

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ
ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ЇХ КУТА НАХИЛУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТс-41

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Шворак Д.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. – Т. : ТНТУ, 2023.

Стор. 62; рис. 41; табл. 6; креслень (презентацій) 21; джерел 19.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом впровадження системи керування їх кута нахилу».

Метою роботи є розробити проект системи керування орієнтацією, що дозволяє регулювати кут нахилу сонячних панелей у кількох режимах.

У роботі проведено аналіз публікацій за темою роботи та сформовано перелік необхідного устаткування, програмного забезпечення визначення типу системи стеження. Розроблено структури системи керування та конструкцію затіняючого елемента давача положення сонця. У системі керування реалізовано 4 режими роботи: ручне керування, пряме задання кута, автоматичне керування, імпорт зовнішніх даних позиціонування. Проведено розрахунок найбільш ефективних варіантів монтажу сонячних панелей та порівняння їх ефективності із ефективністю системи керування орієнтацією сонячних панелей.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, КУТ НАХИЛУ, АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЇ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Фотоелектричні сонячні панелі на основі кремнію.....	91
1.2 Застосування сонячних електростанцій.....	10
1.3 Принцип роботи системи стеження	11
1.4 Аналіз результатів публікацій за темою роботи.....	14
1.5 Висновки до розділу	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	18
2.1 Опис та склад системи.....	18
2.2 Вибір обладнання системи стеження	18
2.2.1 Вибір сервоприводу	19
2.2.2 Вибір та конструювання світлочутливого датчика	20
2.2.3 Керуючий пристрій на основі мікроконтролера.....	22
2.2.4 Ручне керування системою	24
2.3 Блок-схема системи керування.....	25
2.4 Висновки до розділу	27
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	28
3.1 Базові рівняння для розрахунку положення Сонця.....	28
3.2 Електроенергія, яка генерується сонячною панеллю.....	30
3.3 Ефективність сонячної панелі.....	32
3.4 Потужність постійного струму від сонячної батареї.....	32
3.5 Аналіз результатів розрахунків	35
3.6 Моделювання системи керування кутом нахилу.....	38
3.6.1 Вихідні дан.....	38
3.6.2 Субмоделі програми імітаційного моделювання.....	40
3.6.3 Блок обміну сигналами.....	41
3.6.4 Блок режимів	42

3.6.5 Режим автоматичного керування на основі фото резисторів.....	43
3.6.6 Режим автоматичного керування «дата».....	45
3.6.7 Блок калібрування.....	47
3.6.8 Блок графіків.....	48
3.7 Конструктивні елементи моделі системи зміни кута нахилу.....	51
3.8 Висновки до розділу.....	52
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	54
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	54
4.2 Фізичні основи електробезпеки.....	55
4.3 Причини електротравм, напруга кроку.....	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60

ВСТУП

Актуальність теми.

Глобальна енергетична криза, а також заклик до скорочення викидів парникових газів, що постійно зростають, призвели до нагальної потреби у розширенні використання відновлюваних джерел енергії в електроенергетичній системі. Серед різних технологій виробництва відновлюваної енергії, таких як вітер, паливні елементи, біомаса тощо, основна увага в світі приділяється сонячній фотоелектричній енергії (ФЕ). Фотоелектричні системи є досить популярними та ефективними, особливо в країнах, де розташування, клімат і рельєф місцевості гарантують високий і постійний рівень сонячної радіації протягом усього року. Матеріали, що використовуються для виготовлення фотоелементів, обмежують їхню ефективність. Монокристалічні сонячні панелі мають ефективність приблизно 18%. Вони виготовляються з великого кристалу кремнію. Цей тип сонячних панелей ефективний як в поглинанні сонячного світла, так і в перетворенні його в електрику, проте є відносно дорогим. Монокристалічні сонячні панелі перевершують інші типи сонячних панелей в умовах низької освітленості. Полікристалічні сонячні панелі мають ефективність приблизно 15%. Замість одного великого кристала, цей тип сонячних панелей складається з декількох менших кристалів кремнію. Наразі це найпоширеніші сонячні панелі на ринку. Вони дуже схожі на розбите скло. Вони трохи менш ефективні, ніж монокристалічні сонячні панелі, але їх виробництво дешевше. Аморфні сонячні панелі мають ефективність близько 10%. Вони складаються з тонкої плівки, виготовленої з розплавленого кремнію, яка наноситься безпосередньо на великі пластини з нержавіючої сталі або подібного матеріалу. Перевага аморфних сонячних панелей над двома іншими типами полягає в тому, що вони захищені від тіні. Це означає, що коли частина елементів сонячної панелі затінена, сонячна панель продовжує виробляти енергію. Цей тип сонячних панелей має нижчу ефективність, ніж інші два типи, і є найдешевшим у виробництві.

Енергія, що виробляється фотоелектричними модулями, залежить не тільки від їх відносно низької ефективності, тобто, як правило, десь близько 20%, але й від положення панелей. Сонячне світло складається з двох компонентів: прямого променя, який несе 90% сонячної енергії, і розсіяного сонячного світла, яке несе решту енергії. Для того, щоб використовувати максимальну кількість енергії, фотоелектричні панелі повинні бути перпендикулярні до прямого випромінювання. Іншими словами, вони повинні бути ідеально повернуті до сонця так, щоб кут падіння складав 90° . Якщо кут падіння менше 90° , сонячна енергія зменшується на косинус кута відхилення. Сонце щодня рухається зі сходу на захід. Тому фіксована фотоелектрична панель буде ідеально вирівняна з прямим променем тільки в полуденний час. Однак, рано вранці і пізно ввечері кут падіння світла буде зміщений, що призведе до зниження коефіцієнта використання сонячної енергії. Одновісні трекери зазвичай використовують полярне кріплення для максимальної ефективності використання сонячної енергії і застосовують ручне регулювання висоти (нахилу осі) на другій осі, яку можна регулярно регулювати протягом року. Система відстежується навколо полярної осі N-S.

Актуальність даної роботи зумовлена високими темпами поширення альтернативних джерел енергії, і може розглядатися як один із прикладів застосування позиціонування модульних панелей сонячної електростанції.

Мета кваліфікаційної роботи: розробити проект системи керування орієнтацією, що дозволяє регулювати кут нахилу сонячних панелей у кількох режимах.

Відповідно до даної мети ставляться такі **завдання**:

1. Аналіз публікацій за темою роботи;
2. Формування переліку необхідного устаткування, програмного забезпечення визначення типу системи стеження;
3. Розробка структури системи керування;

4. Розрахунок найбільш ефективних варіантів монтажу сонячних панелей та порівняння їх ефективності із ефективністю системи керування орієнтацією сонячних панелей.
5. Розробити конструкцію затіняючого елемента давача положення сонця.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 62 арк. формату А4, графічна частина – 21 аркушів презентації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Фотоелектричні сонячні панелі на основі кремнію

Найпоширенішим матеріалом виготовлення сонячних панелей на даний момент є кремній Si, що займає приблизно 80% обсягу виробництва. Виділяють два основні види сонячних панелей, що виробляються на основі кремнію [1]:

- Монокристалічні (crystalline-Si), на основі високоякісного кристалу (рис. 1.1). Характерними рисами даного типу кристалів є: високий ККД, близько 18-20%, при максимально можливому теоретичному значенні 30%; тривалий термін експлуатації – до 25 років. Він вимогливий до рівномірності освітлення, необхідність захисту від опадів та бруду.

- Полікристалічні (multicrystalline-Si), вироблені в тиглях методом спрямованої кристалізації (рис. 1.1). Складаються з багатьох різноспрямованих кристалітів. Характерними рисами даного типу кристалів є: нижчий ККД, ніж у монокристалів – 10-15 %; знижена собівартість виробництва у середньому у 1,5 рази; низька стійкість полікристалів до нагріву.

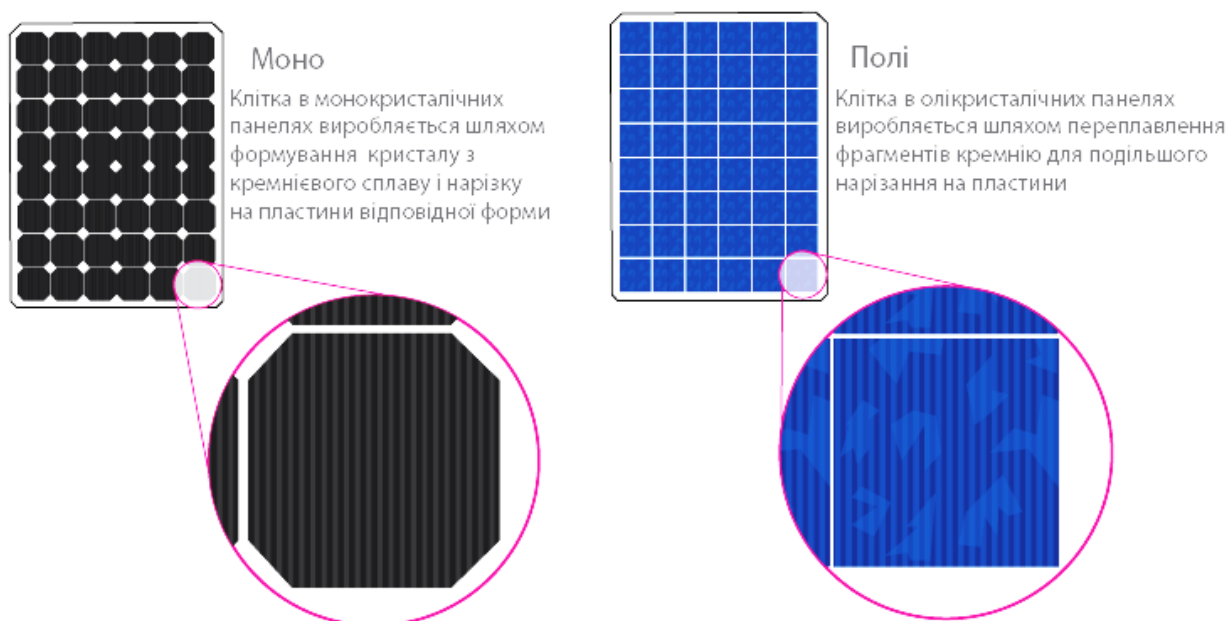


Рисунок 1.1 – Типи фотоелектричних сонячних панелей

1.2 Застосування сонячних електростанцій

Сонячна електростанція – електростанція, що застосовується для перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію [2]. Основу сонячної електростанції складають панелі сонячних батарей, призначених для перетворення сонячної енергії на електричну енергію постійного струму. Готова установка є набором модульних панелей, розміщених на опорних конструкціях, контролерів заряду, акумуляторних батарей. Важливу роль даній системі представляє інвертор, призначений для перетворення постійного струму акумулятора в змінний, і передачі у внутрішню мережу споживача [3].

Останнім часом активно розвивається концепція, при якій сонячна енергія перетворюється на змінну напругу промислової частоти. Таким чином, вся перетворена сонячна енергія подається до загальної лінії споживання електромережі. Перевагою даних систем є відсутність у ній акумуляторних батарей – найненадійнішої ланки в автономній системі із сонячними модулями [3].

Розрахунковий термін служби сонячних батарей та інвертора становить близько 50 років. Вся енергія від сонячних модулів йде на живлення електрообладнання на об'єкті і використовується пріоритетно, якщо вироблення від сонячних модулів перевищує споживання – надходять у загальну енергосистему. На відміну від промислових систем, що використовують сонячну енергію для обертання роторів генератора, таких як: баштові сонячні електростанції, сонячно-вакуумні електростанції, двигунів Стірлінга; – набирають популярності мобільні електростанції для потреб невеликих об'єктів, приватних будинків. Локальні установки такого типу дозволяють забезпечити електроенергією віддалені об'єкти, де неможливе використання центральної системи енергопостачання .

1.3 Принцип роботи системи стеження

Типова фотоелектрична система з відстеженням сонця, як показано на рис. 1.2, повинна бути оснащена двома важливими функціями: (а) відстеженням азимуту для регулювання кута нахилу поверхні фотоелектричної панелі під час зміни сезонів; і (б) щоденним відстеженням сонячного випромінювання для максимального падіння сонячної радіації. Кут нахилу (Θ) фотоелектричної системи, необхідний в будь-який час року, може бути виражений як функція сезонної висоти сонця (ϕ) як $\theta = 90^\circ - \phi$.

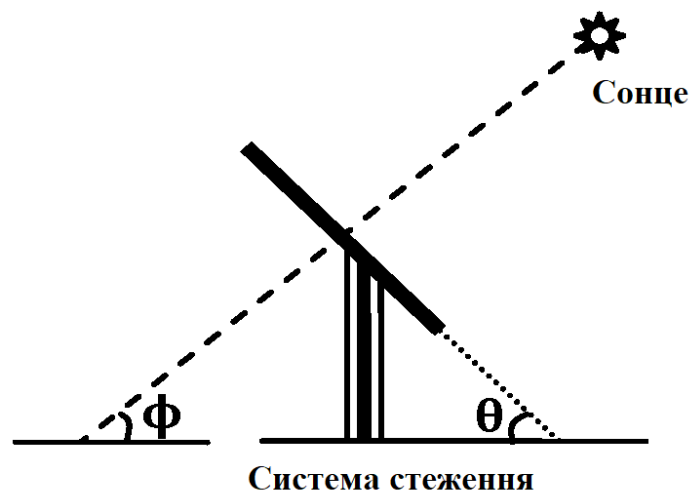


Рисунок 1.2 - Залежність між кутом нахилу та висотою сонця для фотоелектричної системи

Двовісні системи стеження переміщують сонячну панель як по вертикалі, так і по горизонталі. Схематична блок-схема запропонованого сонячного трекера показана на рис. 1.3.

Для надсилання сигналів зворотного зв'язку використовувалися чотири датчики. Для конструювання датчика обрано фоторезистор через його високу надійність. Для визначення положення сонця по одній осі, скажімо, схід/захід, два датчики LDR були встановлені на сонячній панелі і поміщені в корпус, як показано на рис. 1.4. Його принцип роботи аналогічний, людському оку.

