показана на рис.2.5

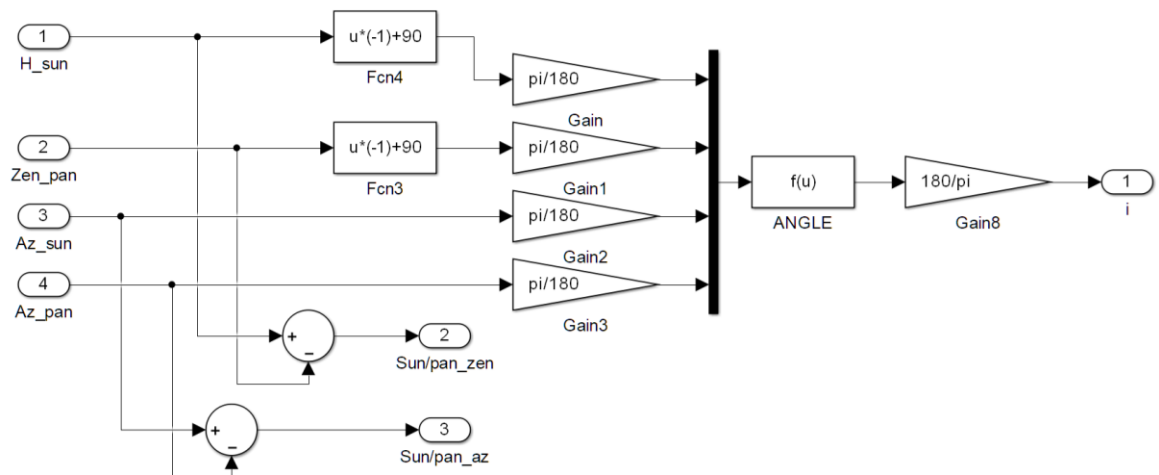


Рисунок 2.5 – Схема підсистеми для визначення кута нахилу променів відносно площини сонячної панелі

В основі алгоритму знаходження кута γ між площиною панелі та напрямком падіння сонячних променів є формула скалярного добутку векторів:

$$\cos \alpha = \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|}.$$

Вхідними параметрами даного алгоритму є кути $\alpha_{\text{пан}}$, $\beta_{\text{пан}}$ та α_{sun} , β_{sun} . Це відповідно кути $Az_{\text{пан}}$, $H_{\text{пан}}$ та Az_{sun} , H_{sun} , які були отримані із попередніх блоків (див. рис.2.1).

Прийmemo нормаль до площини панелі за одиничний вектор \bar{n} , $|\bar{n}| = 1$, а напрямком падіння сонячних променів за одиничний вектор \bar{m} , $|\bar{m}| = 1$. Тоді:

$$\cos \gamma = \frac{\bar{n} \cdot \bar{m}}{|\bar{n}| \cdot |\bar{m}|} \quad (2.1)$$

Визначимо координати векторів \bar{n} та \bar{m} . Для цього опустимо проекцію вектору \bar{n} на площину xy , отримуючи відрізок OK . З точки K проводимо

перпендикуляри на осі координат x та y , а з точки S на вісь z , отримуючи проєкції KA , KB та KC вектору \vec{n} на осі координат, а отже визначивши їх довжину, знайдемо координати вектору $\vec{n}(x,y,z)$.

Знаючи кути $\alpha_{\text{пан}}$ та $\beta_{\text{пан}}$ за допомогою простих тригонометричних рівнянь отримаємо координати вектору $\vec{n} - x, y, z$:

$$x = \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \beta_{\text{пан}}$$

$$y = \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \beta_{\text{пан}}$$

$$z = \cos \alpha_{\text{пан}}$$

Запишемо координати вектору \vec{n} :

$$\vec{n}^{\circ}(\sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \beta_{\text{пан}}, \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \beta_{\text{пан}}, \cos \alpha_{\text{пан}})$$

Аналогічним способом знайдемо та запишемо координати вектору \vec{m} :

$$\vec{m}^{\circ}(\sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \cos \beta_{\text{sun}}, \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \sin \beta_{\text{sun}}, \cos \alpha_{\text{sun}})$$

Підставивши отримані координати у формулу (2.1) отримаємо:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{\vec{n} \cdot \vec{m}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{m}|} = \\ &= \frac{\sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \beta_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \cos \beta_{\text{sun}} + \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \beta_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \sin \beta_{\text{sun}} + \cos \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \alpha_{\text{sun}}}{|1| \cdot |1|} \\ &= \\ &= \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot (\cos \beta_{\text{пан}} \cdot \cos \beta_{\text{sun}} + \sin \beta_{\text{пан}} \cdot \sin \beta_{\text{sun}}) \\ &\quad + \cos \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \alpha_{\text{sun}} = \\ &= \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \cos(\beta_{\text{sun}} - \beta_{\text{пан}}) + \cos \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \alpha_{\text{sun}} \\ \cos \gamma &= \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \cos(\beta_{\text{sun}} - \beta_{\text{пан}}) + \cos \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \alpha_{\text{sun}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Отримана формула (2.2) визначає косинус між нормаллю панелі N та напрямком падіння сонячних променів S , проте оскільки необхідно знайти кут саме між площиною панелі та напрямком променів, необхідно формулу (2.2) застосувати до суміжного до γ кута $\varphi, \varphi = 90 - \gamma$, а отже кут між площиною панелі та вектором сонячних променів визначатиметься формулою:

$$\arcsin \gamma = \sin \alpha_{\text{пан}} \cdot \sin \alpha_{\text{sun}} \cdot \cos(\beta_{\text{sun}} - \beta_{\text{пан}}) + \cos \alpha_{\text{пан}} \cdot \cos \alpha_{\text{sun}}$$

Саме остання формула складає основу моделі на рис.2.5.

Остання з чотирьох підсистем моделі об'єкта керування призначена для визначення потужності, генерованої сонячною панеллю, у відносних одиницях у функції кута нахилу сонячних променів відносно поверхні панелі. Відповідно, ця підсистема має назву “Розрахунок потужності на виході панелі” (рис.2.1). Для визначення аналітичної залежності відносної потужності на виході панелі від кута падіння променів на її поверхню використана експериментальна характеристика, що показана на рис.2.6.

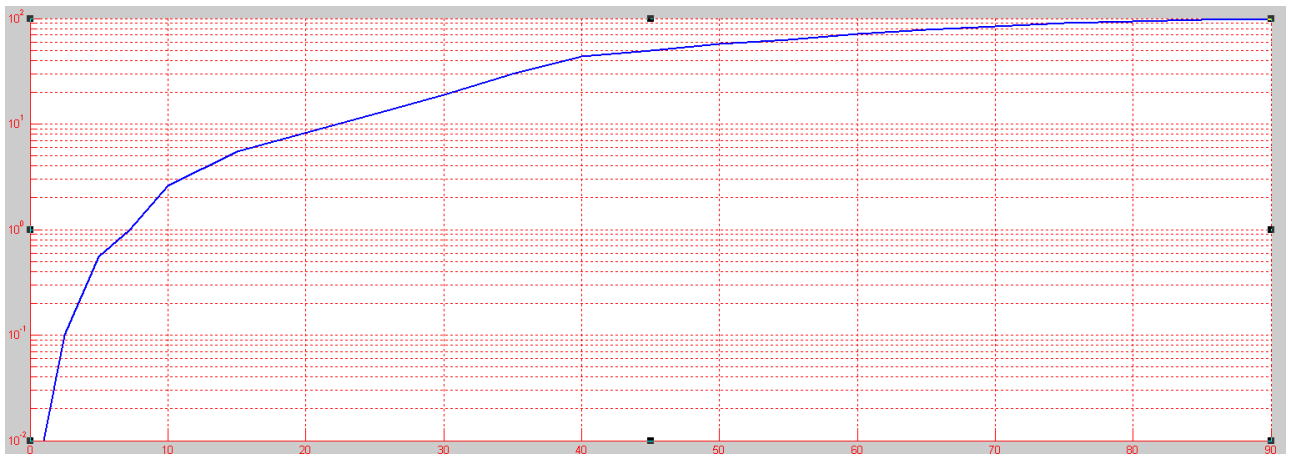


Рисунок 2.6 – Експериментально отримана залежність відносної потужності на виході сонячної панелі (вісь Y) від кута падіння променів на неї (вісь X)

Апроксимація проводилася за допомогою ступеневих поліномів. Результати апроксимації показані на рис.2.7 та рис.2.8. Для отримання прийнятної точності апроксимації експериментальну криву довелося розбити на дві частини, й кожен з частин апроксимувати окремо.