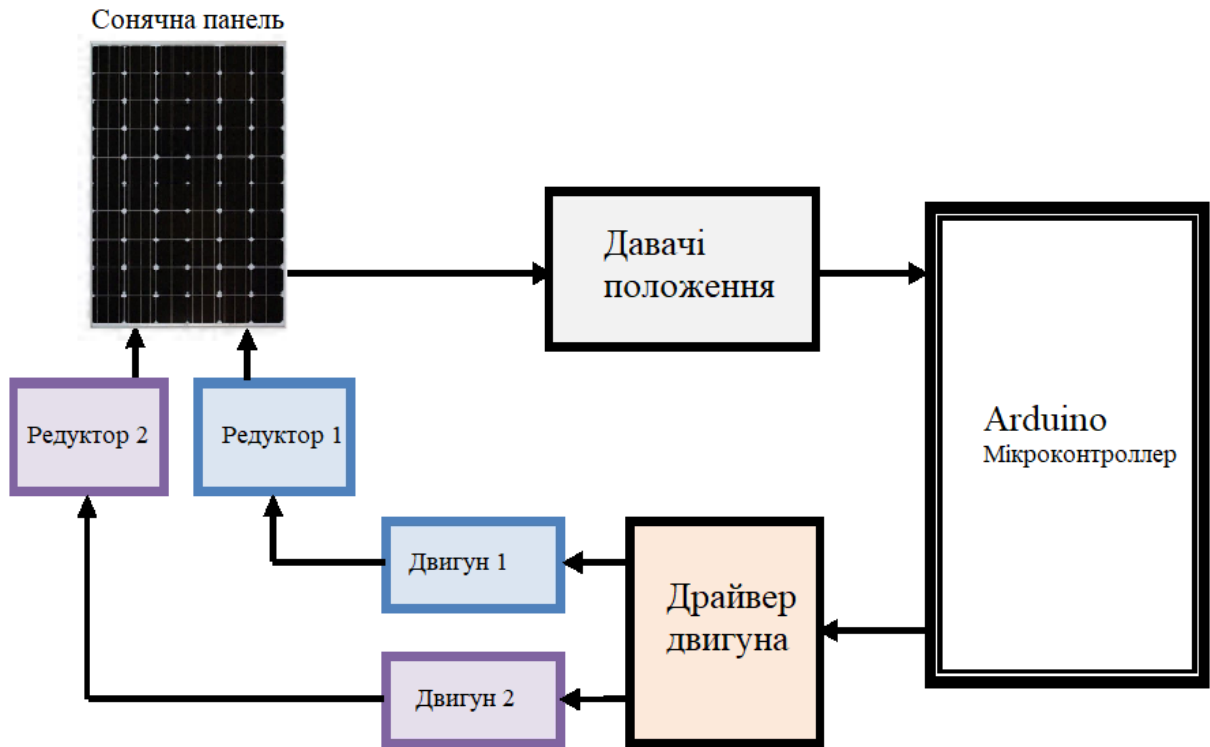


Рисунок 1.3 - Структурна схема двоосного сонячного трекера

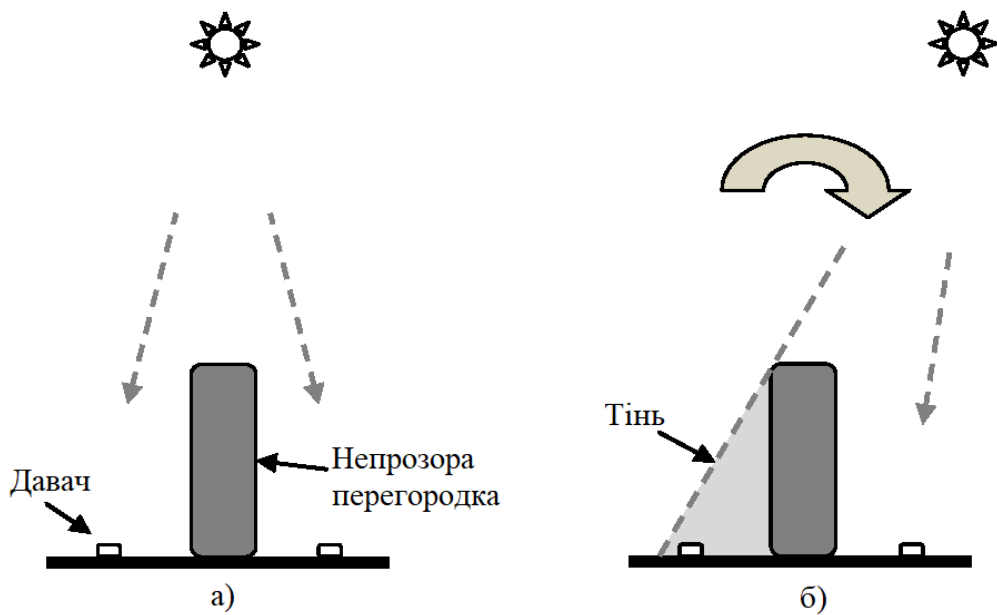


Рисунок 1.4 – Принцип роботи даччів положення сонця

На рис. 1.4(а) описано випадок, коли положення сонця змінюється, а кут падіння не максимальний. Два датчики LDR, які розташовані з правого і лівого боку панелі для одновісного відстеження, на додаток до двох датчиків, розміщених зверху і знизу панелі для двовісного відстеження, виявляють

різницю в інтенсивності джерела світла. Різниця перетворюється на різницю в напрузі вузлів, що надсилається на відповідні канали аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера Arduino. Мікроконтролер Arduino обчислює різницю вузлових напруг і порівнює їх з еталонними заданими значеннями. Потім він генерує необхідні логічні сигнали для приведення в дію двигунів постійного струму в такому напрямку, щоб інтенсивність світла на ЛДР у кожній парі була меншою за попередньо визначений поріг, щоб досягти бажаного стану, зображеного на рис. 1.4(б).

Сонячні панелі забезпечують максимальне виробництво електроенергії за умови спрямованості строго перпендикулярно сонячним променям [4]. У стаціонарних системах цей період відбувається лише один раз за світловий день, решту часу сонячні панелі виробляють значно меншу кількість електроенергії, втрачаючи свою ефективність. При застосуванні слідкуючої системи та коригування положення сонячних панелей ефективність електроенергії, що виробляється, можна підвищити до 40 %. [5]

Слідкуюча система складається з двох елементів – системи стеження на основі фоторезисторів, системи керування коригуванням положення сонячних панелей за допомогою двигунів чи сервоприводів (рис.1.5).

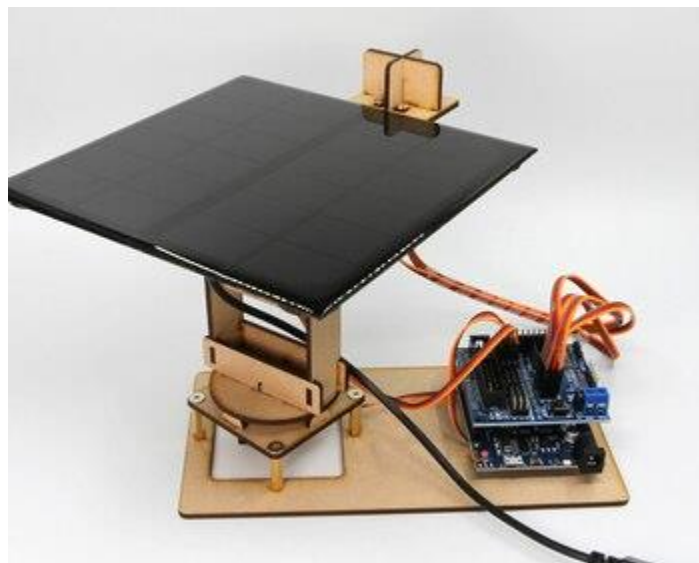


Рисунок 1.5 – Двохосьова слідкуюча система фотоелектричних сонячних панелей

Один з методів реалізації – екваторіальна слідкуюча система, в якій регулюється кут нахилу сонячних панелей, таким чином протягом дня положення буде змінюватися зі сходу на захід отримуючи максимальний світловий потік протягом усього світлого часу доби. У цих системах застосовуються методи кріплення сонячних панелей під кутом 45° один відносно одного, однак у такій схемі одна з панелей не висвітлюватиметься протягом половини світлого дня. Для коригування положення застосовується реле, що порівнює струм, що протікає через нього, з лівої та правої панелі. Недоліками даної системи є неможливість коригування горизонтальної осі обертання, що відіграє важливу роль в умовах хмарності, туману.

При застосуванні системи з можливістю коригування положення по двох осях з'являється можливість максимізувати вироблення електроенергії навіть за умов недостатнього освітлення панелей. Також, даний тип систем дозволить розташувати сонячні панелі на одній площині, що коригується двигуном, тим самим уникнувши простою однієї зі сторін системи. Однак, при такій схемі компонування виникає необхідність порівняння показань світлового потоку з більшої кількості точок для визначення оптимального положення установки [6]. У цих типах систем застосовуються кілька фоторезисторів, рознесених один від одного, без перекриття суміжних областей.

1.4 Аналіз результатів публікацій за темою роботи

Основною проблемою при встановленні сонячних панелей є їх орієнтація. За загальним емпіричним правилом, панель, орієнтована на південь, з кутом нахилу, що дорівнює висоті над рівнем моря, матиме максимальну інсоляцію на сонячній панелі. Ряд опублікованих робіт показали, що, залежно від місця розташування, різні орієнтації є більш придатними для досягнення максимального сонячного опромінювання на сонячних панелях.

Ефективно використано послідовне нейромережеве наближення для визначення оптимальних кутів нахилу сонячних панелей, орієнтованих на

південь, в різних місцях Китаю [7]. У цій роботі зроблено висновок, що оптимальний кут нахилу для цих місць приблизно такий самий, як і широта цих місць. Хусейн та ін. [8] досліджували продуктивність монокристалічних кремнієвих фотомодулів для різних кутів нахилу панелей, орієнтованих на південь. Вони дійшли висновку, що для Каїра, Єгипет, найкращою орієнтацією сонячних панелей є південна з кутами нахилу 20-30°.

Танг і Ву [9] використовували модель місячного індексу ясності для визначення оптимальних кутів нахилу сонячних колекторів, орієнтованих на південь, для сонячних колекторів, що використовуються в Китаї. Багато авторів вивчали оптимальну орієнтацію фотоелектричних панелей для інтегрованих в будівлі фотоелектричних систем в Гонконзі. Вони дійшли висновку, що панелі, орієнтовані на південь з кутом нахилу 20 градусів, що трохи менше місцевої широти, дають максимальну потужність. Оптимальні орієнтації сонячних панелей для Бронкса в Нью-Йорку на основі індексу ясності та моделей ясного неба досліджуються в роботі [10]. Було зроблено висновок, що на оптимальний кут нахилу для південної сторони впливає відбивна здатність ґрунту.

Модель погодинного індексу ясності використовується для визначення орієнтації сонячних панелей у трьох місцевостях США з різними кліматичними умовами. Перевага цієї моделі над традиційним місячним індексом ясності полягає в тому, що вона враховує асиметричний характер сонячного випромінювання відносно сонячного полудня. Зокрема, характер ранкового та післяобіднього сонячного випромінювання відрізняється для деяких місцевостей. Це може мати певний вплив на орієнтацію сонячних панелей, а також на очікувану кількість інсоляції в різний час доби. Хартнер та ін. змінювали орієнтацію сонячних панелей зі сходу на захід і визначали електричну енергію, що генерується панеллю при кожній орієнтації панелі. Роудс та ін. виконали кілька оцінок впливу орієнтації сонячних фотоелектричних панелей на виробництво енергії та економіку системи. У їхньому дослідженні розглядалася електроенергія змінного струму, вироблена типовою фотоелектричною системою, а також ціни на електроенергію в

національному масштабі. Результати їхнього дослідження показують, як місцеві ринки електроенергії, засновані на цінах на електроенергію за час використання (Time-Of-Use, TOU), впливають на економічну цінність розміщення сонячних електростанцій на національному рівні.

Хафез та ін. [11] представили всебічний огляд оптимальної орієнтації сонячних панелей для різних місць по всьому світу. Зовсім недавно Чінчілла та ін. [8] використовували дані з 2551 об'єкта по всьому світу і за допомогою регресійного аналізу розробили кореляції для оптимальних кутів нахилу сонячних панелей з точки зору місцевих широт для місць, де відсутні метеорологічні дані.

В останні роки значна увага приділяється орієнтації сонячних панелей на основі попиту [12]. У деяких муніципалітетах пік попиту припадає на літні дні через інтенсивне використання кондиціонерів. Оптимальна орієнтація сонячної панелі відповідно до енергоспоживання Нью-Йорка була досліджена в [10], де було зроблено висновок, що на основі історичного енергоспоживання міста найвищий попит на електроенергію припадає на післяобідній час у серпні. Найкраща орієнтація панелі найкраще відповідає піковому попиту, що також забезпечує досить високу загальну річну потужність. Орієнтація сонячних панелей на основі енергоспоживання будівель у Нью-Йорку була досліджена в роботі [10], в результаті чого було обрано західну орієнтацію, яка відповідає піковому попиту і забезпечує достатню загальну річну потужність.

Фінансовий аспект фотоелектричних систем є ще одним фактором, який слід враховувати при прийнятті рішення про вибір та аналіз витрат на сонячні панелі. У багатьох муніципалітетах нежитлові будівлі платять за споживання електроенергії за вищими тарифами під час пікового попиту. Отже, економічно доцільніше орієнтувати сонячні панелі таким чином, щоб мінімізувати річні витрати на електроенергію, а не максимізувати загальну кількість кВт·год, вироблену панелями. Ринок електроенергії в США управляється незалежним сервісним оператором (ISO) або регіональною передавальною організацією (RTO). Як показано в [12], для таких ринків, як PJM (RTO Пенсильванії, Джерсі

та Меріленду) та Каліфорнійський ISO, оптимальна орієнтація на скорочення пікового попиту дозволила виробити на 50 % більше енергії під час пікового попиту при падінні річного виробництва енергії лише на 8-10 %, що призвело до значних економічних вигод через вищі ціни в години пікового навантаження та вищу цінність цього ресурсу. Економічні вигоди, така оптимальна орієнтація, допомагає стабілізувати енергосистему, задовольняючи піковий попит, а також сприяє скороченню викидів парникових газів, зменшуючи потребу у використанні дизельних генераторів та газових установок, які є основним джерелом викидів CO₂, і, як наслідок, додатковим економічним вигодам.

1.5 Висновки до розділу

1. Проведено порівняльний аналіз ефективності використання полікристалічних та монокристалічних сонячних панелей.
2. Розглянуто поняття сонячної електростанції та проведено короткий аналіз їх видів та факторів, які впливають на їх енергоефективність.
3. Проаналізовано структуру та роль систем стеження та орієнтації сонячних панелей у напрямку на Сонце. Розглянуто базові принципи функціонування приладів визначення положення Сонця.
4. Проведено аналіз літературних джерел з метою визначення найбільш ефективного монтажу сонячних панелей в залежності від енергетичних та економічних факторів. Здійснено порівняння ефективності використання системи керування орієнтацією сонячних панелей із варіантом жорсткого монтажу.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис та склад системи

Процес автоматизації системи не тільки забезпечує моніторинг та контроль роботи системи, а й є основою для формування системи, яка дає можливість коригувати положення сонячних панелей для максимальної ефективності роботи.

Автоматизація – це застосування спеціальних технічних засобів або пристроїв та пристроїв, що призначаються для здійснення контролю та кування технологічним процесом. При моніторингу застосовується комп'ютерне керування за допомогою ПЗ (програмне забезпечення), за допомогою якого здійснюється контроль об'єктів.

Для реалізації системи керування положенням сонячних панелей необхідно визначити такі фактори:

- Габарити системи;
- Приводи системи коригування положення;
- Тип системи стеження;
- Керуючий пристрій;
- Спосіб керування системою;

2.2 Вибір обладнання системи стеження

Для реалізації обрано макетну модель невеликих розмірів для зручності дослідження основних елементів експлуатації. Даний форм-фактор відрізняється невеликою вартістю виконання, доступністю ключових елементів для реалізації автоматизованої системи стеження [13].