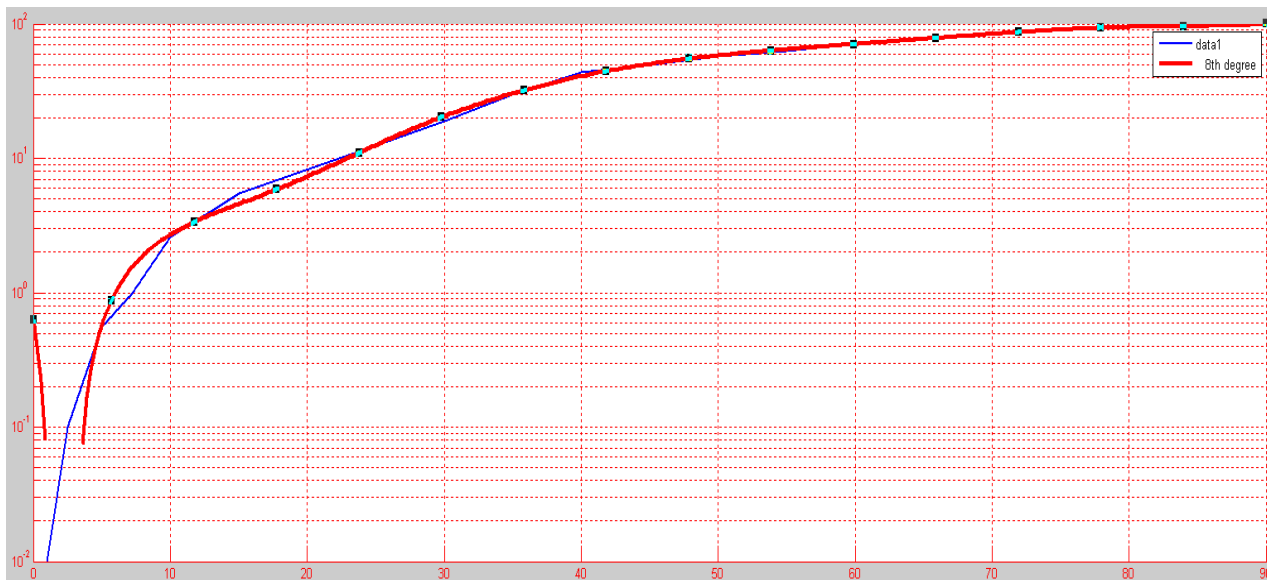


Рисунок 2.7 – Апроксимація експериментальної залежності від 90° до 4.2°

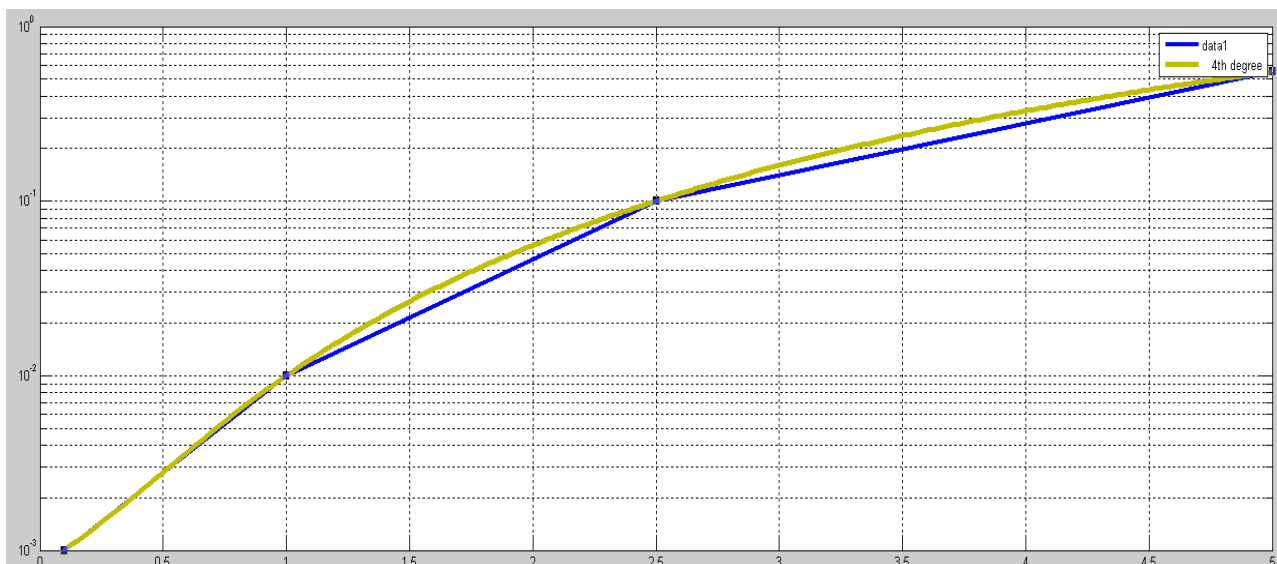


Рисунок 2.8 – Апроксимація експериментальної залежності від до 4.2° до 0°

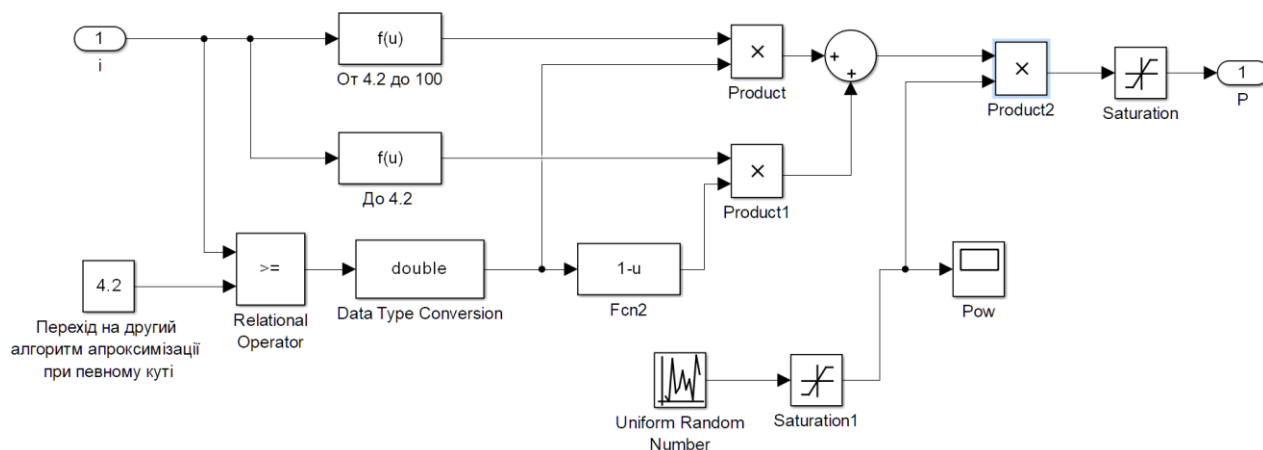


Рисунок 2.9 – Схема підсистеми розрахунку потужності, генерованої сонячною панеллю

На рис.2.9 показана реалізація в застосунку Simulink апроксимованої залежності потужності, генерованої сонячною панеллю, від кута падіння на поверхню панелі сонячних променів. Ця схема закладена в підсистему “Розрахунок потужності на виході панелі” на рис.2.1. Окрім цього, в цій схемі на основі генератора випадкових чисел реалізована імітація затьмарення сонця в хмарну погоду. При цьому відбувається суттєве зменшення потужності на величину, що визначається випадковим генератором.

2.2 Синтез та розробка програмного забезпечення системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

За умови аналізу відомих алгоритмів оптимізації з метою синтезу системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки були визначені наступні особливості процедури пошуку екстремуму залежності потужності, генерованої сонячною панеллю, від її положення:

1. Оптимізована функція, що описує залежність потужності на виході батареї, формується поступово у часі з повільною динамікою.
2. Ми завжди будемо знаходитися в початковій точці, відносно якої напрям максимального екстремуму є відомим.

З оглядом на це, в цій роботі запропонований емпіричний алгоритм пошуку максимального екстремуму потужності, генерованої сонячною панеллю, в залежності від двох змінних – кутів обертання панелі у горизонтальній та вертикальній площинах.

Запропонований новий алгоритм адаптований під хмарну погоду, коли спостерігаються різкі “провали” потужності, та в основі його закладені наступні положення:

1. Перед початком обґрунтовується крок зміни координат за горизонталлю та вертикаллю за попередньою теоретичною залежністю потужності від координат для конкретних умов. Приймається, що крок має бути таким, щоб відхилення поточної потужності від максимальної було не більше 2,5%.
2. Якщо відхилення поточної потужності від максимальної стало більше 2,5%, починається покрокове дискретне переміщення тільки за однією координатою (у горизонтальній площині), доки не відбудеться перетинання оптимуму. Після цього починається аналогічне переміщення за іншою координатою (у вертикальній площині).
3. Якщо під час переміщення у вертикальній площині виникає багатократне зменшення потужності (на декілька кроках), робиться висновок

щодо проходження zenіту. Після чого робиться переміщення панелі на крок назад, і запускається процедура пошуку екстремуму, але напрям переміщення панелі у вертикальній площині змінюється на протилежний.

4. За умови значного зменшення потужності через хмарність запам'ятовується останнє значення потужності до зменшення, та процедура пошуку екстремуму припиняється. За умови зникнення значного відхилення поточної потужності, генерованої панеллю, від збереженого значення пошук екстремуму починається заново.

На рис.2.10 показана схема алгоритму, що реалізує вище описані положення, у вигляді графу переходів.

Станами графу на рис.2.10 є:

I – стан спокою (переміщення сонячної панелі не відбувається);

II – переміщення сонячної панелі в горизонтальній площині;

III – переміщення сонячної панелі в вертикальній площині.

Розглянемо умови та дії переходів між станами схеми алгоритму на рис.2.10.

Умовою Переходу №1 є знаходження відхилення відносної поточної потужності від збереженого значення при переході зі стану 3 в стан 1 у межах $\pm 2,5\%$ (ширина цього діапазону може змінюватись і потрібно провести подальші дослідження впливу цього параметру на кількість електроенергії, яка вироблена сонячною панеллю за одиницю часу).

Ще однією умовою Переходу №1 є присутність значного відхилення відносної поточної потужності від збереженого значення при переході зі стану 3 в стан 1 більше 5% (цей граничний рівень може змінюватись і потрібно провести подальші дослідження впливу цього параметру на кількість електроенергії, яка вироблена сонячною панеллю за одиницю часу).