2.2.1 Вибір сервоприводу

Сервопривід – вид приводу, за допомогою якого можна точно керувати параметрами руху, обертаючи вал на потрібний кут, з необхідною швидкістю. Принцип роботи сервоприводу заснований на застосуванні зворотного зв'язку, де сигнал на вході та виході замкнутого контуру системи не узгоджений. Конструкція сервоприводу складається з двигуна, датчика позиціонування, системи керування.

Переважними особливостями сервоприводів є стабільність роботи, висока стійкість до перешкод, невеликі габарити, забезпечення зворотного інформаційного зв'язку.

Головним значенням в керуванні сервоприводом є сигнал, що управляє, який являє собою імпульси постійної частоти і змінної ширини. Довжина імпульсу – один із найважливіших параметрів, що визначають положення сервоприводу. При попаданні сигналу в систему, генератор передає імпульс, відбувається порівняння тривалості поданого сигналу з контролера та генератора. Якщо сигнали відрізняються один від одного, включається електромотор, напрямок руху якого визначається тим, який з імпульсів коротший, при рівності імпульсів мотор зупиняється.

За внутрішнім інтерфейсом керування розрізняють аналогові та цифрові сервоприводи. Аналогові сервоприводи містять спеціальні мікросхеми, цифрові – мікропроцесори, що приймають та аналізують імпульси.

Цифрові сервоприводи характерні вищою швидкістю роботи, проте при цьому більш витратні витрати електроенергії собівартості.

Для реалізації проекту були використано сервоприводи SG 90, які мають наступні параметри, показані в таблиці 2.1:

Ключовими особливостями даної моделі сервоприводів є зручність підключення до мікроконтролерів на платформі AVR, легкість конструкції.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики сервоприводу SG 90

Назва	Значення
Вага	9 грам
Розміри	21,5x11,8x23мм
Обертаючий момент	1,8кг/см, 4,8В
Шестерня	Нейлоновий комплект передач
Швидкість роботи	0,1 сек/60 град, 4,8В
робоча напруга	4,8В
Діапазон температур	-15 °С +55 °С
Довжина сервоприводу	25 см

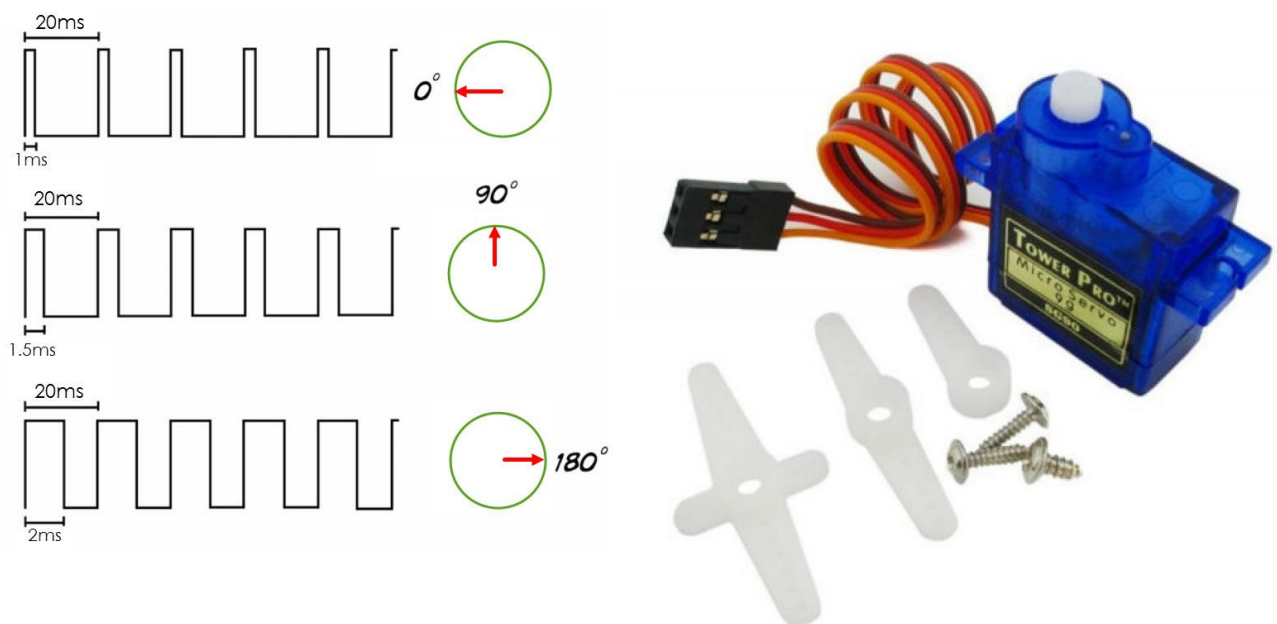


Рисунок 2.1 – Сервопривід SG 90

2.2.2 Вибір та конструювання світлочутливого датчика

Модулі датчиків освітленості – побудовані на основі фоторезисторів, є готовими схемами перетворення сили світлового потоку в цифрові або аналогові сигнали. Принцип роботи фоторезистора ґрунтується на зміні опору

під дією світлового потоку, таким чином – при падінні напруги на фоторезисторі з'являється можливість змінювати логіку роботи системи за певних параметрів.

Фоторезистори застосовують у різних системах, наприклад, автоматичні системи вуличного освітлення, охоронні модулі, системи стеження.

Основними недоліками фоторезисторів є чутливість до спектра. Залежно від типу падаючого світла, опір може кратно змінюватися і призводити до некоректності даних, що отримуються системою. Також недоліком є відносно низька швидкість реакції змiну освітленості. Однак, цей фактор не є важливим у системі стеження за Сонцем. Система стеження реалізована на основі 4 модулів MH Sensor Series DS06.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики MH Sensor Series DS06

Назва	Значення
Робоча напруга	3,3В – 5В
Розмір	3,2см x 1,4см
Стабілізатор напруга	LM393
Вихідна напруга	Аналоговий сигнал
Цифрові виходи	Сигнали 0, 1

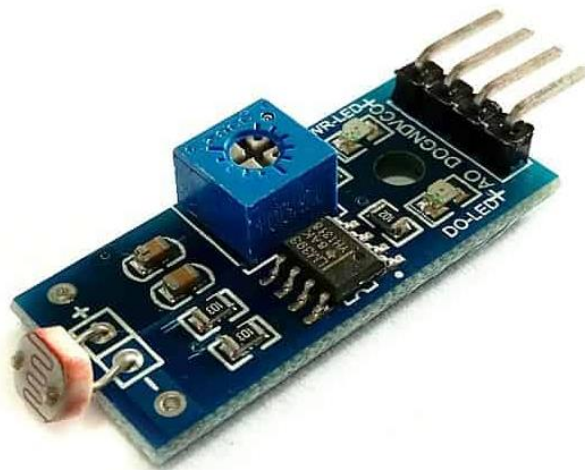


Рисунок 2.2 – MH Sensor Series DS06

Ключовими особливостями даної моделі є простота підключення, висока надійність, можливість змінити опір підстроювального резистора, можливість отримання аналогових та цифрових сигналів.

При використанні декількох датчиків освітленості виникає проблема, при недостатній віддаленості датчиків один від одного через перехресну похибку між датчиками, що виникає. У такому випадку необхідно точно позиціонувати світлочутливі модулі, коригувати їх положення в процесі експлуатації. В автономній системі такі недоліки – неприпустимі.

Для реалізації системи, що стежить, передбачається використання компонування, при якій кожен з модулів фізично закритий від сусідніх (рис. 2.3). Така система компонування – підвищує точність даних, що допомагає уникнути похибок від перехресної освітленості.

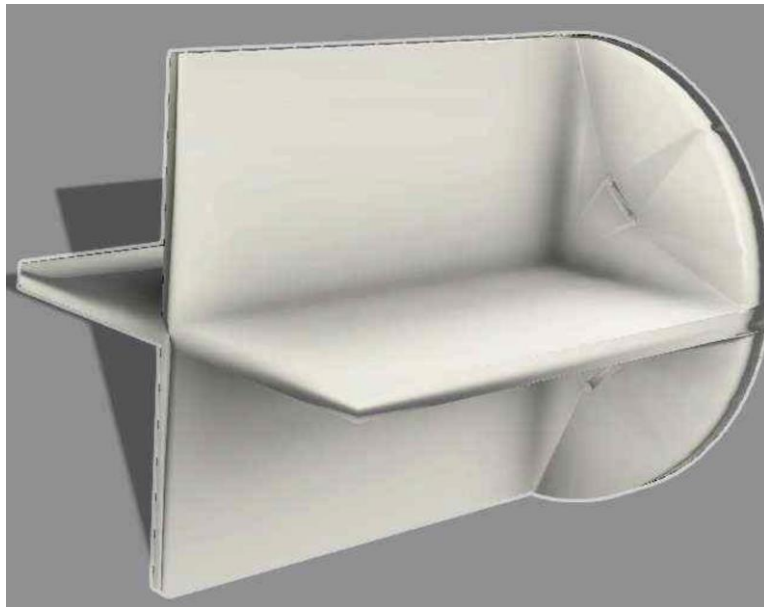


Рисунок 2.3 – Приклад деталі для встановлення світлочутливих модулів

2.2.3 Керуючий пристрій на основі мікроконтролера

Для реалізації системи керування обрано плату керування Arduino Mega, яка базується на мікроконтролері ATmega2560. (табл. 2.3, рис. 2.4).

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики Arduino Mega

Назва	Значення
Мікроконтролер	ATmega2560
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (гранична)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	54
Аналогові входи	16
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Постійний струм для виведення 3,3В	50 мА
Флеш пам'ять	256 КВ
ОЗУ	8 КВ
Енергонезалежна пам'ять	4 КВ
Тактова частота	16 МГц

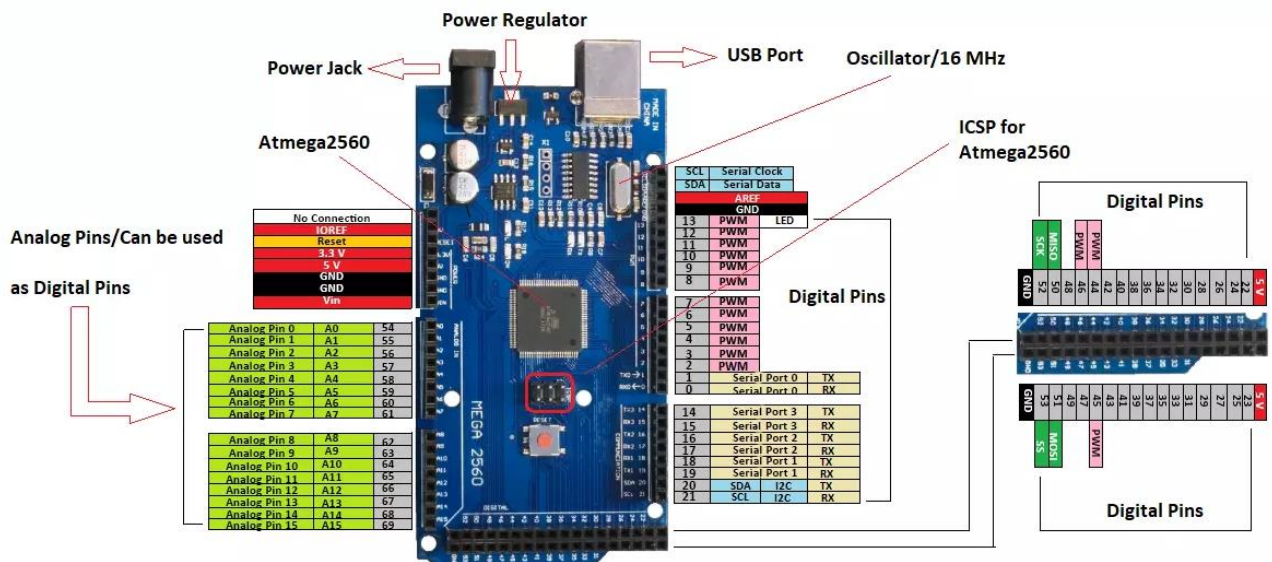


Рисунок 2.4 – Arduino Mega

На цій платі 16 аналогових входів. Кожен з них з'єднаний з 10-розрядним АЦП, тому в скетчі можна отримати 1024 рівнів значень. Діапазон значень напруги по відношенню до землі на аналогових пінах за замовчуванням

дорівнює 0-5 В. Для зв'язку з комп'ютером використовується система віртуального СОМ порту, через який можливий обмін даними між мікроконтролером та комп'ютером.

Вибір цього мікроконтролера обумовлений широкою доступністю, низькою вартістю, відкритим програмним кодом. Можливість застосування сумісних модулів дозволяє спростити процес реалізації макетної моделі. Велика кількість бібліотек, що вільно розповсюджуються, розширює список можливих технічних пристроїв для взаємодії. Зокрема, бібліотека для роботи з сервоприводами має гнучке налаштування.

Вибір моделі Mega обумовлений більш продуктивним процесором, великою кількістю аналогових виходів порівняно з базовими моделями.

2.2.4 Ручне керування системою

Для виконання ручного курування системою було обрано аналоговий двоплощинний джойстик. Даний пристрій є шарнірним, закріпленим на двох потенціометрах визначальними осі X і Y відповідно. Зміна положення ручки обертає рухомий контакт, що змінює вихідну напругу. Пристрій оснащений пружиною, яка повертає ручку в початкове положення після відпускання.

Вибраний пристрій має наступні характеристики, показані в таблиці 2.4 та вигляд як на рис. 2.5..

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики HW 504

Назва	Значення
Кількість осей	2 X, Y
Вхідна напруга	2,5-5 В
Вихідний сигнал	Значення двовісного усунення, центральна кнопка
Внутрішній опір	10 кОм

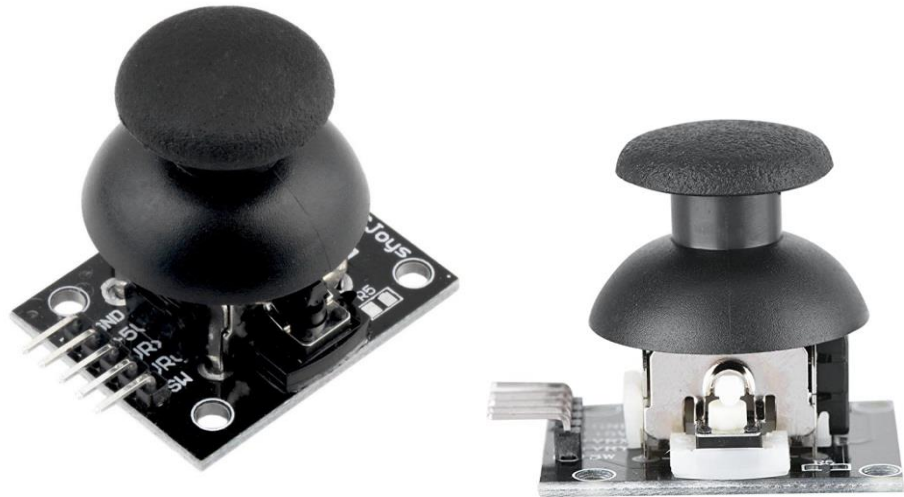


Рисунок 2.5 – Джойстик HW504

2.3 Блок-схема системи керування

Відповідно до поставлених завдань автоматизації складено блок-схему системи керування. У програмі імітаційного моделювання обрано основні сигнали, що використовуються в рамках проекту. Обробка основних обчислювальних та логічних завдань проводиться також у цьому програмному забезпеченні. Зв'язок із мікроконтролером Arduino здійснюється через COM порт.