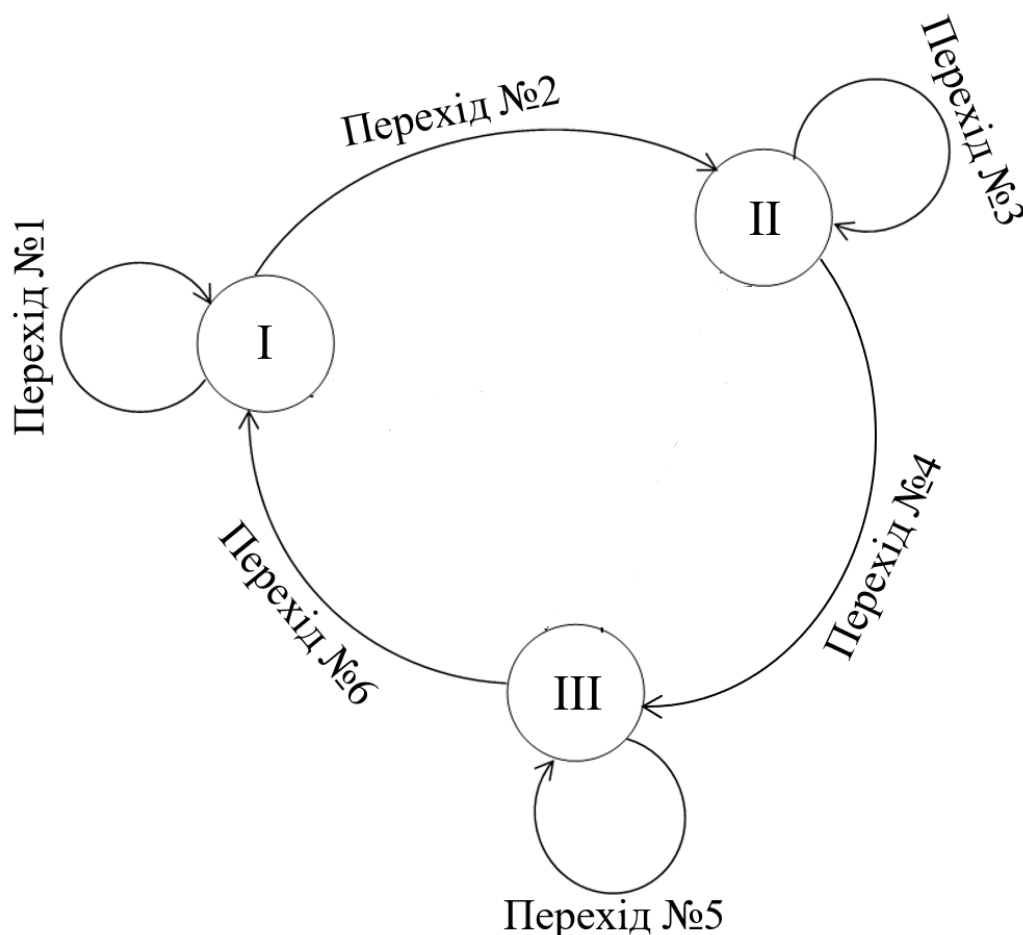


Рисунок 2.10 – Схема алгоритму автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

Дією в стані I є формування та постійне оновлення вектору значень заміряної потужності на поточному, попередньому та поза попередньому кроках виклику програми за умови, якщо немає значного відхилення відносної поточної потужності від збереженого значення при переході зі стану 3 в стан 1.

Умовою переходу зі стану 1 в стан 2 (Перехід №2 на рис.2.10) є знаходження відхилення відносної поточної потужності від збереженого значення при переході зі стану 3 в стан 1 в діапазоні значень від 2,5 до 5%. Дією цього переходу є зміна значення змінної, що відповідає стану II, з нуля на одиницю.

Умовою Переходу №3 на рис.2.10 є відсутність визначення максимального екстремуму залежності потужності від кута обертання сонячної

панелі в горизонтальній площині. Також умовою є присутність значного відхилення відносної поточної потужності від збереженого значення при переході зі стану 3 в стан 1. При виконанні останньої умови ніяких дій не відбувається при цьому переході. При першій умові відбувається збільшення кута обертання на крок (в роботі прийнято 1 град., але потрібно провести подальші дослідження впливу цього параметру на кількість електроенергії, яка вироблена сонячною панеллю за одиницю часу). Потім має місце очікування закінчення переміщення панелі та замірювання потужності. Після цього відбувається аналіз значень потужності на трьох останніх ітераціях з метою пошуку екстремуму.

Умовою Переходу №4 є визначення екстремуму залежності потужності від кута обертання панелі в горизонтальній площині. При цьому змінна, яка відповідає третьому стану, змінює своє значення з 0 на 1 (інші встановлюються в нуль).

Умовою Переходу №5 на рис.2.10 є відсутність проходження максимального екстремуму в залежності потужності від кута обертання панелі в вертикальній площині. Дією є пошук максимального екстремуму залежності потужності від кута обертання панелі в вертикальній площині. Алгоритм пошуку такий самий, як в стані II, тільки додана процедура перевірки проходження зеніту. Якщо на двох ітераціях поспіль при переміщенні панелі фіксується зменшення потужності, відбувається зміна напрямку переміщення панелі при пошуку максимального екстремуму.

Умовою Переходу №6 є визначення екстремуму залежності потужності від кута обертання панелі в вертикальній площині. При цьому змінна, яка відповідає першому стану, змінює своє значення з 0 на 1 (інші встановлюються в нуль).

Для реалізації запропонованого алгоритму автоматичного керування положенням сонячної панелі в застосунку Simulink пакету MATLAB як складова частина імітаційної моделі системи керування розроблена підсистема

(Модель системи керування поворотним механізмом на рис.2.1). Схема усередині цієї підсистеми представлена на рис.2.11.

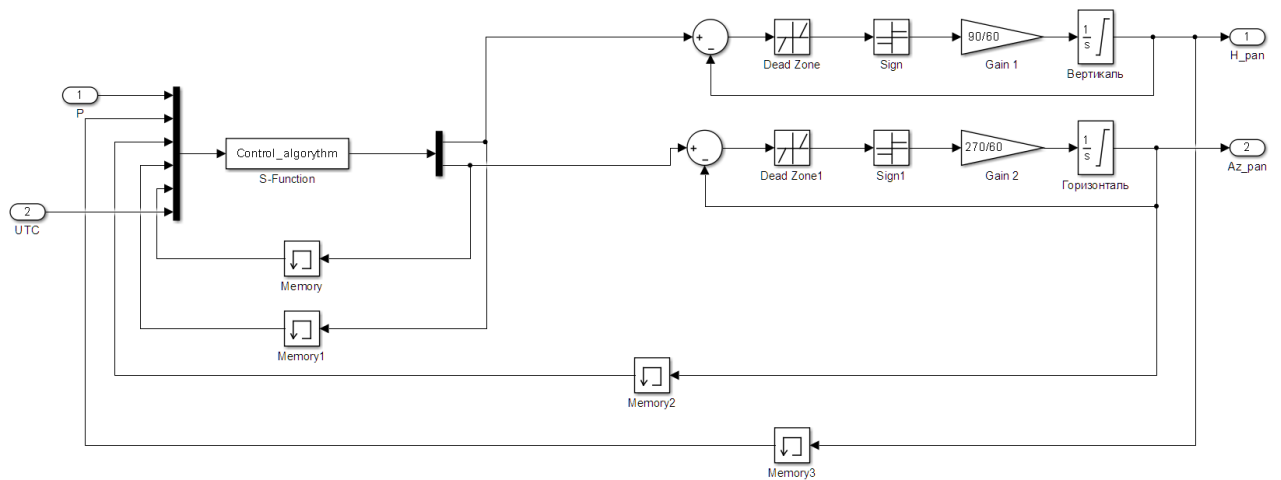


Рисунок 2.11 – Схема підсистеми, що реалізує алгоритм автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

У правій частині схеми на рис.2.11 реалізовані моделі локальних систем автоматичного керування кутами обертання панелі у горизонтальній та вертикальній площинах. Враховані технічні характеристики приводів механізму переміщення сонячної установки (повний хід за 1 хв.). Фактично модель привода механізму переміщення представлена інтегратором. Тобто, не враховані дуже малі інерційності приводів (постійна часу біля 0,1 с). Регулятор в цих локальних моделях реалізований за допомогою блоків Dead Zone та Sign. За рахунок мертвої зони маємо статичну похибку 0,01 град., яка не впливає на якість автоматичного керування положенням панелі.

Запропонований алгоритм автоматичного керування положенням панелі реалізований на основі s-функції “Control_alorythm”.

Розглянемо програмний код цієї функції.

Програма 2.1 – Алгоритм керування положенням сонячної панелі

Насамперед проводиться ініціалізація процедур s-функції. Використовується лише процедура mdlOutputs. При цьому задається крок виклику s-функції 1 с, шість вхідних та 2 вихідних аргументів:

```
function [sys,x0,str,ts] = Control_algorithm(t,x,u,flag)
```

```
switch flag,
```

```
case 0
```

```
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
```

```
case 3
```

```
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
```

```
case { 1, 2, 4, 9 }
```

```
    sys = [];
```

```
otherwise
```

```
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
```

```
sizes.NumDiscStates = 0;
```

```
sizes.NumOutputs = 2;
```

```
sizes.NumInputs = 6;
```

```
sizes.DirFeedthrough = 1;
```

```
sizes.NumSampleTimes = 1;
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
x0 = [];
```

```
str = [];
```

```
ts = [1 0];
```

Далі реалізований програмний код процедури mdlOutputs.

Спочатку проводиться ініціалізація змінних:

```

function sys = mdlOutputs(t,x,u)
%Введення змінних в програмі
%Змінні станів системи керування
global I_stan
global II_stan
global III_stan
%Поточне значення потужності
global P_
%Значення потужності на минулому кроці
global P_1
%Значення потужності на позаминулому кроці
global P_2
%Заморожене значення потужності
global P_hist
%Змінна напрямку руху сонця
global Zenit
%Уставка кута повороту панелі в горизонтальній площині (азимут)
global Az_set
%Уставка кута повороту панелі в вертикальній площині Н
global H_set
%Фактичний кут повороту панелі в горизонтальній площині (азимут)
global Az_
%Фактичний кут повороту панелі в вертикальній площині Н
global H_
%Змінна ітерацій при пошуку екстремуму
global iter
%Змінна режиму першого виходу на сонце
global mode

```

Далі йде програмний код, що реалізує оновлення потужності, генерованої панеллю, а також уставки й фактичні значення кутів обертання панелі в горизонтальній та вертикальній площинах:

```

%Оновлення значення потужності на поточному кроці
if(abs(P_hist-u(1))<5 || mode==0)
    P_=[P_ u(1)];
    if(length(P_)==4)
        P_(1)=[];
    end
end
%Оновлення уставки та фактичного кута азимуту

```



```

Az_=u(3);
Az_set=u(5);
%Оновлення уставки та фактичного кута в Н-площині
H_=u(2);
H_set=u(4);

```

Програмний код, що реалізує перехід зі стану 1 в стан 2:

```

%Перевірка умови переходу із стану 1 в стан 2
if(abs(P_hist-u(1)) > 2.5 && (abs(P_hist-u(1))<5 || mode==0) &&
length(P_)==3)
    II_stan=1;
end
%Дії при переході з 1 в 2
if(I_stan==1 && II_stan==1)
    I_stan=0;
end

```

Програмний код, що реалізує Перехід 3 на рис.2.10:

```

%Дії при перебуванні в стані 2
if(II_stan==1 && I_stan==0 && III_stan==0 && (abs(P_hist-u(1))<5 ||
mode==0))
    %Перевірка закінчення другого переміщення панелі
    if(abs(Az_set-Az_)<0.1 && length(P_)==3)
        %Перевірка умови проходження екстремуму
        if(P_(3)<P_(2) && P_(2)>P_(1))
            III_stan=1;
        else
            %Збільшення кута азимуту на крок
            Az_set=Az_set+1;
        end
    end
end
%Скидання стану 2, якщо відбувся провал потужності
if(abs(u(1)-P_hist) > 5 && mode==1 && II_stan==1)
    Az_set=Az_set-1;
    II_stan=0;
    I_stan=1;
end

```



```

if(Zenit==0)
    H_set=H_set-1;
end
if(Zenit==1)
    H_set=H_set+1;
end
III_stan=0;
I_stan=1;
end

```

І наприкінці програмний код, що реалізує перехід зі стану 3 в стан 1 (Перехід №6 на рис.2.10):

```

%Dії при переході з 3 в 1
if(I_stan==1 && III_stan==1)
    P_hist=P_(3);
    if(u(1)<90 && mode==0)
        P_hist=90;
    end
    if(u(1)>90 && mode==0)
        mode=1;
    end
    III_stan=0;
end
sys(1)=H_set;
sys(2)=Az_set;

```

2.3 Дослідження системи автоматичного керування положенням сонячної фотоелектричної установки

В цьому підрозділі проведено дослідження ефективності запропонованого алгоритму автоматичного керування положенням сонячної панелі за допомогою розробленої імітаційної моделі системи керування.

Спочатку проведено моделювання роботи сонячної фотоелектричної установки при нерухомій позиції панелі. Результат моделювання показаний на рис.2.12.

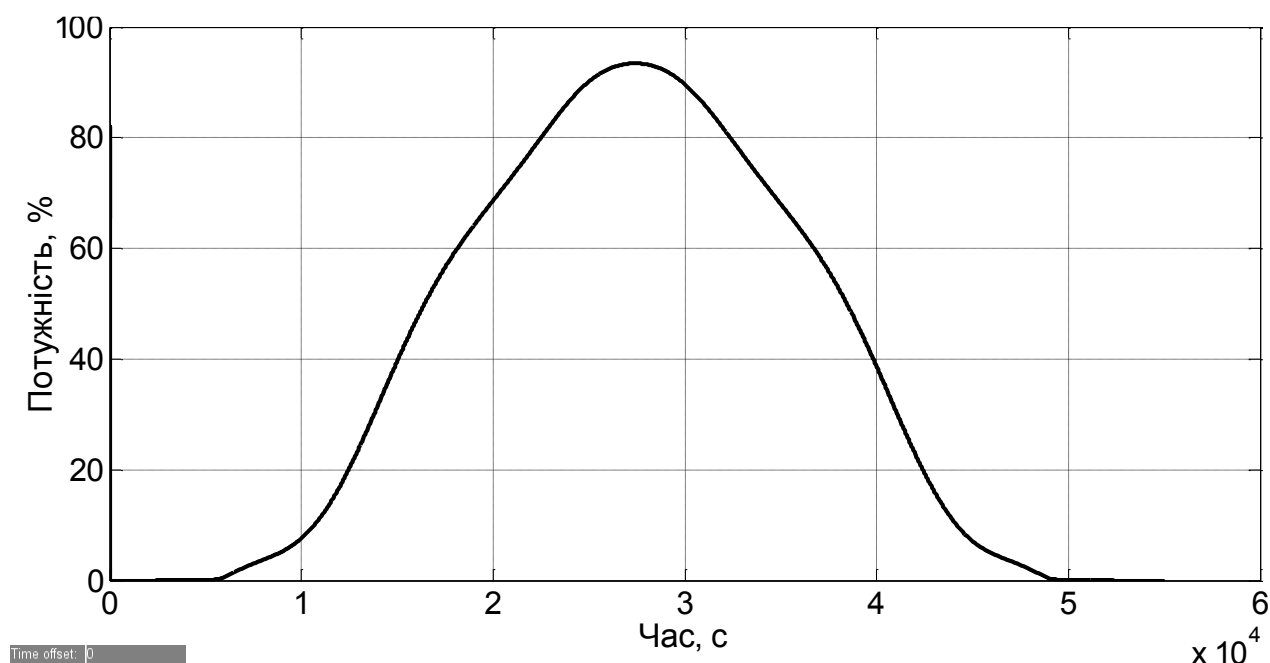


Рисунок 2.12 – Зміна у часі потужності, генерованої сонячною фотоелектричною установкою (нерухоме положення: 45 град. у вертикальній площині та 135 град. в горизонтальній площині)

З рис.2.12 можна зробити висновок про коректну роботу моделі об'єкта керування: ми бачимо, що за умови руху сонця через зміну кута нахилу сонячних променів змінюється потужність, генерована панеллю. Спочатку вона зростає, коли сонце не досягло позиції, коли воно та панель знаходяться в одній

площині за азимутом, а потім починає зменшуватись. Таким чином, спостерігається явно виражений максимальний екстремум. Потужність не досягає 100%, тому що кут нахилу панелі у вертикальній площині не є оптимальним.

Далі проведено моделювання роботи сонячної установки, коли положення панелі визначається за запропонованим алгоритмом (рис.2.13).

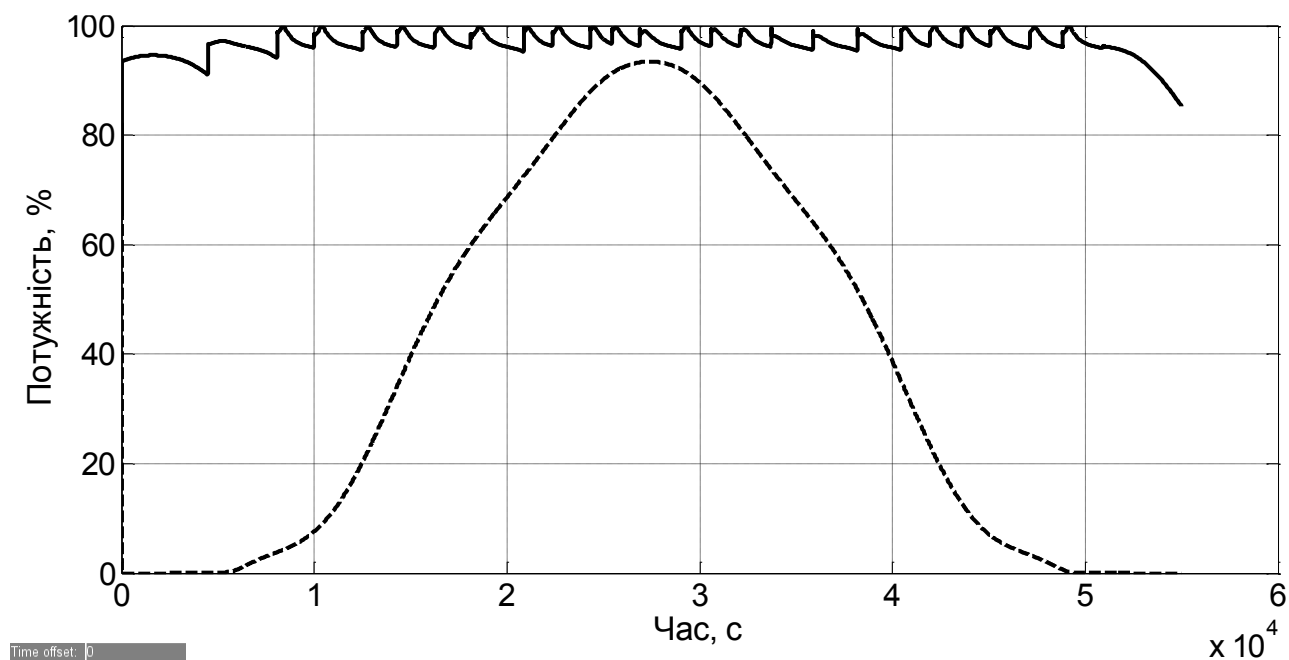


Рисунок 2.13 – Зміна у часі потужності, генерованої сонячною фотоелектричною установкою: пунктирна лінія – нерухоме положення панелі; суцільна лінія – рухоме положення панелі (без хмарності)

Результати моделювання на рис.2.13 представлені для сонячного дня, коли сонце не закривається хмарами. З рис. 2.13 можна зробити висновок про ефективність запропонованого алгоритму: потужність змінюється у вузькому діапазоні поблизу свого максимального значення 100%. Коливання потужності зумовлені встановленим діапазоном $\pm 2,5\%$, коли сонячна панель залишається нерухомою. Коригування положення панелі відбувається за умови виходу потужності з цього діапазону.

Взагалі ширина цього діапазону, який фактично визначає період коригування положення сонячної панелі у часі, має бути обґрунтована, а її вплив на кількість електроенергії, згенерованої панеллю за одиницю часу, має бути додатково досліджена. З однієї сторони, чим менше ширина даного діапазону, тим менше буде амплітуда коливання потужності, й більше її середнє значення. Отже, буде більше кількість згенерованої електроенергії. З іншої сторони, це призведе до більш частих рухів панелі, та збільшення електроенергії, яка витрачається приводами механізму переміщення сонячної установки. Тож, має бути певний оптимум за шириною діапазону, що визначає частоту коригувань положення панелі.

На рис.2.14 показана зміна у часі кута обертання сонячної панелі у горизонтальній площині при пошуку максимального екстремуму потужності. З рис.2.14 видно, що як період коригувань, так і величина зміни кута є змінними величинами. Більш інтенсивна зміна кута у горизонтальній площині відбувається посеред дня, коли сонце знаходиться на значній відстані від горизонту.