Мікроконтролер забезпечує обмін даними із зовнішніми пристроями, що використовуються у проекті. Наявність двостороннього зв'язку дозволяє отримувати показання із зовнішніх пристроїв, а також отримувати показники із сервоприводів.

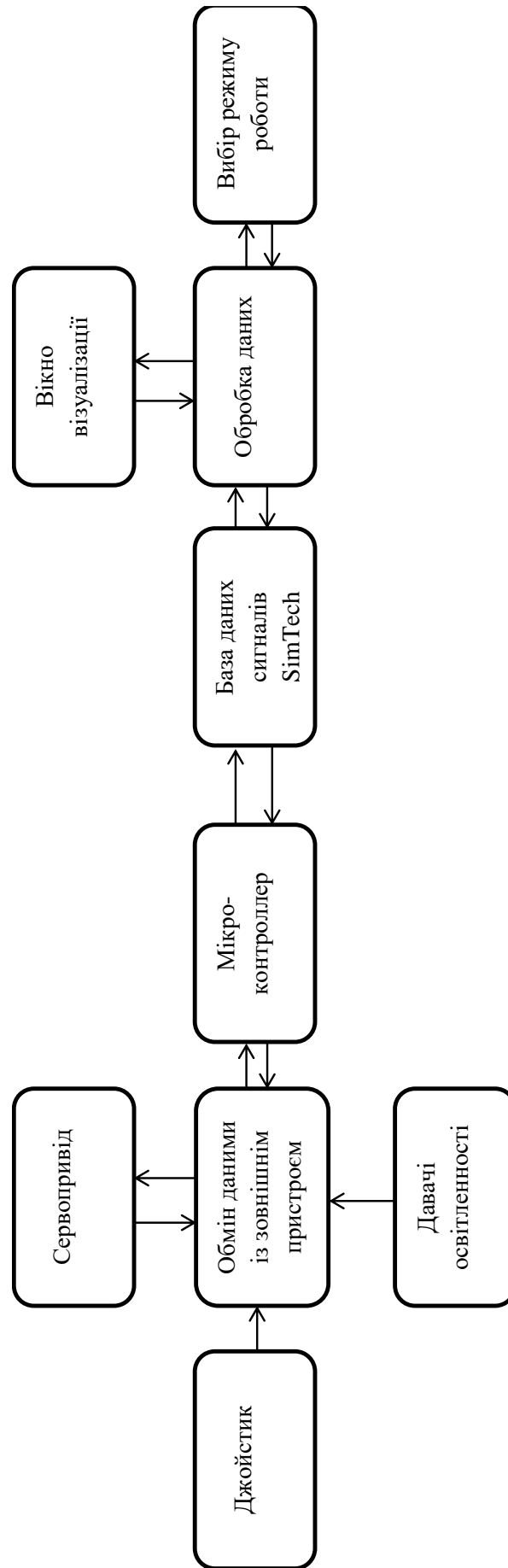


Рисунок 2.6 – Загальна блок-схема системи керування

2.4 Висновки до розділу

1. Визначено основний склад та будову системи керування положенням сонячних панелей.
2. Наведено опис характеристик органів керування та виконавчих органів із вихідними даними для подальшого моделювання.
3. Запропоновано конструкцію затіняючого елемента для світлочутливих модулів, яка забезпечить більш надійну їх роботу.
4. Представлено блок-схему системи керування.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Базові рівняння для розрахунку положення Сонця

Кут падіння сонячного випромінювання на довільно орієнтовану сонячну панель залежить від часу доби, широти місця розташування та орієнтації сонячної панелі, як показано на рис.3.1. Орієнтація панелі описується кутом нахилу α і кутом азимута γ (рис. 3.1). Кут висоти Сонця β можна розрахувати за формулою (3.1).

$$\sin \beta = \cos l \cdot \cos h \cdot \cos \delta + \sin l \cdot \sin \delta, \quad (3.1)$$

де l – місцева широта;

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

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

N – номер дня.

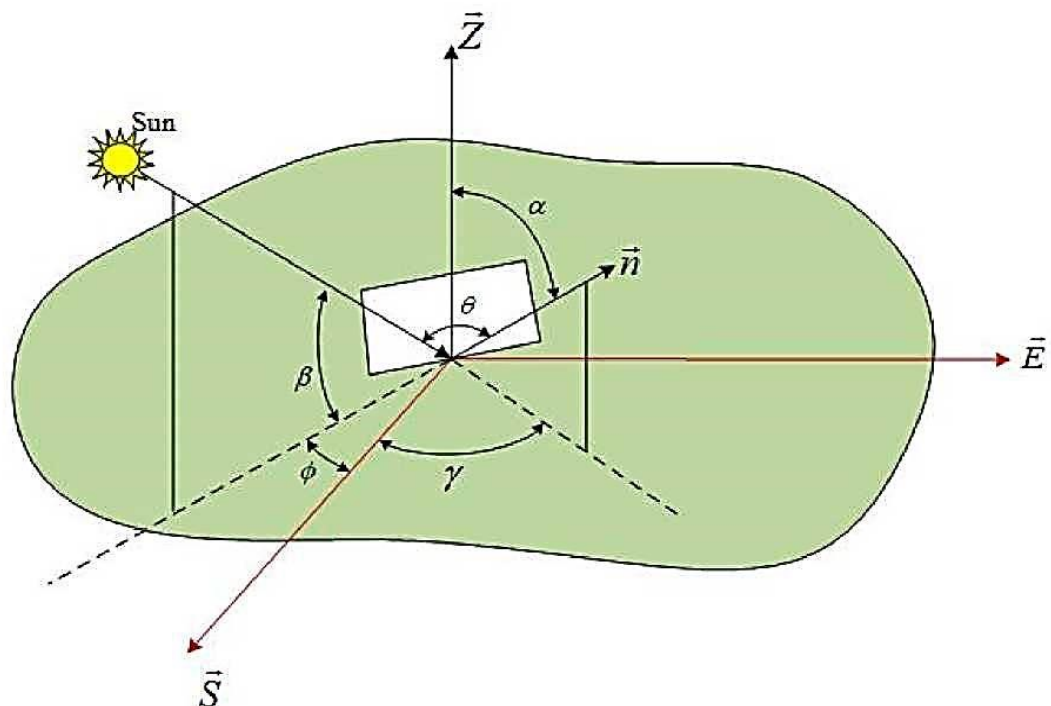


Рисунок 3.1 – Сонячна панель із ілюстрацією її орієнтації та кутів на Сонце. Вектори S і E позначають напрямки на південь – південний і східний напрямки відповідно. Вектор n – нормаль до площини сонячної панелі. Вектор Z це зенітний вектор, перпендикулярний до площини SE

Сонячний час можна обчислити за місцевим стандартним часом, місцевою довготою L_{loc} та стандартною довготою часового поясу L_{st} за формулою

$$\text{Сонячний час} = \text{Стандартний час} + [4(L_{st} - L_{loc}) + EOT]/60. \quad (3.2)$$

Рівняння часу має вигляд:

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

де $B = 2\pi(N - 81)/365$.

Обидва азимутальні кути, сонячний φ і панелі γ , вимірюються відносно напрямку на південь, тому вони є додатними для західної сторони, від'ємними для східної сторони і нульовими для панелей, орієнтованих на південь. Кут сонячного азимута розраховується за формулою (3.3).

$$\varphi = -1^s \cos^{-1} \left(\frac{\sin \beta \sin l - \sin \delta}{\cos \beta \cos l} \right). \quad (3.3)$$

У цьому рівнянні показник степеня $s = 1$ для сонячного ранку ($h < 0$), $s = 2$ для сонячного дня ($h > 0$) і $\varphi = 0$ при сонячному полудні $h = 0$.

Кут між сонячним променем, що падає на панель, і нормаллю до панелі (кут θ на рисунку 3.1) обчислюється за допомогою рівняння (3.4).

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

База даних Національної лабораторії відновлюваної енергетики (NREL) містить сонячні дані для дифузного горизонтального падіння (DHI), прямого нормального падіння (DNI) та глобального горизонтального падіння (GHI) як для фактичних умов, так і для умов ясного неба. Значення DNI зазвичай вимірюється піранометром, який відслідковує рух Сонця, а GHI вимірюється

стаціонарним піранометром. Значення DHI можна обчислити за формулою (3.5).

$$DHI = GHI - DNI \sin \beta. \quad (3.5)$$

Крім погодинних сонячних даних, база даних NREL містить погодинну температуру навколишнього середовища, швидкість вітру і альбедо землі, які мають певний вплив на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей.

3.2 Електроенергія, яка генерується сонячною панеллю

Сумарна інсоляція, що надходить на поверхню сонячної панелі, складається з трьох компонентів: променевого, дифузного та відбитого від землі випромінювання, що можна виразити як

$$I_T = DNI \cos \theta + DHI \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) + GHI \rho_g \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) \quad (3.6)$$

де ρ_g – альбедо земної поверхні,
 α – кут нахилу сонячної панелі.

Коли $\theta > 90^\circ$, то на панель не потрапляє пряме сонячне проміння і перший доданок у рівнянні (3.6) дорівнює нулю.

Частина сонячного променя, який потрапляє на фотоелектричну панель під кутом падіння θ , проходить через покриття панелі і поглинається фотоелектричним елементом. Ця частка виражається добутком пропускання на поглинання, який визначається за формулою [3].

$$K_{\tau\alpha} \theta = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 \theta_r - \theta}{\sin^2 \theta_r + \theta} + \frac{\tan^2 \theta_r - \theta}{\tan^2 \theta_r + \theta} \right) \right] \quad (3.7)$$

де θ_r – кут відбивання, оцінюється за формулою Снелла:

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

де n – показник заломлення.

Для оцінки сонячного падіння, що пропускається і поглинається фотоелектричною панеллю, всі три члени рівняння (3.7) множаться на відповідні значення $K_{\tau\alpha}$, як показано в рівнянні (3.8).

$$I_{T,PV} = DNI \cos \theta K_{\tau\alpha} \theta_b + DHI \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) K_{\tau\alpha} \theta_{e,d} + \dots \quad (3.8)$$

$$+ GHI \rho_g \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) K_{\tau\alpha} \theta_{e,g}$$

де $\theta_{e,d}$ і $\theta_{e,g}$ – позначають ефективний дифузний кут падіння і ефективний відбитий від землі кут падіння, відповідно.

При дифузному та відбитому від землі сонячному випромінюванні промені падають на панель з усіх напрямків. Отже, не існує єдиного кута для цих двох термінів. Кореляції для ефективних кутів падіння дифузної та відбитої від землі інсоляції на похилі поверхні були розроблені Брандемуелем та Бекманом [14]. Ці кореляції відображену в рівняннях (3.9).

$$\theta_{e,g} = 90 - 0,5788 \cdot a + 0,002693 \cdot a^2 \text{ для відбитої від землі інсоляції} \quad (3.9)$$

$$\theta_{e,d} = 59,7 - 0,1388 \cdot a + 0,001497 \cdot a^2 \text{ для дифузної інсоляції.}$$

Враховуючи умови, обумовлені в рівнянні (3.6) для будь-якого кута падіння, більшого за 90° , рівняння (3.8) зводиться до рівняння (3.10). Це пов'язано з тим, що при $\theta_b > 90^\circ$ промінь інсоляції знаходиться за панеллю.

$$I_{T,PV} = DNI \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) K_{\tau\alpha} \theta_{e,d} + GHI \rho_g \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) K_{\tau\alpha} \theta_{e,r} \text{ при } \theta_b > 90^\circ \quad (3.10)$$

Значення ефективного кута дифузного падіння, $\theta_{e,d}$, змінюється між 55° і 60° , де, виходячи з рівняння (3.7), визначається передано-поглинений коефіцієнт. $K_{\tau\alpha}$ коливається від 0,9 до 0,93. Однак, ефективний кут падіння відбитого від землі світла перевищує 60° для всіх кутів нахилу, що робить значення $K_{\tau\alpha}$ близько 0,95.

3.3 Ефективність сонячної панелі

На ефективність фотоелектричних систем впливають температура навколишнього середовища та швидкість вітру. Всебічний огляд наявних кореляційних залежностей для впливу температури навколишнього середовища та швидкості вітру наведено в [15,16]. У цій роботі використовується наступна залежність:

$$\eta = \eta_{ref} \left\{ 1 - \beta_{ref} \left[T_{\alpha} - T_{ref} + \left(\frac{9.5}{5.7 + 3.8V_{\omega}} \right) T_{NOCT} - T_{\alpha} \frac{I_t}{I_{t,NOCT}} \right] \right\} \quad (3.11)$$

де η – вихідна ефективність масиву фотоелектричних панелей;

η_{ref} – еталонна ефективність, яка є ефективністю панелі, що постачається виробником;

β_{ref} – температурний коефіцієнт фотоелектричної панелі ($0,0045 \text{ K}^{-1}$);

T_{α} – температура навколишнього середовища;

T_{ref} – еталонна температура фотоелектричних панелей ($25 \text{ }^\circ\text{C}$);

V_{ω} – швидкість вітру в м/с.

Погодинна локальна температура навколишнього середовища та швидкість вітру отримані з даних, отриманих з бази даних NREL. Умови номінальної робочої температури комірки (NOCT) такі: $T_{NOCT} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $I_{t,NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$.

3.4 Потужність постійного струму від сонячної батареї

Потужність постійного струму, що надходить від фотоелементів,

визначається з рівняння (3.12). Існують інші втрати в електричних перетворювачах, які не розглядаються в цій роботі, оскільки основна увага приділяється орієнтації сонячних панелей для максимізації потужності постійного струму, що надходить від фотоелектричних панелей.

$$W_{n,t} = \eta I_{t,PV} \quad (3.12)$$

Для визначення сумарної річної потужності постійного струму, отриманої від фотоелектричних панелей, рівняння (3.12) інтегрується за весь рік, тобто,

$$P = \sum_{n=1}^{365} \sum_{t=1}^{28} W_{n,t} \Delta t \quad (3.13)$$

де Δt дорівнює 0,5 год, оскільки дані, надані NREL, базуються на кожних півгодини.

Річна потужність постійного струму ФЕС не включає втрати в інверторі постійного струму в змінний. Середня погодинна потужність за весь рік або сезон розраховується за допомогою рівняння (3.14).

$$P_t = \frac{\sum_{n=N_1}^{N_2} W_{n,t}}{N_2 - N_1 + 1} \quad (3.14)$$

де N_1 – перший день періоду усереднення;

N_2 – останній день періоду усереднення.

Для всього року $N_1 = 1$ і $N_2 = 365$, а для літа (червень, липень і серпень) $N_1 = 151$ і $N_2 = 245$. У цій роботі розраховуються погодинні середні значення для всього року та літа. Однак модель може бути використана для розрахунку погодинної потужності для будь-якого періоду року. Ця функція використовується для оцінки часу доби, коли сонячна енергія досягає піку. Крім того, вона є орієнтиром для виробництва більшої кількості енергії в той

час доби, коли попит на енергію досягає піку.

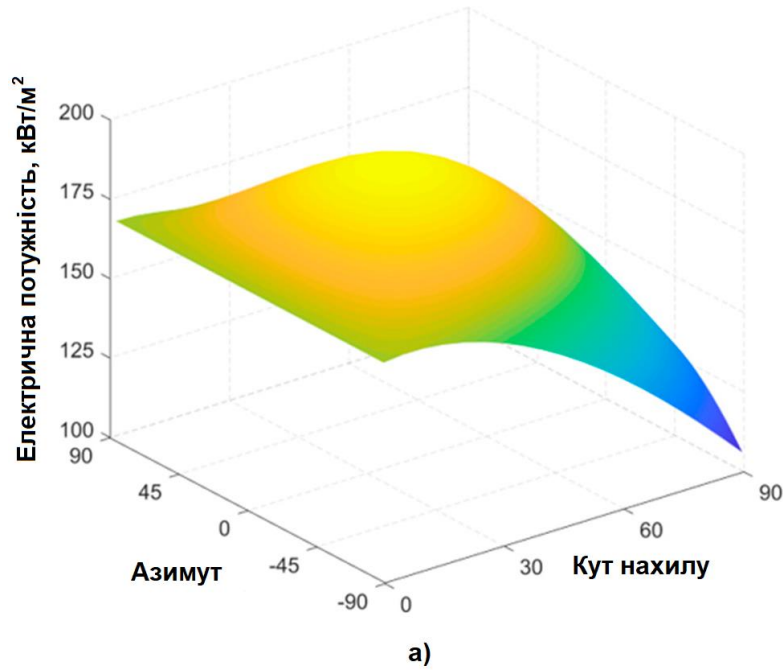
3.5 Аналіз результатів розрахунків

Розглянуто можливість використання сонячних панелей у найбільш південному місті Одеської області м. Вилкове. Орієнтація сонячних панелей базується на енергетичних потребах системи. У даних розрахунках основним є визначення максимального річного виробництва електроенергії. Максимальне річне виробництво сонячної енергії може бути досягнуте за допомогою панелей, орієнтованих на південь з кутом нахилу, що дорівнює широті місцезнаходження. Це коректне правило, якщо кліматичні дані симетричні відносно сонячного полудня. Однак, для деяких місцевостей різниця в кліматичних умовах призводить до меншої інсоляції в ранкові або післяобідні години.

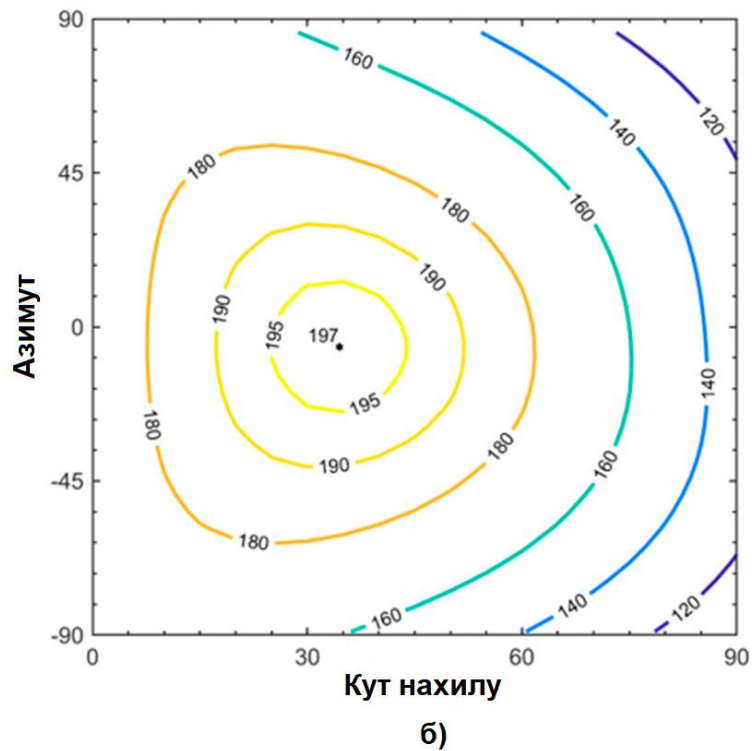
М.Вилкове розташовується на широті 45,4 пн.ш. і довготі 29,6 сх.д. Оптимальною орієнтацією панелей на основі даного підходу і історичних сонячних і кліматичних даних є кут нахилу $33,68^\circ$ і кут азимуту $-5,62^\circ$ (дещо на схід). Це забезпечить до $1690 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ сумарного сонячного випромінювання на площу панелі та $197 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ річного виробітку електроенергії постійного струму від панелі. Використовуючи емпіричне правило, панель, орієнтована на південь з кутом нахилу $45,4^\circ$, дає $1676 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ сонячного випромінювання і $194,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ електричної енергії, що приблизно на 1 % нижче, ніж при оптимізованій орієнтації для отримання максимальної потужності.

На рис. 3.2 показані поверхневі та контурні графіки залежності річної потужності, що генерується одним метром квадратним панелі, від її орієнтації, азимуту та кутів нахилу. Отримані розрахунковим шляхом дані, зображені на рис. 3.2,а, використовується для розрахунку оптимальної орієнтації фотоелектричної панелі, яка забезпечує максимальну річну потужність. Отримані розрахунковим шляхом дані, зображені на рис. 3.2,б

використовується для оцінки потужності, що генерується СЕС, якщо орієнтація панелі відхиляється від оптимальної.



Поверхневий графік залежності потужності постійного струму ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) від кута нахилу та азимута



Криві залежності потужності постійного струму ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) від орієнтації панелі
 Рисунок 3.2 – Поверхневі та контурні графіки електричної потужності постійного струму на квадратний метр, згенерованої фотоелектричними панелями, в залежності від кута нахилу панелей. Точка посередині показує

оптимальний кут нахилу $33,68^\circ$ і кут азимута $-5,62^\circ$, при якому фотоелектрична панель виробляє $197 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ енергії.

У деяких містах України, попит на електроенергію через інтенсивне використання кондиціонерів є високим влітку в другій половині дня. Таким чином, панель, орієнтована на захід, може призвести до більшої генерації електроенергії в післяобідні години. Однак це може зменшити загальну річну потужність, що генерується панеллю.

У таблиці 3.1 представлено порівняння результатів між даним підходом і трьома широко використовуваними моделями «ясного неба» [17], місячним індексом ясності [18] і «емпіричним правилом». З таблиці 3.1 видно, що кути нахилу за даною моделлю (CDDOP) та моделлю індексу ясності подібні. Однак, прогнозоване сонячне випромінювання на панелі на основі моделі індексу ясності на $8,6 \%$ нижче, ніж за існуючою моделлю. Це пов'язано з тим, що модель індексу ясності використовує місячні дані, які не враховують погодинні зміни інсоляції. Кути нахилу на основі «ясного неба» та «емпіричного правила» ідентичні, тоді як «ясне небо» забезпечує значно більшу річну сонячну радіацію.

Таблиця 3.1 – Порівняння річного вироблення сонячної панеллю електроенергії постійного струму для системи управління орієнтацією, та іншими найбільш ефективними положеннями стаціонарного монтажу

		Методика визначення		
		Ясне небо, система стеження	Щомісячний індекс ясності	Емпіричне правило: Кут нахилу = широта
Кут нахилу	$41,2^\circ$	$33,6^\circ$	$45,4^\circ$	$33,68^\circ$
Кут азимута	0	0	0	-5,62
Річний показник сонячної енергії від панелі, кВт·год	2487	1544	1676	1690

Відповідно до даних таблиці 3.1 без системи керування сонячні панелі будуть виробляти лише 67,9 % електроенергії .

Контурний графік на рис. 3.2, б використовується для того, щоб забезпечити річну потужність на відносно високому рівні і відповідати піковому попиту влітку після обіду.

Оцінка середньодобової варіації потужності за весь рік і літні місяці (червень, липень і серпень) для трьох орієнтацій показана на рис.3.3 (3.4). Існує невелика різниця між годинною оптимальною орієнтацією і орієнтацією на південь, яка має кут нахилу, що дорівнює широті місцезнаходження. Отримані розрахунковим шляхом дані, зображені на рис. 3.3, 3.4 можна використовувати для забезпечення максимального виробництва електроенергії в період пікового попиту. Наприклад о 16:00 в літні місяці попит на електроенергію досягає піку. Згідно з рис. 3.4 оптимальна орієнтація та орієнтація на південь виробляє ~ 38 Вт/м², тоді як панель, орієнтована на захід, виробляє 54 Вт/м², що означає збільшення виробництва електроенергії на 42 % в період підвищеного попиту.

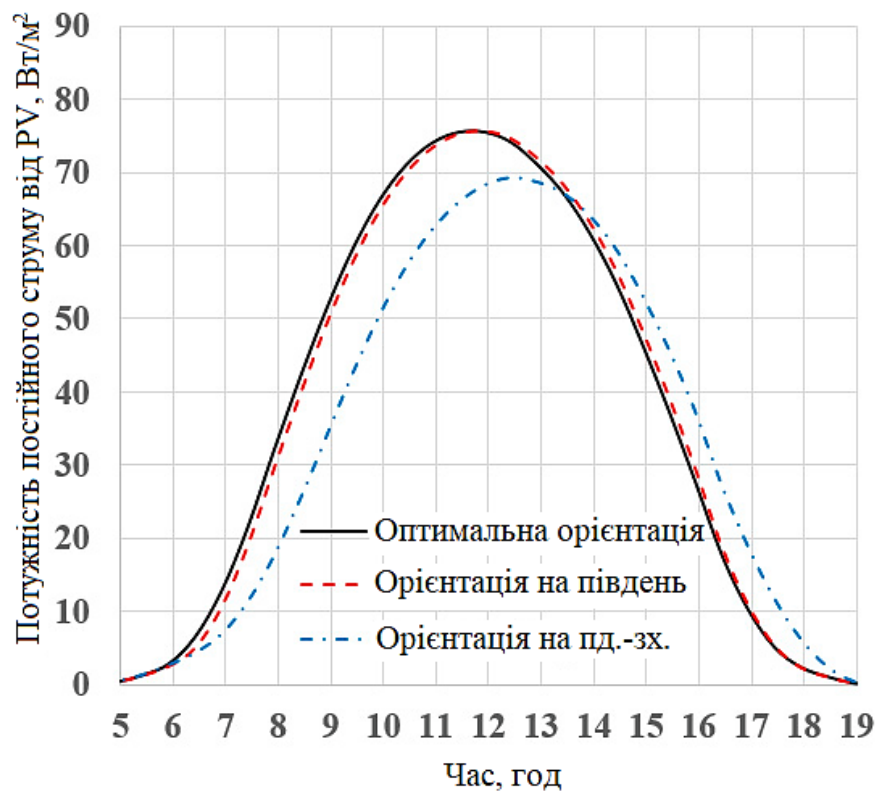


Рисунок 3.3 – Середньодобове виробництво електроенергії постійного струму за весь рік

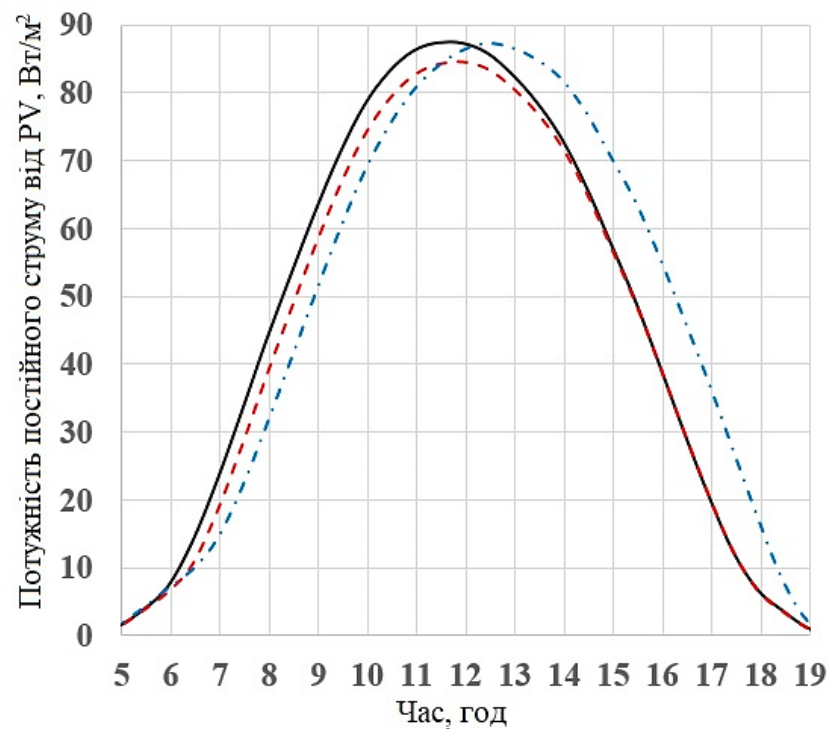


Рисунок 3.4 – Середньодобове виробництво електроенергії постійного струму за літні місяці (червень, липень і серпень)

Середньодобовий розподіл потужності для оптимальної орієнтації та панелей, орієнтованих на південь, має дуже схожу картину, тоді як панелі, орієнтовані на захід, виробляють значно більше енергії влітку в другій половині дня.

3.6 Моделювання системи керування кутом нахилу

3.6.1 Вихідні дані

Як технологічний процес для моделювання автоматизованої системи, було обрано слідкуючу систему коригування положення сонячних панелей. Сонячні панелі служать для генерації електроенергії, а стеження протягом дня за Сонцем допомагає отримати максимальну кількість електроенергії протягом світлового дня.

Склад моделі автоматичної системи керування (АСК) (рис. 3.5):

- Мікроконтролер
- Зовнішнє обладнання;
- Блок візуалізації.
- База даних сигналів;

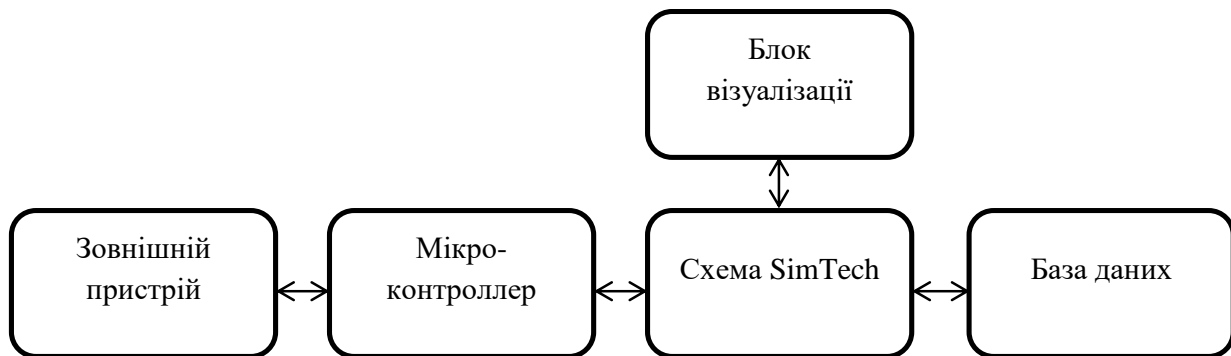


Рисунок 3.5 – Будова моделі АСК

Проектована АСК повинна містити кілька режимів курування:

- Ручне керування;
- Пряме задання кута;
- Автоматичне керування;
- Імпорт зовнішніх даних позиціонування.