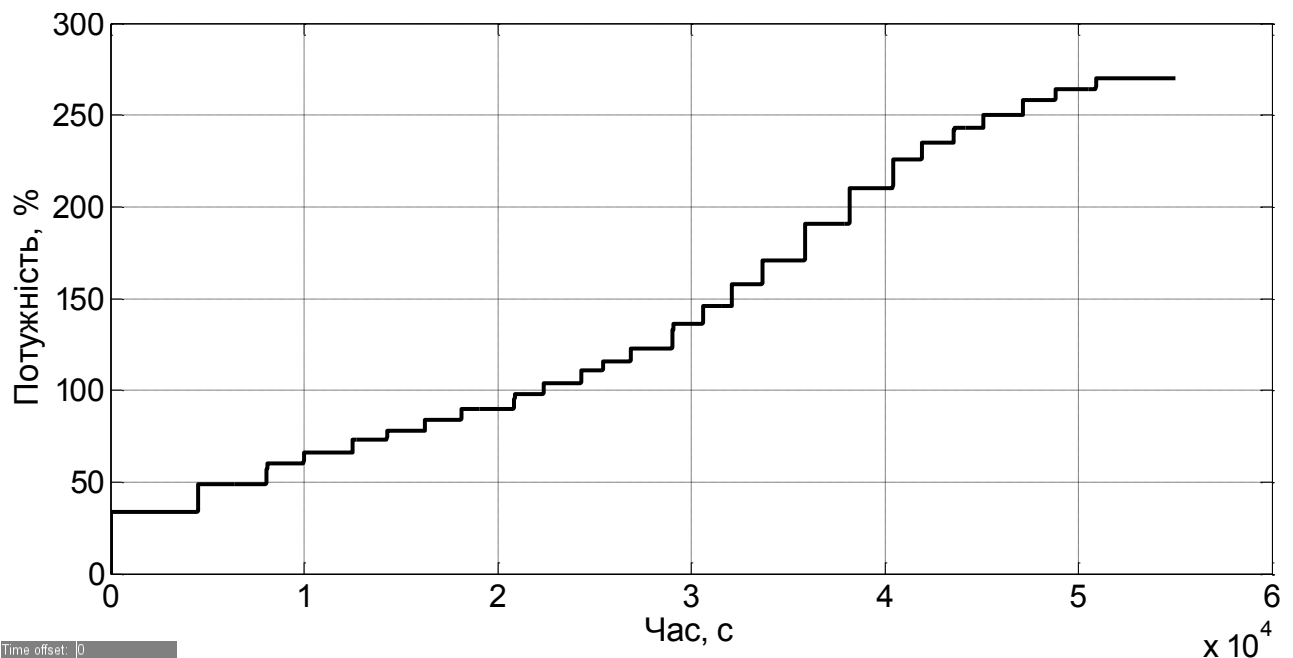


Рисунок 2.14 – Зміна у часі кута обертання панелі в горизонтальній площині (без хмарності)

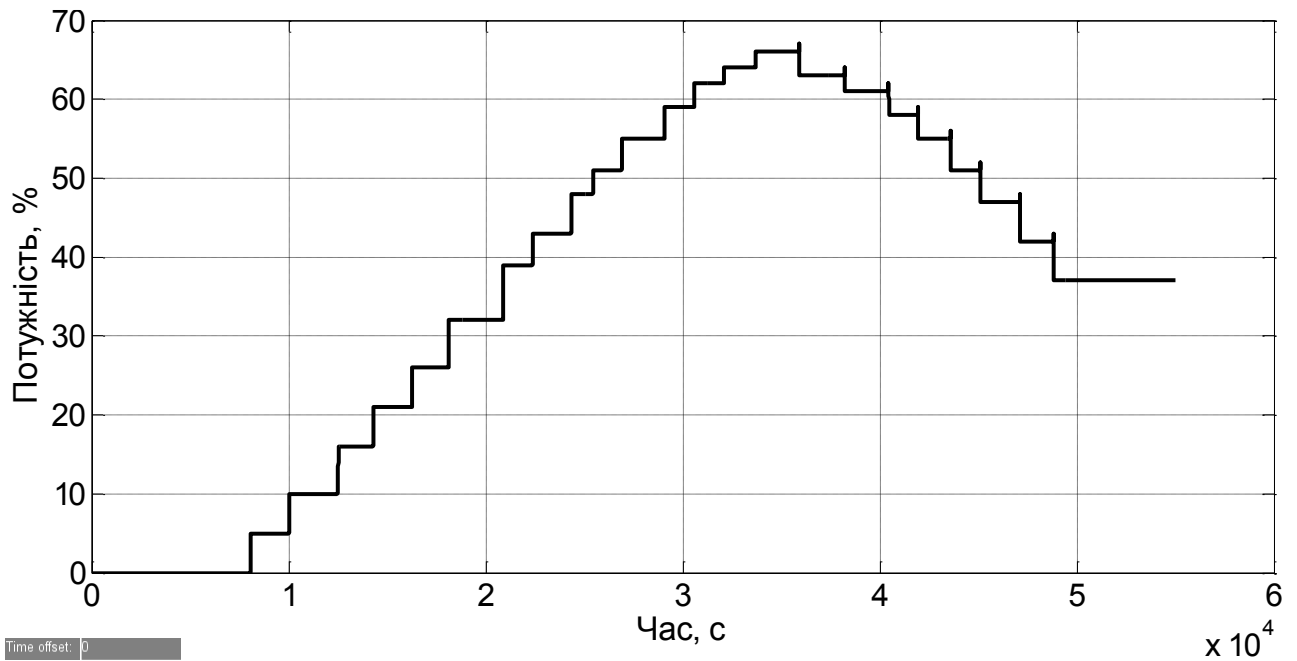


Рисунок 2.15 – Зміна у часі кута обертання панелі в вертикальній площині (без хмарності)

На рисунку 2.15 показана зміна у часі кута обертання сонячної панелі в вертикальній площині. Фактично ця характеристика повторює зміну висоти сонця відносно горизонту, і це логічно, оскільки згідно з запропонованим алгоритмом панель постійно йде за сонцем, повторюючи його траєкторію руху у небі, щоб його промені падали на поверхню панелі під кутом, близьким до 90 градусів.

Отже, запропонований алгоритм автоматичного керування підтвердив свою ефективність для випадку безхмарного дня.

Далі проведено моделювання роботи сонячної фотоелектричної установки за умови використання запропонованого алгоритму керування положенням панелі для випадку хмарного дня. Закриття сонця хмарами імітовано шляхом випадкової зміни як величини зменшення потужності, так і тривалості цього зменшення. На рис.2.16 періодичні моменти закриття сонця хмарами чітко простежуються.

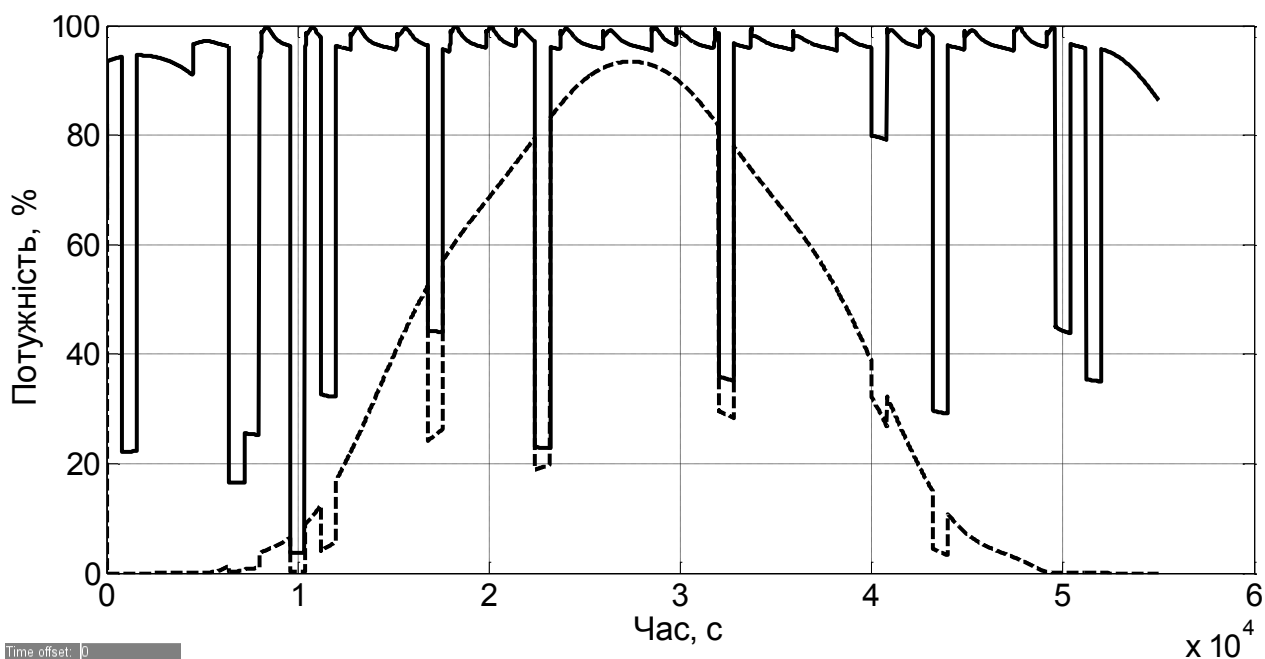


Рисунок 2.16 – Зміна у часі потужності, генерованої сонячною фотоелектричною установкою: пунктирна лінія – нерухоме положення панелі; суцільна лінія – рухоме положення панелі (з присутністю хмарності)