Основні засоби програми імітаційного моделювання, що використовуються:

- Блок програмування;
- База даних сигналів;
- Блок констант;
- Блок обміну даними;
- Субмоделі;
- Сигнали;
- Виведення даних;

3.6.2 Субмоделі програми імітаційного моделювання

Для зручності читання схеми було вирішено розбити її на кілька функціональних субмоделей. У даних блоках реалізовані модулі (рис.3.6), що виконують поставлені вимоги до системи.

Умовна схема зв'язку між блоками представлена рис.3.6. Первинні дані приймаються у блоці обміну сигналів, фільтруються, фіксуються у базі даних програми імітаційного моделювання. Потім сигнали з бази даних використовуються для різних режимів роботи моделі відповідно до технічного завдання. При необхідності отримані дані обробляються у блоці калібрування. Калібрування проводиться для точного налагодження показів фоторезисторів, усунення похибок. Оброблені значення використовуються у «блоці режимів» для автоматичних режимів роботи. Підсумкові розрахункові значення виводяться в блоці графіків, а також направляються в блок обміну сигналів для відправки на мікроконтролер.

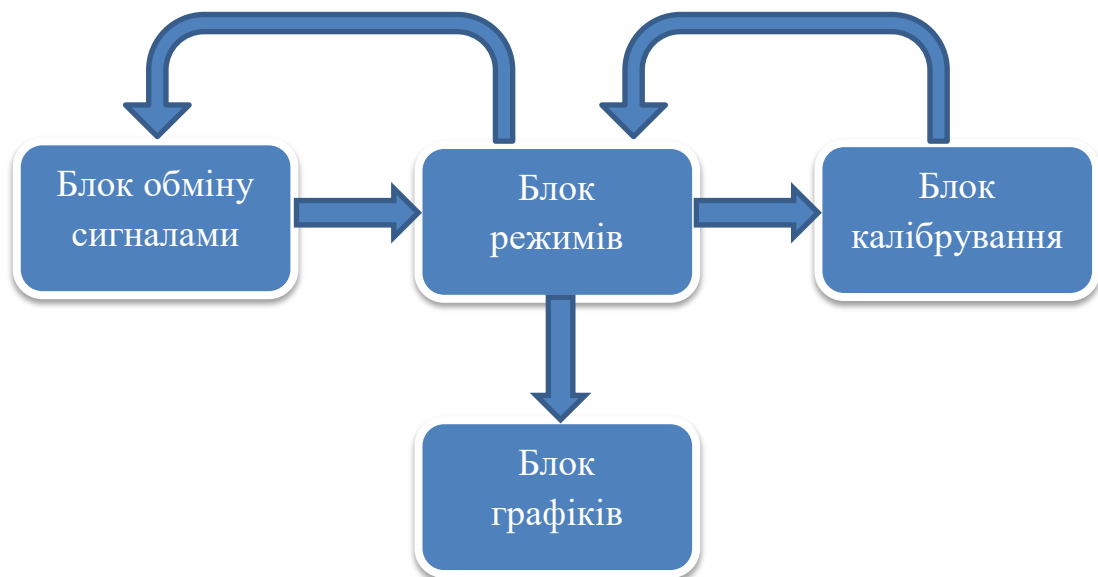


Рисунок 3.6 – Умовна схема зв'язку субмоделей

База даних розділена на три групи сигналів: група сигналів "Signals", група сигналів "1st", група сигналів "imp".

Субмодель «обміну сигналів» (рис.3.6) є ключовим блоком для обміну даними з мікроконтролером. Загальна схема реалізації цієї субмоделі

відображена на рис.3.7

3.6.3 Блок обміну сигналами

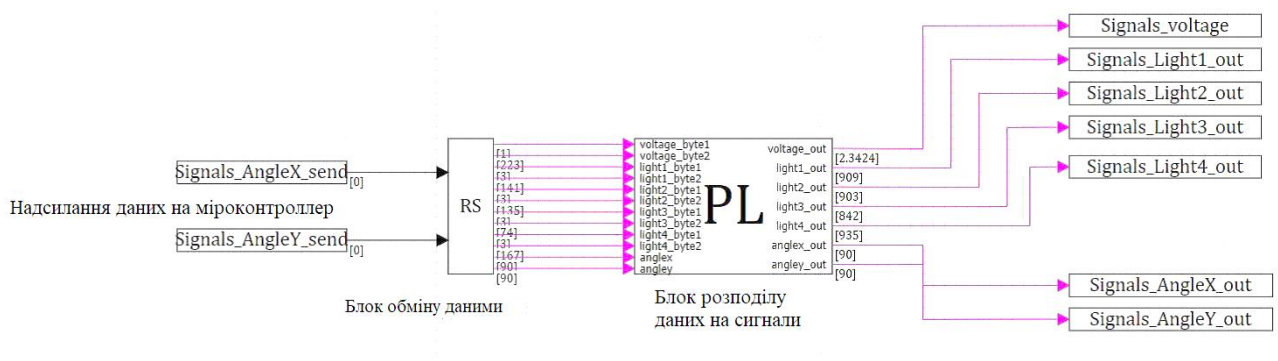


Рисунок 3.7 – «Блок обміну сигналами»

Найважливішим елементом «Блоку обміну сигналами» є блоки RS, PL. У блоці RS налаштовуються формати пакетів, їх тип, розмірність, швидкість обміну даними, крок обміну даними, номер послідовного порту встановлення зв'язку. Сигнали, що відправляються з даного блоку, – приймаються з мікроконтролера, і направляються в PL блок для фільтрації. Прийнятими сигналами для цього блоку є необхідні значення положення сервоприводів, що вказуються мікроконтролером.

У блоці PL (рис.3.8), реалізована функція перетворення прийнятих пакетів даних у цілі числа, присвоєння сигналам, що надходять, з мікроконтролера еквівалентних сигналів у базі даних. Використання цього коду дозволяє уникнути некоректних значень порту.

```
input voltage_byte1, voltage_byte2, light1_byte1, light1_byte2, light2_byte1, light2_byte2, light3_byte1, light3_byte2, light4_byte1, light4_byte2, anglex, angley;

output voltage_out, light1_out, light2_out, light3_out, light4_out, anglex_out, angley_out;

voltage_out = (voltage_byte1*256 + voltage_byte2)*0.00488;
light1_out = light1_byte1*256 + light1_byte2;
light2_out = light2_byte1*256 + light2_byte2;
light3_out = light3_byte1*256 + light3_byte2;
light4_out = light4_byte1*256 + light4_byte2;
anglex_out = anglex;
angley_out = angley;
```

Рисунок 3.8 – PL блок, субмодель «Блок розподілу даних на сигнали»

Вихідними сигналами з цього блоку є перетворені дані з мікроконтролера:

- 4 пакети даних для кожного з використовуваних фоторезисторів;

- Поточні значення положення сервоприводу;
- Напруга із сонячних панелей.

3.6.4 Блок режимів

«Блок режимів» містить три алгоритми курування, два з яких автоматизовані. Для зручності читання схеми, блоки реалізують певний режим курування відзначені кольорами на рис.3.9.

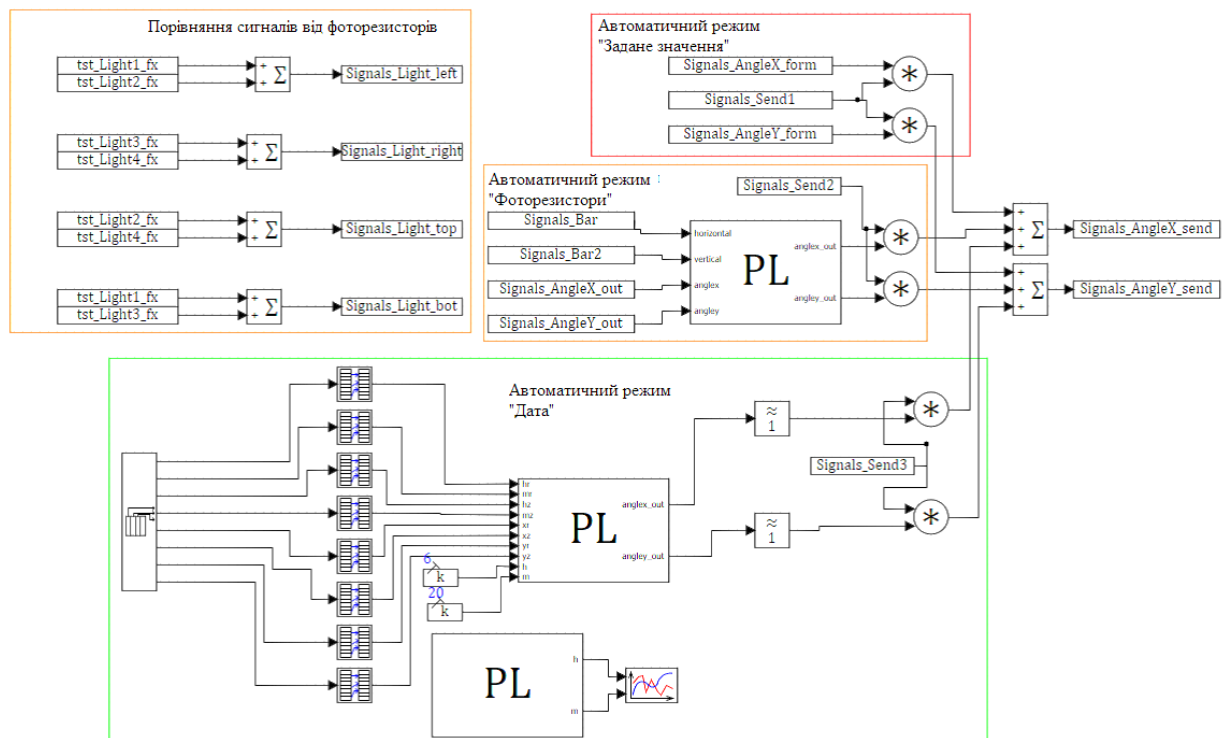


Рисунок 3.9 – «Блок режимів»

Режим завдання кута позначений червоним кольором. У цьому режимі значення, отримані з вікна оператора, передаються до бази даних сигналів.

Режим автоматичного курування за даними з фоторезисторів складається з модулів порівнянь показань різних сторін системи стеження, і блоку програмування, що відповідає за обраний режим роботи.

Режим керування «дата» базується на імпорті значень із зовнішнього файлу з потрібними параметрами положення макетної моделі.

Вихідними даними субмоделі є значення, готові до відправки в субмодель «блок обміну сигналами», а потім в мікроконтролер.

3.6.5 Режим автоматичного керування на основі фоторезисторів

На рис.3.10 представлено блок порівняння значень фоторезисторів шляхом використання суматорів. Умовні пари вихідних значень є наступними показаннями:

- Ліві фоторезистори;
- Праві фоторезистори;
- Нижні фоторезистори;
- Верхні фоторезистори.

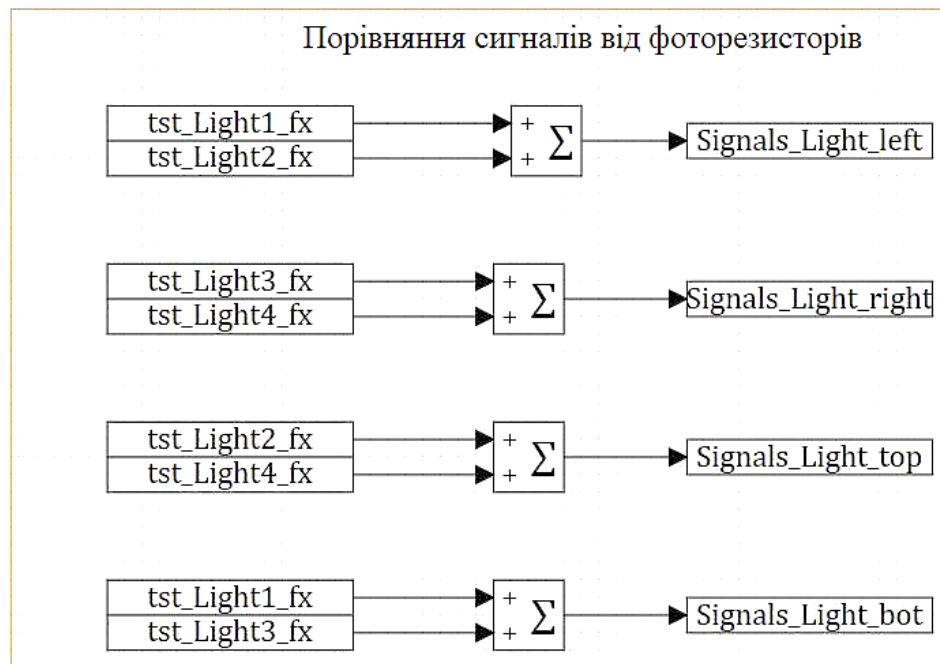


Рисунок 3.10 – Порівняння сигналів від фоторезисторів

Потім дані передаються субмоделю «блок калібрування», де попарно розбиваються на значення відносно вертикальної і горизонтальної площині (рис. 3.11).

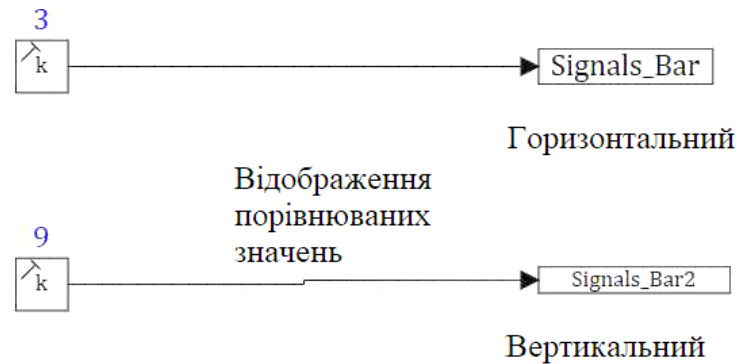


Рисунок 3.11 – «Блок калібрування»

При надходженні значення «1» з вікна оператора блок Signals_Send2, ініціалізується режим роботи виходячи зі значень фото резистора (рис. 3.12).