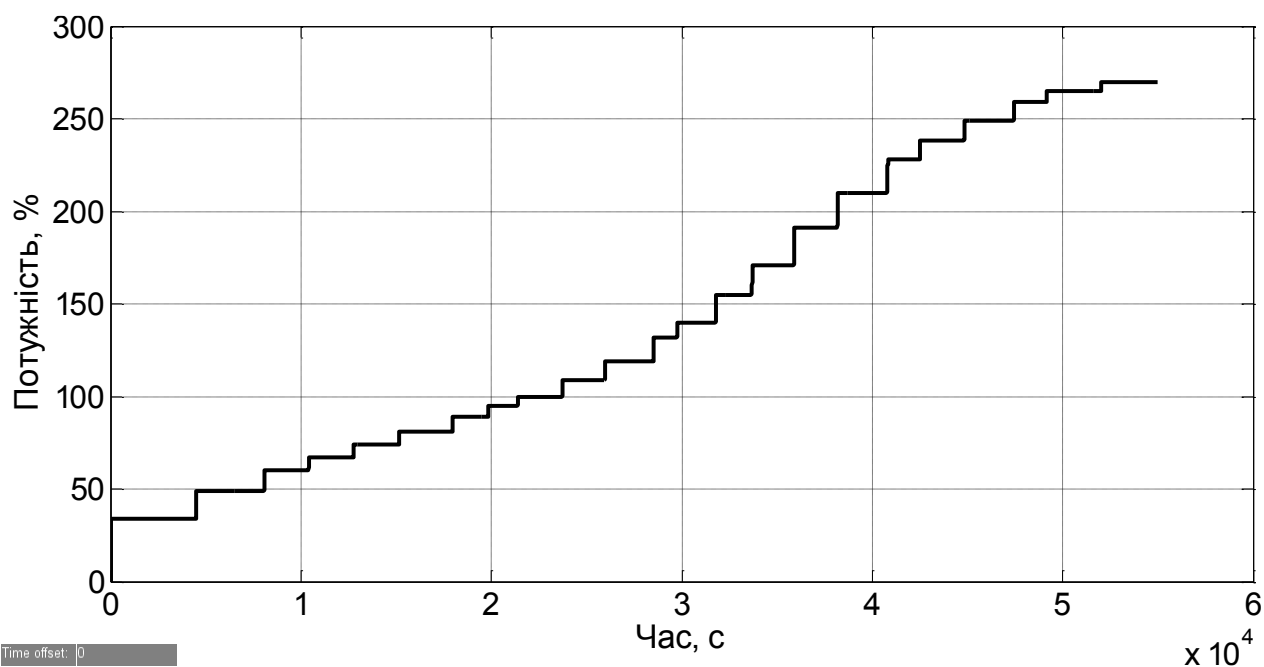


Рисунок 2.17 – Зміна у часі кута обертання панелі в горизонтальній площині (з присутністю хмарності)

З рис.2.16 можна зробити висновок, що запропонований алгоритм автоматичного керування положенням сонячної панелі залишається таким же ефективним і для випадку хмарної погоди. Можна відслідкувати, що після провалів потужності через перекриття сонця хмарами потужність після цього повертається до діапазону зміни значень 97 – 100%, і не виходить з нього, поки не настане наступне затьмарення сонця. Це означає, що алгоритм після паузи, що виникає через затьмарення сонця, продовжує працювати коректно. Наявність провалів потужності через закриття сонця хмарами не призводить до збою запропонованого алгоритму.

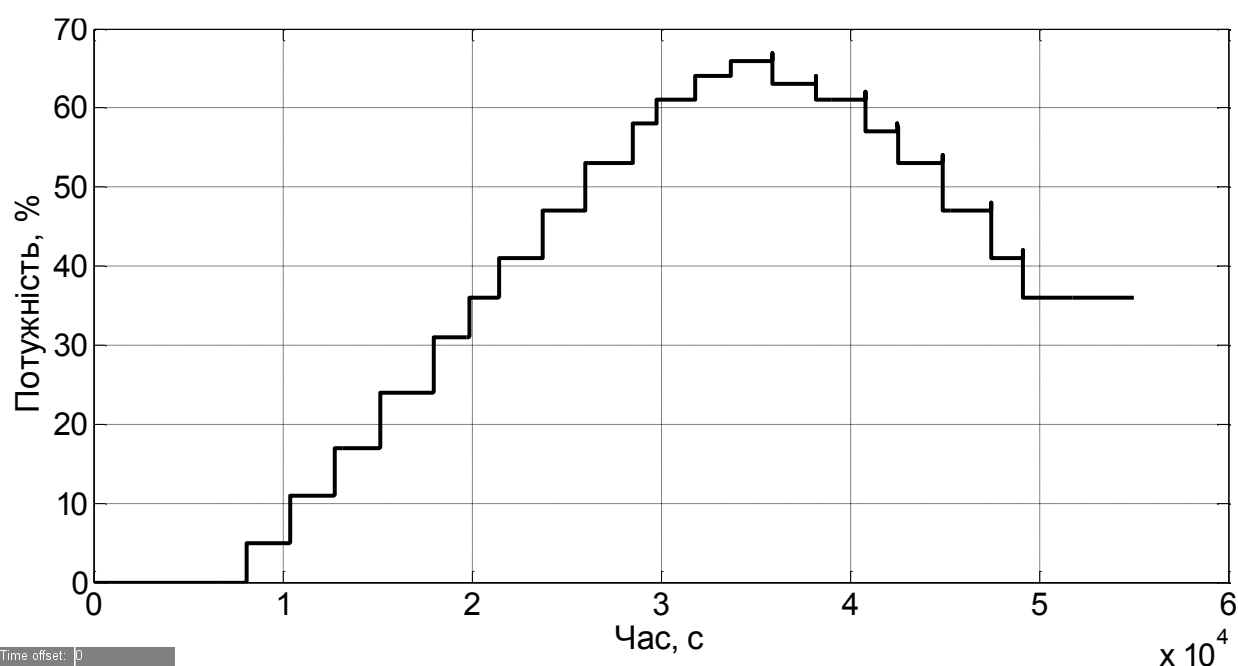


Рисунок 2.18 – Зміна у часі кута обертання панелі в вертикальній площині (з присутністю хмарності)

Це підтверджують й рис.2.17 та 2.18. З цих рисунків ми бачимо, що характер зміни у часі кутів обертання сонячної панелі у горизонтальній та вертикальній площинах майже такий самий, як характер зміни цих кутів у часі у сонячний день. Єдина відмінність – за умови хмарної погоди збільшилися періоди коригування положення панелі (періоди зміни кутів), що цілком логічно, оскільки через закриття сонця хмарами не завжди виходить коригувати положення панелі вчасно, коли потужність виходить з діапазону зміни значень $\pm 2,5\%$.

2.4. Висновки до розділу

1. Розроблена модель сонячної фотоелектричної установки як об'єкта автоматизації. Вхідними величинами моделі є кути обертання сонячної панелі, а вихідною величиною – потужність, генерована панеллю. При цьому збуренням є постійна зміна максимального екстремуму залежностей потужності від кутів обертання панелі через постійне переміщення сонця. В основі моделі закладені відомі астрономічні закони, які дозволяють визначати положення сонця відносно землі та розраховувати кут падіння сонячних променів на поверхню землі.

2. В роботі вперше запропонований алгоритм автоматичного керування положенням сонячної панелі за критерієм забезпечення максимальної потужності, генерованої панеллю, протягом всього дня. На відміну від відомих трекерних систем в запропонованому алгоритмі не визначається кут нахилу сонячних променів відносно поверхні землі в залежності від астрономічного часу, геолокації тощо, а відбувається періодичний пошук максимального екстремуму потужності у функції кута обертання спочатку в горизонтальній площині, а потім в вертикальній. Таким чином, сонячна панель фактично сама є давачем, що дозволяє забезпечити зворотний зв'язок в системі керування через замірювання потужності в умовах незмінного навантаження.

3. Дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки за допомогою розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування дозволило підтвердити ефективність запропонованого алгоритму автоматичного керування положенням сонячної панелі. Як в сонячний день, так і в хмарну погоду потужність, генерована панеллю, змінювалась у вузькому діапазоні значень 97 – 100%, а характер зміни кутів обертання панелі у горизонтальній та вертикальній площинах повторював траєкторію руху сонця в небі.

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунки капітальних витрат

В кваліфікаційній роботі магістра розглядається економічна доцільність розробки системи автоматичного керування просторовим положенням сонячної фотоелектричної установки. Розробленою системою передбачається обладнати вже існуючі СФУ, що використовуються як в індивідуальному, так і в промисловому масштабах. Система автоматичного керування орієнтацією СФУ, розроблена в кваліфікаційній роботі, має такі переваги:

- дозволяє підвищити ефективність сонячної панелі більш ніж на 39%
- є повністю енергонезалежною
- виконана з використанням якісних елементів

У розробці системи автоматичного керування запропоновано використовувати програмований логічний контролер з високою репутацією на ринку - VIRA.

Капітальні витрати, необхідні для реалізації проектованої системи, наведено в таблиці 3.1.

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн} + K_{по}, \text{ грн.} \quad (3.1)$$

де $K_{об}$ – вартість устаткування по зведенню витрат;

$K_{тр}$ – транспортно - заготівельні й складські витрати;

$K_{мн}$ – витрати на монтаж і налагодження встаткування;

$K_{по}$ – витрати на програмне забезпечення.

Таблиця 3.1 – Зведення капітальних витрат, грн.

Найменування	Кіл-ть (од.вим.)	Вартість (грн)	Сума (грн)
Кінцевий вимикач моментальної дії Z	4 шт.	800	3200
Кроковий двигун NEMA17 JK42HS40-1704-13A	2 шт.	2860	5720

Продовження табл.3.1

Драйвер крокового двигуна ТВ 6560	2 шт.	2660	5320
Блок живлення Carlo Gavazzi 240 W SPD	1 шт.	8900	8900
Модуль центрального процесору CPU 214PG (214-2BE03)	1 шт.	25896	25896
Модуль дискретного входу SM 221-1 BF00	1 шт.	80	80
Модуль дискретного виходу SM 222-1 BF10	2 шт.	80	160
Модуль живлення PS 207	1шт.	240	240
Усього			49516,00

Витрати на обладнання склали 49516,00 гривень.

Також передбачаються витрати на встановлення та налаштування системи орієнтування СФУ.

Таблиця 3.2 - Витрати на монтаж, пуск і налагодження системи

№	Найменування професії	Розряд	Кіл-ть людей	Тариф (грн/год)	Кіл. днів	Фонд зар. плати (грн)
1	Слюсар-монтажник	6	1	350	1	2800
2	Інженер-електронщик	-	1	400	1	3200
	Разом:					6000
	ЄСВ (22%):					1320
	Усього:					7320

Капітальні витрати на придбання, транспортування та налагодження обладнання складають:

$$K_{\text{пр}} = 49516 + 7320 = 56836,00 \text{ грн}$$

3.2 Розрахунок експлуатаційних витрат на утримання апаратури

За допомогою лінійного способу обчислюємо амортизацію обладнання:

$$A = P_{\text{ст}} * N_a / 100\%, \quad (3.2)$$

де $P_{\text{ст}}$ – початкова коштовність обладнання,

N_a – норма амортизації

$$A = 49516,00 * 20 / 100 = 9903,20 \text{ грн} \quad (3.3)$$

Витрати на поточний ремонт обладнання представлені в табл. 3.3

Таблиця 3.3 - Витрати на ремонт обладнання

№	Найменування професії	Розряд	Кіл-ть людей	Тариф (грн/год)	Кіл. годин	Фонд зар. плати (грн)
1	Слюсар-монтажник	6	1	350	10	3500
2	Інженер-електронщик	-	1	400	10	4000
	Разом:					7500
	ЄСВ (22%):					1650
	Усього:					9150

Вартість електроенергії не розраховується, виходячи з того, що об'єкт не потребує електроенергії в цілому.

Таблиця 3.4 - Кошторис річних витрат на утримання і експлуатацію нового обладнання

Найменування статей витрат	Сума (грн у рік)
Амортизація обладнання (20%)	9903,20
Поточний ремонт	9150,00
Витрати на електроенергію	0
Разом	19053,20

3.3. Визначення капітальних витрат на програмне забезпечення

3.3.1 Визначення трудомісткості створення програмного забезпечення

Нормування праці в процесі створення ПЗ суттєво ускладнене через творчий характер праці програмістів, тому трудомісткість розробки ПЗ може бути розрахована на основі системи моделей з різною точністю оцінки.

$$t = t_o + t_{и} + t_a + t_{п} + t_{отл} + t_{д}, \text{ люд.-година.} \quad (3.4)$$

де t_o – витрати на підготовку й опис поставленого завдання;

$t_{и}$ – витрати праці на дослідження алгоритму розв'язку завдання;

t_a – витрати праці на розробку графа станів системи керування;
 $t_{п}$ – витрати праці на програмування по готовому графі станів системи керування;

$t_{отл}$ – витрати праці на налагодження програми на ЕОМ;

t_d – витрати праці на підготовку документації за завданням.

Витрати праці на підготовку й опис поставленого завдання $t_o=30$;

Складові частини витрат праці визначаються на основі умовної кількості оброблюваних операторів у ПЗ. До їх числа входять ті оператори, які необхідно написати в процесі роботи над програмою з урахуванням можливих уточнень у постановці завдання й удосконалення програм.

Умовна кількість операторів у програмі:

$$Q = q * c * (1 + p), \text{ люд.-година.} \quad (3.5)$$

де q – кількість операторів, що допускаються;

c – коефіцієнт складності програми;

p – коефіцієнт корекції програми в процесі її відпрацьовування.

Коефіцієнт складності c визначає відносну складність програми стосовно типового завдання, складність якого рівна 1. У нашому випадку прийmemo c рівним 1.2.

Коефіцієнт корекції програми p визначає збільшення обсягу робіт за рахунок внесення змін у програму внаслідок уточнення постановки завдання. Величина p перебуває в межах 0,05 – 0,1, що відповідає внесенню 3 – 5 корекцій, що тягнуть за собою переробку 5 – 10% готової програми. Для нашого випадку p буде рівно 0,07.

Кількість операторів q рівно 121. Звідси умовна кількість операторів у програмі:

$$Q = 121 * 1,2 * (1 + 0,07) = 155$$

Витрати праці на дослідження роботи системи керування визначаються з урахуванням уточнення опису й кваліфікації програміста:

$$t_l = (Q \cdot B) / ((75 \dots 85) \cdot k), \text{ люд.-година.} \quad (3.6)$$

де B – коефіцієнт збільшення витрат праці внаслідок недостатнього опису завдання $B = 1,25$;

k – коефіцієнт кваліфікації програміста, який визначається залежно від стажу роботи зі спеціальності. Він становить при стажі роботи до 5 років, $k=1,1$.

$$t_l = (155 \cdot 1,25) / (80 \cdot 1,1) = 2,2, \text{ люд.-година.}$$

Витрати праці на розробку графа станів системи керування визначаємо за формулою:

$$t_a = \frac{Q}{(20 \dots 25) \cdot k}, \quad (3.7)$$

$$t_a = 155 / (25 \cdot 1,1) = 5,6, \text{ люд.-година.}$$

Витрати праці на створення програми визначаємо за формулою:

$$t_n = \frac{Q}{(20 \dots 25) \cdot k} \quad (3.8)$$

$$t_n = 155 / (25 \cdot 1,1) = 5,6, \text{ люд.-година.}$$

Витрати праці на налагодження програми на ЕОМ:

$$t_{\text{відл}} = 155 / (4,5 \cdot 1,1) = 31,3, \text{ люд.-година.}$$

Витрати праці на підготовку документації за завданням:

$$t_d = t_{\text{др}} + t_{\text{до}}, \quad (3.9)$$

де $t_{\text{др}}$ – трудомісткість підготовки матеріалів по рукопису;

$$t_{\text{др}} = \frac{Q}{(15 \dots 20) \cdot k} \quad (3.10)$$

$$t_{\text{др}} = 155 / (15 \cdot 1,1) = 9,4, \text{ люд.-година.}$$

$t_{до}$ – трудомісткість редагування, і оформлення документації:

$$t_{до} = 0,75 \cdot t_{др} \quad (3.11)$$

$$t_{до} = 9,4 \cdot 0,75 = 7,05, \text{ люд.-година.}$$

$$t_{др} = 9,4 + 7 = 16,4, \text{ люд.-година.}$$

Трудомісткість створення програмного продукту складе:

$$t = 30 + 2,2 + 5,6 + 5,6 + 31,3 + 16,4 = 91,1 \text{ люд.-година.}$$

3.3.2 Розрахунки витрат на створення програмного продукту

Витрати на створення програмного продукту $K_{по}$ включають витрати на заробітну плату програміста $Z_{зп}$ і вартість машинного часу, необхідного на налагодження програми на ЕОМ $Z_{мв}$.

$$K_{по} = Z_{зп} + Z_{мв} \quad (3.12)$$

Очікувана тривалість відпрацьовування ПЗ:

$$T = \frac{t}{V_k * F_p}, \text{ місяців,} \quad (3.13)$$

де V_k – число виконавців ($V_k=1$); F_p – місячний фонд робочого часу програміста при 8 годинному робочому дні, $F_p=176$.

$$T = 91,1/176 = 0,52, \text{ місяців.} \quad (3.14)$$

Зарплата розроблювача програми:

$$Z_{зп} = C_{пр} \cdot t \quad (3.15)$$

де t – загальна трудомісткість відпрацьовування ПЗ,

$C_{пр}$ – середня годинна зарплата програміста, грн/год ($C_{пр}=550$ грн/год).

$$Z_{зп} = 91,1 \cdot 550 = 50105,0 \text{ грн.}$$

Вартість машинного часу, необхідного для налагодження програми:

$$Z_{мв} = t_{відл} * C_{мч} \quad (3.16)$$

де $t_{відл}$ – трудомісткість налагодження програми на ЕОМ;

$C_{мч}$ – вартість машино-години ЕОМ, грн/год (100 грн/ч).

$$Z_{мв} = 31,3 \cdot 100 = 3130 \text{ грн/люд.}$$

Величина витрат на створення ПЗ:

$$K_{\text{пз}} = Z_{\text{зп}} + Z_{\text{мв}} \text{ грн.} \quad (3.17)$$

$$K_{\text{пз}} = Z_{\text{зп}} + Z_{\text{мв}} = 50105 + 3130 = 53235,0 \text{ грн.}$$

Витрати на розробку програмного забезпечення та дослідження системи керування в цілому становлять 53235,0 грн.

Таким чином, капітальні витрати на розробку й обслуговування системи керування й програмного забезпечення до неї складуть:

$$K = 56836,0 + 19053,20 + 53235,0 = 129124,0 \text{ грн.}$$

3.4. Додатковий прибуток від впровадження об'єкта проектування

Річне збільшення прибутки досягається за рахунок підвищення кількості електроенергії, що виробляється фотоелектричною установкою.

По даним аналізу схожих рішень в першому розділі, впровадження однієї фотоелектричної установки з САК положенням панелей відповідає виробленню потужності електростанцією біля 700 кВт. Дослідження показали, що впровадження керування положенням сонячних панелей призводить до збільшення генерованої потужності в середньому за добу на 32%.

З урахуванням цього, визначимо додатковий прибуток від впровадження САК (середня тривалість дня за рік – 8,5 год.; відношення годин хмарної погоди до сонячної 3 до 1, при цьому вироблення електроенергії скорочується в 5 разів; вартість проданої електроенергії – 5 грн за кВт·год):

$$\Pi = (0,66 \cdot 365 \cdot 8,5 \cdot 700 \cdot 0,32 \cdot 0,2 + 0,34 \cdot 365 \cdot 8,5 \cdot 700 \cdot 0,32) \cdot 5 = 1640105 \text{ грн.}$$

3.5 Визначення економічної ефективності проекту

Визначимо показники економічної ефективності проектного об'єкта:

Річний економічний ефект:

$$E = \Pi - E_{\text{п}} \cdot K > 0 \quad ,$$

і термін окупності розробки:

$$T_{ок} = K / E$$

$$E_{П} = (N_{кр} - N_{інф}) / 100$$

де, $N_{кр}$ – річна процентна ставка, %;

$N_{інф}$ – річний рівень інфляції, %.

У якості нормативного значення приймемо величину банківської кредитної ставки $N_{кр}$ (25%) з урахуванням інфляції $N_{інф}$ (9%), тобто:

$$E_{П} = (25 - 9) / 100 = 0,16$$

$$E = 1640105 - 0,16 \cdot 129124 = 1619445,0 \text{ грн.}$$

$$T_{ок} = 129124 / 1619445 = 0,08 \text{ роки}$$

Коефіцієнт ефективності (прибутковості) капітальних витрат ϵ показує, скільки гривень додаткового прибутку (економії) приносить одна гривня капітальних витрат:

$$\epsilon = E / K$$

$$\epsilon = 1619445 / 129124 = 12,5$$

Отже, при впровадженні системи керування одна гривня капітальних витрат приносить 12,5 грн. прибутку.

3.6 Висновок

Розрахунки капітальних і експлуатаційних витрат, а також аналіз показників економічної ефективності проекту показав, що річний економічний ефект від впровадження даної системи становить 1619445,0 грн. Термін окупності даної системи складе 0,08 років.