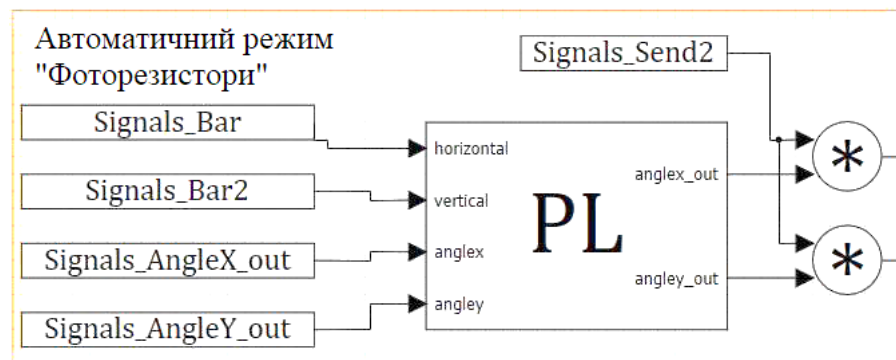


Рисунок 3.12 – Автоматичний режим відповідно до значень фоторезисторів

У блоці програмування на рис 3.13 проводиться порівняння перетворених показників з фоторезисторів, в залежності від різниці між показниками, якщо різниця перевищує помилку «error» проводиться поворот установки в горизонтальній або вертикальній площині.

```

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 3.13 – Блок програмування, субмодель «Блок режимів», режим

фоторезисторів

Отримані в блоці програмування значення передаються блок обміну даними.

3.6.6 Режим автоматичного керування «дата»

Режим базується на імпорті даних із таблиці формату .csv.

Таблиця для роботи режиму має бути представлена в наступному форматі:

Таблиця 3.2 – значення для файлу імпорту

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
-------------	-------------	--------------	--------------	----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------

На рис.3.14 наведено дані для налагодження системи в табличному форматі. Рядки в даному випадку є певним днем.

	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 – Таблиця даних MS Excel для імпорту

У блоці «таблиця даних із файлу» вказується шлях до файлу, кількість стовпців із файлу, що імпортуються. Загальна схема роботи даного режиму представлена рис. 3.15.

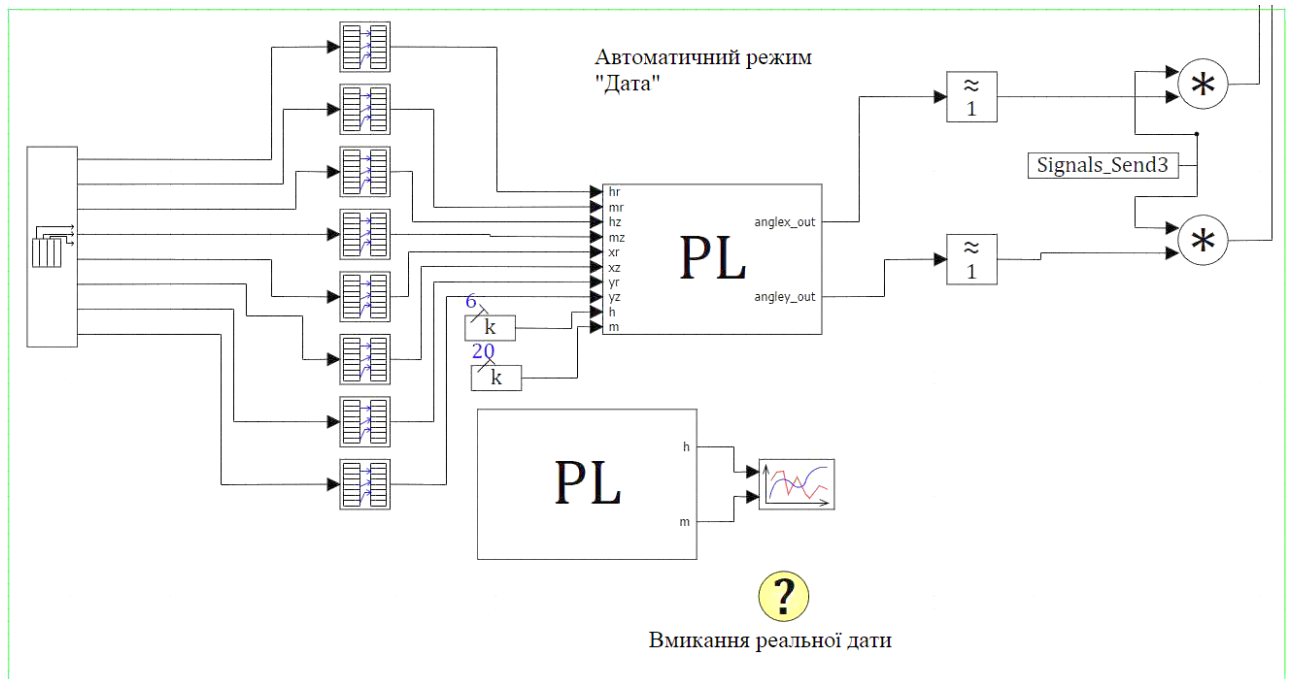


Рисунок 3.15 – Автоматичний режим «Дата»

Потім, необхідний рядок таблиці, що отримується з вікна оператора передається в блоки «вибірка з вектора», які в свою чергу, одержують необхідні значення. Значення передаються у блок програмування.

За отриманими даних відбувається математичний розрахунок необхідного положення установки (рис.3.16). Даний режим автоматичної роботи дозволяє використовувати як поточні дані системи з блоку програмування розташованого нижче (рис.3.17), так і дані для тестування, зазначені в блоках констант, підключених до блоку. Для зміни типу роботи необхідно вручну перемикаєти вхідні сигнали із необхідного блоку.

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

Рисунок 3.16 – Блок програмування, субмодель Блок режимів,

автоматичний режим «Дата».