Проаналізувавши отримані результати можна сказати, що впровадження

системи керування є економічно вигідним і доцільним у рамках виконання поставленого завдання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ

У даній кваліфікаційній роботі виконується розробка системи автоматичного керування просторовим положенням сонячної панелі.

Робота з сонячною фотоелектричною установкою (СФУ) передбачає контакт з рухомими важкими механізмами та електронною апаратурою під напругою до 220 В.

У роботі передбачені заходи щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці у процесі монтажу та налаштування СФУ [10-20].

4.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають в технологічному процесі роботи з сонячними фотоелектричними панелями представлено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів та їх джерела

Небезпечні (шкідливі) виробничі фактори	Джерела виникнення	Норматив	Література
Механічні	Рухомі частини машин і механізмів (двигуни опорної конструкції)	Безпечність експлуатації обладнання	ДСТУ 3273-95
Рівень напруги 220В	Крокові двигуни, блоки живлення	$U_{\text{дот.}}=240\text{В}$ $I_{\text{дот.}}=10\text{ А}$	ГОСТ 29322-2014

4.2 Інженерно-технічні заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів.

Електробезпека

Дана система розрахована на напругу 220 В, тому відповідно у разі ураження струмом людини, ця напруга має можливість завдати шкоди її здоров'ю. Задля безпеки користувача представлені такі заходи безпеки:

Заходи електробезпеки:

- Контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- Усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням;
- Організація безпечної експлуатації електроустановок.
- Використання обладнання закритого типу.

Пожежна профілактика

Системи СФУ розташовуються на вулиці і не мають легко запалювальних компонентів, а отже мають малий ризик пожежної небезпеки. Проте, як система зі значною кількістю електричних елементів, апаратна частина системи має бути оснащена засобами боротьби з вогнем для запобігання пожежі у будь-якій позаштатній ситуації.

Для запобігання пожежі використовують первинні засоби пожежогасіння – порошковий вогнегасник ВП-9.



Рисунок 4.1 – Звичайний порошковий вогнегасник

4.3 Заходи безпеки при роботі з сонячними фотоелектричними панелями

Керування просторовим положенням сонячної панелі (КСП) є важливим завданням для забезпечення максимального енергоспоживання сонячної електростанції. КСП може здійснюватися за допомогою різних механізмів, таких як електродвигуни, гідравлічні системи, пневматичні системи та інші.

При КСП сонячної панелі можуть виникати шкідливі та небезпечні фактори, які можуть негативно вплинути на здоров'я та безпеку працівників. До таких факторів відносяться:

- Електричний струм. КСП сонячної панелі може здійснюватися за допомогою електродвигунів, які працюють від електричної мережі. У разі несправності електродвигуна або несправності електричної мережі працівник може отримати ураження електричним струмом.
- Рухливі частини. КСП сонячної панелі може здійснюватися за допомогою механізмів, які мають рухомі частини. У разі несправності механізму рухомі частини можуть травмувати працівника.
- Висота. Сонячні панелі часто встановлюються на висоті, що може призвести до падіння працівника з висоти.
- Відсутність захисного обладнання. При КСП сонячної панелі працівники повинні використовувати захисне обладнання, яке може запобігти

травмам. До такого обладнання відносяться каски, рукавички, взуття з ковзаном і інші.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів КСП сонячної панелі

Для аналізу шкідливих та небезпечних факторів КСП сонячної панелі необхідно провести наступні заходи:

- Ідентифікація факторів. В першу чергу необхідно ідентифікувати всі шкідливі та небезпечні фактори, які можуть виникнути при КСП сонячної панелі.
- Оцінка ризиків. Для кожного шкідливого та небезпечного фактора необхідно оцінити ризик його виникнення.
- Заходи щодо зниження ризиків. Для зниження ризиків виникнення шкідливих та небезпечних факторів необхідно вжити відповідних заходів.

Заходи щодо зниження ризиків КСП сонячної панелі

Для зниження ризиків КСП сонячної панелі необхідно вжити таких заходів:

- Забезпечення заземлення всіх струмопровідних частин обладнання. Заземлення забезпечує відведення струму в землю в разі ураження людини.
- Ізоляція струмопровідних частин обладнання. Ізоляція забезпечує захист від прямого контакту людини з струмоведучими частинами обладнання.
- Забезпечення належного технічного стану обладнання. Регулярний огляд і ремонт обладнання дозволяє запобігти несправностям, які можуть призвести до травм.
- Використання захисного обладнання. Працівники, які проводять КСП сонячної панелі, повинні використовувати захисне обладнання.

Розрахунок травмування від рухомих частин сонячної панелі

Припустимо, що рухома частина сонячної панелі має такі характеристики:

Маса: 100 кг

Швидкість: 1 м/с

Для розрахунку травмування від рухомої частини можна використовувати наступну формулу:

$$E = 1/2 * m * v^2$$

де:

E - енергія рухомої частини, Дж;

m - маса рухомої частини, кг;

v - швидкість рухомої частини, м/с.

У нашому випадку, енергія рухомої частини буде таким:

$$E = 1/2 * 100 \text{ кг} * 1 \text{ м/с}^2 = 50 \text{ Дж}$$

Ця енергія може призвести до серйозних травм, аж до летального результату.

Заходи щодо зниження ризику травмування

Для зниження ризику травмування від рухомих частин сонячної панелі необхідно вжити таких заходів:

Забезпечення огороження рухомих частин. Огородження захистить працівників від контакту з рухомими частинами.

Забезпечення належного технічного стану обладнання. Регулярний огляд і ремонт обладнання дозволить запобігти несправностям, які можуть призвести до травм.

Видача працівникам захисного обладнання. Працівники, які проводять роботу з рухомими частинами сонячної панелі, повинні використовувати захисне обладнання, наприклад, каски, рукавички, захисні окуляри.

Падіння з висоти є одним з найпоширеніших видів травм на виробництві. Сонячні панелі часто встановлюються на висоті, тому падіння з них може призвести до серйозних травм, аж до летального результату.

Для оцінки ризику падіння з сонячної панелі необхідно врахувати такі фактори:

Висота сонячної панелі. Чим вище сонячна панель, тим вище ризик падіння.

Стан сонячної панелі. Нестійка або пошкоджена сонячна панель підвищує ризик падіння.

Захисні заходи. Чим ефективніші захисні заходи, тим нижчий ризик падіння.

Для зниження ризику падіння з сонячної панелі необхідно взяти таких заходів:

Обмежити доступ до сонячних панелей на висоті. Це можна зробити, наприклад, за допомогою огорожі або спеціальних перепусток.

Забезпечити належний стан сонячних панелей. Регулярний огляд і ремонт сонячних панелей дозволить запобігти їхньому руйнуванню та підвищить їхню стійкість.

Використовувати захисне обладнання. Працівники, які працюють на висоті, повинні використовувати захисне обладнання, наприклад, каски, мотузки, страхувальні системи.

Сонячна панель має висоту 10 метрів. Працівник, який працює на сонячній панелі, не одягнений у захисне обладнання.

У разі падіння з висоти 10 метрів працівник може отримати травму, пов'язану з ударом об землю. Тяжкість травми буде залежати від багатьох факторів, таких як кут падіння, стан поверхні, на яку впав працівник, і його індивідуальні особливості.

Для розрахунку падіння з сонячної панелі можна використовувати наступну формулу:

$$E = m * g * h$$

де:

E - потенційна енергія, Дж;

m - маса тіла, кг;

g - прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²;

h - висота падіння, м.

У нашому випадку, потенційна енергія тіла працівника при падінні з висоти 10 метрів буде таким:

$$E = 70 \text{ кг} * 9,81 \text{ м/с}^2 * 10 \text{ м} = 6862 \text{ Дж}$$

Ця енергія буде перетворена на кінетичну енергію при падінні тіла.
Кінетична енергія тіла працівника при падінні з висоти 10 метрів буде таким:

$$E = m * v^2 / 2$$

де:

v - швидкість тіла при падінні, м/с.

Тоді швидкість тіла працівника при падінні з висоти 10 метрів буде таким:

$$v = \sqrt{2 * E / m} = \sqrt{2 * 6862 \text{ Дж} / 70 \text{ кг}} = 19,2 \text{ м/с}$$

Така швидкість падіння може призвести до серйозних травм, аж до летального результату

Для зниження ризику травмування працівника необхідно вжити таких заходів:

Обмежити доступ до сонячної панелі на висоті.

Забезпечити належний стан сонячної панелі.

Видати працівникові захисне обладнання.

При дотриманні цих заходів ризик травмування працівника буде знижений до мінімуму.

ВИСНОВКИ

1. Згідно з завданням був проведений аналіз сонячної фотоелектричної установки як об'єкта автоматизації, існуючих рішень, їх переваг та недоліків. На основі цього аналізу сформовані завдання дослідження.

2. Розроблена модель сонячної фотоелектричної установки як об'єкта автоматизації. Вхідними величинами моделі є кути обертання сонячної панелі, а вихідною величиною – потужність, генерована панеллю. При цьому збуренням є постійна зміна максимального екстремуму залежностей потужності від кутів обертання панелі через постійне переміщення сонця. В основі моделі закладені відомі астрономічні закони, які дозволяють визначати положення сонця відносно землі та розраховувати кут падіння сонячних променів на поверхню землі.

3. В роботі вперше запропонований алгоритм автоматичного керування положенням сонячної панелі за критерієм забезпечення максимальної потужності, генерованої панеллю, протягом всього дня. На відміну від відомих трекерних систем в запропонованому алгоритмі не визначається кут нахилу сонячних променів відносно поверхні землі в залежності від астрономічного часу, геолокації тощо, а відбувається періодичний пошук максимального екстремуму потужності у функції кута обертання спочатку в горизонтальній площині, а потім в вертикальній. Таким чином, сонячна панель фактично сама є давачем, що дозволяє забезпечити зворотний зв'язок в системі керування через замірювання потужності в умовах незмінного навантаження.

4. Дослідження роботи сонячної фотоелектричної установки за допомогою розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування дозволило підтвердити ефективність запропонованого алгоритму автоматичного керування положенням сонячної панелі. Як в сонячний день, так і в хмарну погоду потужність, генерована панеллю, змінювалась у вузькому діапазоні значень 97 – 100%, а характер зміни кутів обертання панелі у горизонтальній та вертикальній площинах повторював траєкторію руху сонця в небі.