```

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

  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

```

Рисунок 3.17 – Блок програмування, субмодель Блок режимів, автоматичний режим «Дата».

Отримані на виході з програмного блоку значення округляються до цілих значень в наступних блоках, і передаються в мікроконтролер.

3.6.7 Блок калібрування

У «Блоці калібрування» представлені інструменти для точного налаштування значень, що отримуються з фоторезисторів. Для зручності читання схеми – дана субмодель розбита на сегментні блоки. У кожному з сегментних блоків зверху знаходиться блок константа, який задає значення для

налаштування похибки кожного з фото резисторів (рис.3.18). У нижній блок константи передається вихідне значення з фоторезисторів, які отримують з мікроконтролера.

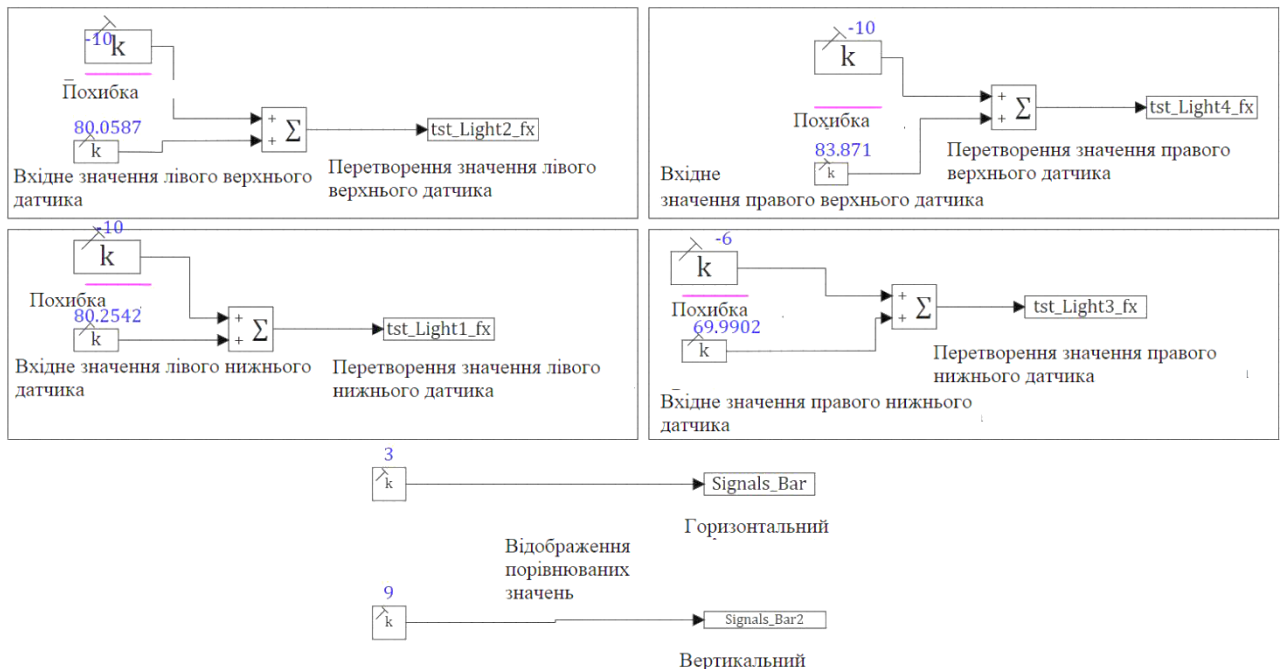


Рисунок 3.18 – «Блок калібрування»

Вихідним значенням кожного з сегментів є відкаліброване і перетворене значення для подальшого використання в інших блоках і субмоделях.

3.6.8 Блок графіків

«Блок графіків» призначений для візуалізації значень та зручності їхньої інтерпретації користувачем (рис. 3.19). У верхньому сегментному блоці представлені як пряме значення напруги, що отримується із сонячних панелей, так і фільтрація значень. Середній блок є відображенням на графіку перетворених значень з фоторезисторів. У нижньому блоці проводиться порівняння та відображення показів у площинах.

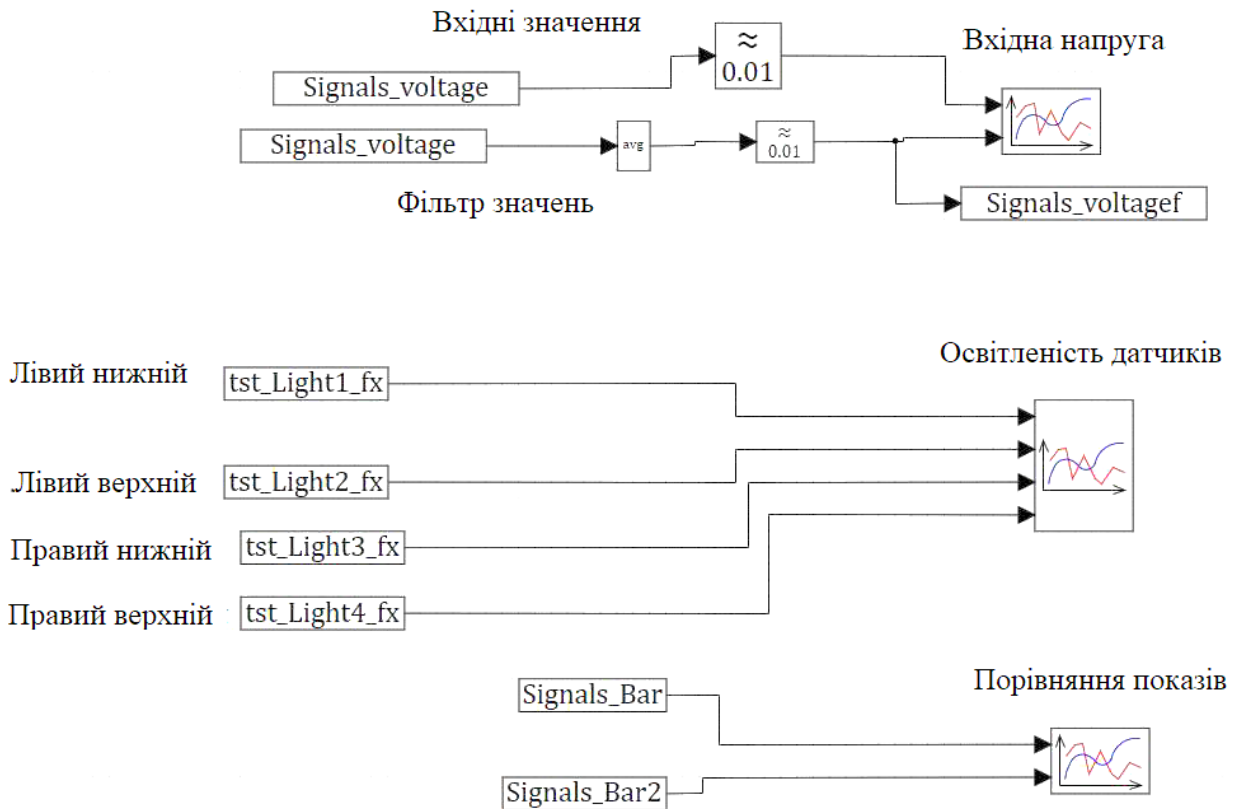


Рисунок 3.19 – «Блок графіків»

Для демонстрації роботи графіків наведено приклади роботи режиму «Автоматичний (фоторезистори)». Значення відносної освітленості, що встановилися, не перевищують 1 (рис.3.20, 21, 22), макетна модель прийняла положення в напрямку до джерела світла.

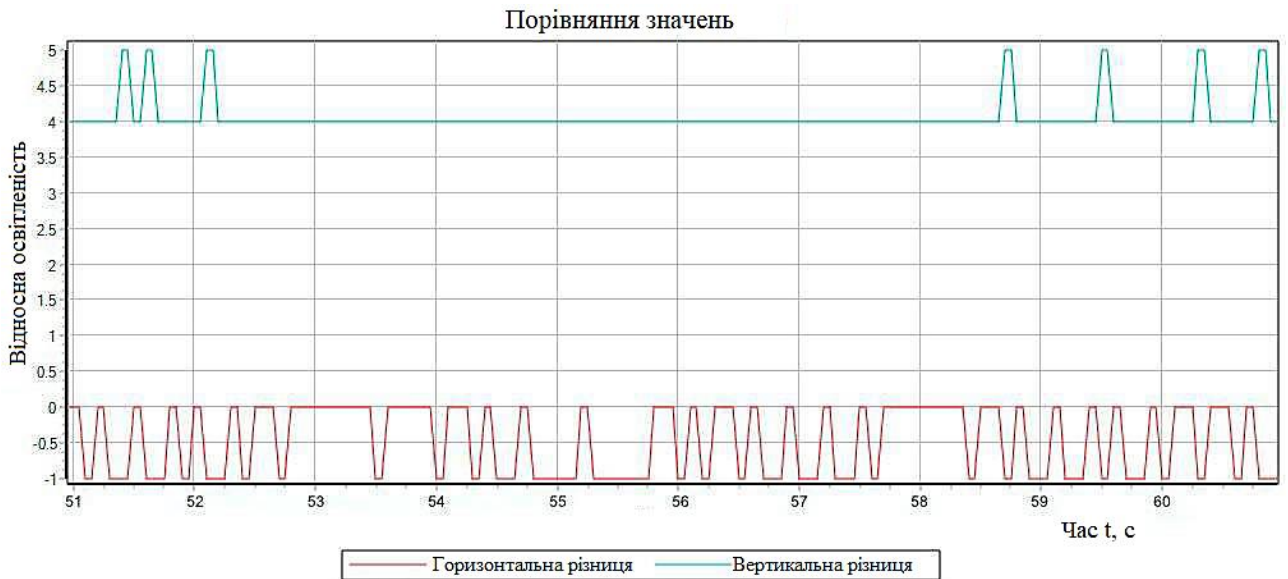


Рисунок 3.20 – Графік відносного порівняння значень



Рисунок 3.21 – Графік реальної та відфільтрованої вхідної напруги

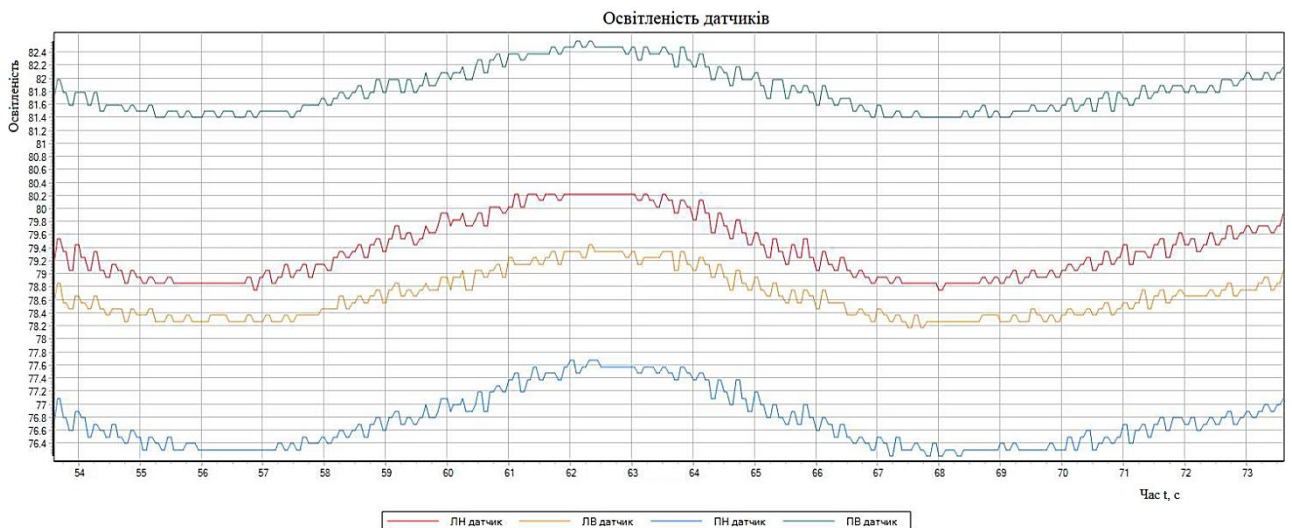


Рисунок 3.22 – Графік освітленості датчиків

3.7 Конструктивні елементи моделі системи зміни кута нахилу

Для проектування конструктивних елементів моделі системи керування було використано програмний пакет Fusion360. Відповідно до розмірів, обумовлених вибором компонентів (див. розділ 2), типом компоновки системи стеження були спроектовані необхідні конструктивні елементи. Хрестовина для фоторезисторів представлена рис.2.3. Підставка, елементи кріплення для осьових сервоприводів, планка кріплення, навісних модулів зображені рис. 3.23, 3.24, 3.25.

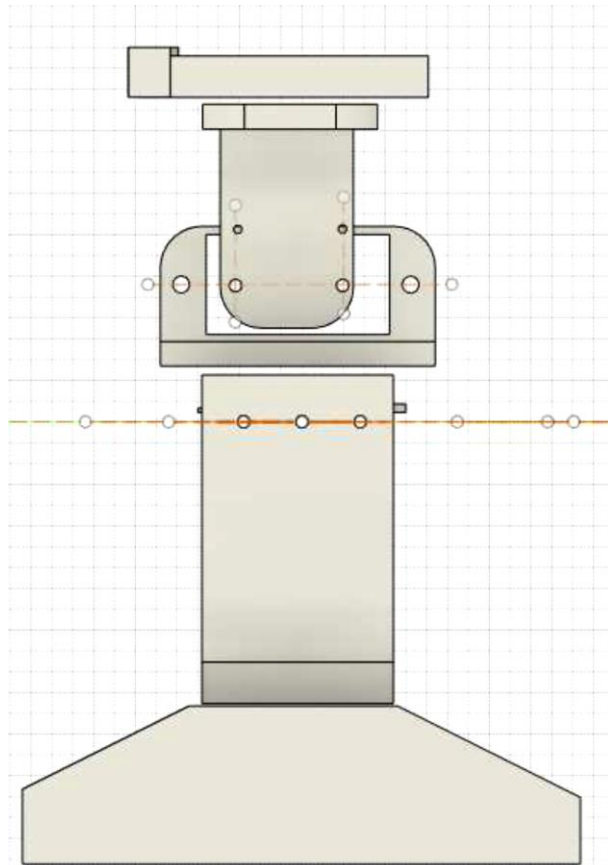


Рисунок 3.23 – Профільна проекція макета

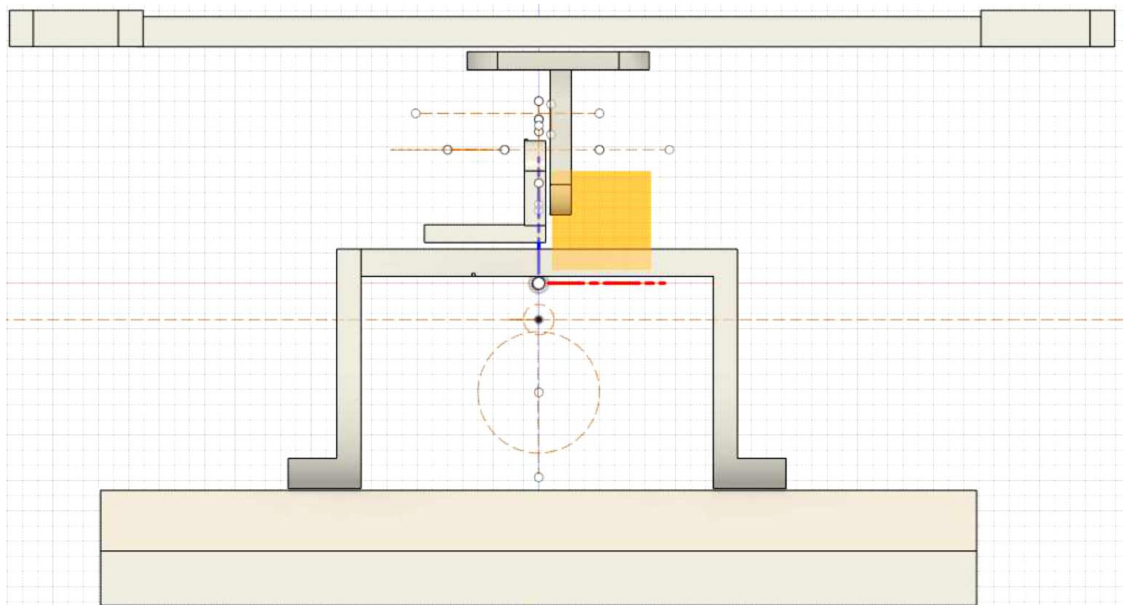


Рисунок 3.24 – Фронтальна проекція макета

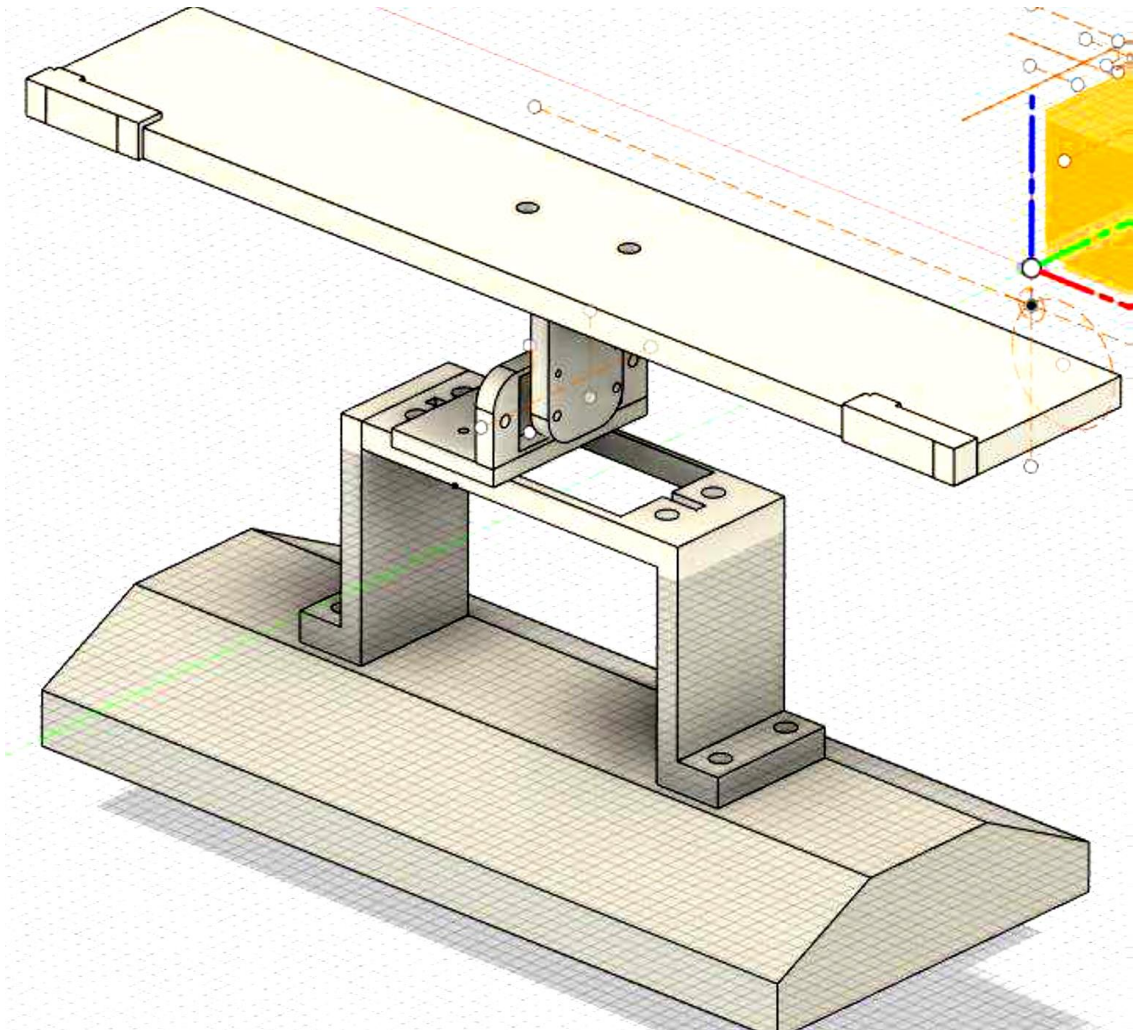


Рисунок 3.25 – Фронтальна проекція макета під кутом

3.8 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз поступлення прямого та розсіяного сонячного випромінювання на поверхню сонячної панелі. Розрахунки виконані відповідно до найефективніших методик. Отримано річну кількість енергії постійного струму, яку генерує панель, що обертається за Сонцем та панелі, розташовані з найбільш оптимальними кутами.
2. Встановлено, що без системи керування сонячні панелі будуть виробляти лише 67,9 % електроенергії.
3. В роботі обрано слідкуючу систему коригування положення сонячних

панелей. Сонячні панелі служать для генерації електроенергії, а стеження протягом дня за Сонцем допомагає отримати максимальну кількість електроенергії протягом світлового дня.

4. У системі керування реалізовано 4 режими роботи: ручне керування, пряме задання кута, автоматичне керування, імпорт зовнішніх даних позиціонування.
5. Спроектовано датчик на основі фоторезисторів та конструкцію моделі системи орієнтації.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [19]:

– при проектуванні - дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;

– при виготовленні - застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;

– при збірці та монтажі - точним дотриманням технології;

– при експлуатації - своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів)

засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [19].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі,

тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, струмопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.3 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [19].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;
- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;
- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі

електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра:

1. Проаналізовано структуру та роль систем стеження та орієнтації сонячних панелей у напрямку на Сонце. Розглянуто базові принципи функціонування приладів визначення положення Сонця.
2. Проведено аналіз літературних джерел з метою визначення найбільш ефективного монтажу сонячних панелей в залежності від енергетичних та економічних факторів.
3. Визначено основний склад та будову системи керування положенням сонячних панелей.
4. Запропоновано конструкцію затіняючого елемента давача положення сонця, який забезпечить більш надійну їх роботу та конструкцію моделі системи орієнтації.
5. Проведено аналіз поступлення прямого та розсіяного сонячного випромінювання на поверхню сонячної панелі. Розрахунки виконані відповідно до найефективніших методик. Отримано річну кількість енергії постійного струму, яку генерує панель, що обертається за Сонцем та панелі, розташовані з найбільш оптимальними кутами.
6. Встановлено, що без системи керуванням кутом нахилу сонячні панелі будуть виробляти лише 67,9 % електроенергії.
7. У системі керування реалізовано 4 режими роботи: ручне керування, пряме задання кута, автоматичне керування, імпорт зовнішніх даних позиціонування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
2. Філюк Я. О. Енергоощадні освітлювальні установки з автономним живленням / Я. О. Філюк, В. А. Андрійчук, В. П. Коваль // Матеріали науково-практичного семінару „Міжнародний інвестиційний форум-виставка з енергоефективності та енергоощадності 2015“, 8-9 жовтня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 103-105.
3. De lenne, E.; Naraghi, M.H. A Study of the Financial Aspect of Using Photovoltaic Panels in Buildings. In Proceedings of the 15th International Energy Conversion Engineering Conference, Atlanta, GA, USA, 10–12 July 2017.
4. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
5. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202
6. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної

- конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.—С. 80–81.
7. Chang, Y.-P. Optimal Design of Discrete-Value Tilt Angle of PV Using Sequential Neural-Network Approximation and Orthogonal Array. *Expert Syst. Appl.* 2009, 36, 6010–6018
 8. Hussein, H.M.S.; Ahmad, G.E.; El-Ghetany, H.H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy Convers. Manag.* 2004, 45, 2441–2452
 9. Tang, R.; Wu, T. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China. *Appl. Energy* 2004, 79, 239–248.
 10. Naraghi, M.H. Optimum Solar Panel Tilt Angle for Maximum Annual Irradiation. In *Proceedings of the IMECE2009, Lake Buena Vista, FL, USA, 13–19 November 2009*; pp. 211–220.
 11. Hafez, A.Z.; Soliman, A.; El-Metwally, I.M.; Ismail, I.M. Tilt and Azimuth Angles in Solar Energy Applications—A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 77, 147–168.
 12. Chinchilla, M.; Santos-Martin, D.; Carpintero, M.; Lemon, S. Worldwide Annual Optimum Tilt Angle Model for Solar Collectors and Photovoltaic Systems in the Absence of Site Meteorological Data. *Appl. Energy* 2021, 281, 116056.
 13. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2015. – № 3. – С. 2-10
 14. Brandemuhl, M.J.; Beckman, W.A. Transmission of Diffuse Radiation through CPC and Flat Plate Collector Glazing. *Sol. Energy* 1980, 24, 511–513.
 15. 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.

16. 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.
17. ASHRAE. Chapter 14, Climatic Design Information. In *ASHRAE Handbook of Fundamentals*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2021.
18. Duffie, J.A.; Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Process*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2006.
19. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.