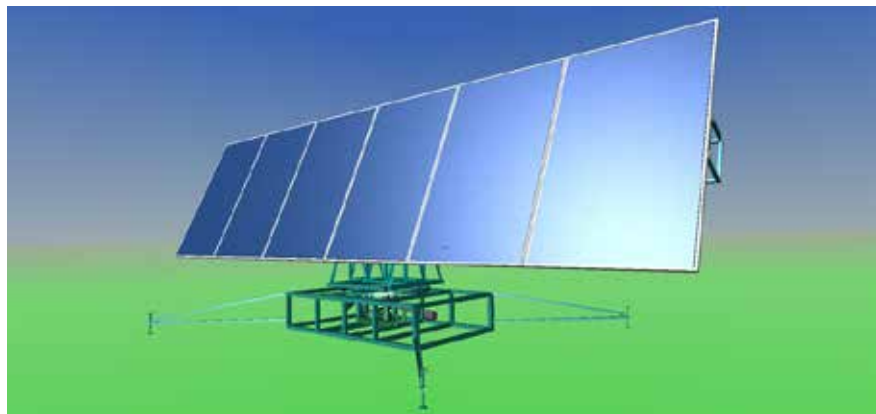


**В.В. Мартинюк, М.В. Федула, В.Д. Косенков, А.А. Слива**

**Високоєфективна автономна система  
електроживлення установки переробки полімерних відходів  
у дизпаливо**

*Монографія*



**Хмельницький, 2024**

**В.В. Мартинюк, М.В. Федула, В.Д. Косенков, А.А. Слива**

**Високоєфективна автономна система  
електроживлення установки переробки полімерних відходів  
у дизпаливо**

*Монографія*

ISBN 978-966-8776-56-4

Рекомендовано до друку Вченою радою Хмельницького національного університету, протокол № 4 від 28 листопада 2024 р.

*Рецензенти:*

**Кулаков П.І.** – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій Уманського національного університету садівництва;

**Лисий М.І.** – д.т.н., професор, професор кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону Національної академії Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького.

В.В. Мартинюк, М.В. Федула, В.Д. Косенков, А.А. Слива

**Високоєфективна автономна система електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо:** Монографія / В.В. Мартинюк, М.В. Федула, В.Д. Косенков, А.А. Слива – Хмельницький: ХНУ, 2024. – 60 с.

Розглянуто фізичні явища, що є основою високоєфективної системи електроживлення мобільної установка переробки полімерних відходів, для покращення характеристик автономного режиму її роботи та зниження шкідливого впливу на довкілля, а також з метою дослідження і вдосконалення процесів керування поворотними механізмами трекера фотомодулів і розвитку теорії та методів автоматизованого керування із застосуванням цифрових двійників.

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АСЕ – автономна система електроживлення

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КФС – кіберфізична система;

МН – машинне навчання;

МСЕС – мобільна сонячна електростанція;

ПЗ – програмне забезпечення

ПК – персональний комп'ютер

ТМП – точка максимальної потужності;

УППВ – установка переробки полімерних відходів

ФМ – фотоелектричний модуль

ЦД – цифровий двійник

## ВСТУП

В сучасних умовах, коли вплив змін клімату та виклики у галузі енергетики набувають все більшої актуальності, сонячні трекеři виступають важливим інструментом, який сприяє максимізації виробництва сонячної енергії підвищує конкурентоспроможність сонячних електростанцій.

Однією з ключових переваг сонячних трекерів є їхній потенціал з підвищення ефективності використання сонячних панелей. За допомогою автоматичного стеження за рухом Сонця, трекеři забезпечують панелям протягом дня кут нахилу близько  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання. Це дозволяє максимально використовувати сонячне випромінювання навіть в умовах змінного кута світлового потоку, що є особливо важливим в зонах з великими коливаннями рівня освітленості або високими широтами.

До інших переваг використання сонячних трекерів відноситься підвищення ефективності фотоелектричних модулів (ФМ). Переважна більшість сонячних трекерів оснащена давачами та системами відстеження, які не тільки коригують положення панелей у відповідності до напрямку сонячного світла, але й аналізують їхню продуктивність, погодні умови, а також інші показники. Це дозволяє оперативно виявляти будь-які несправності або забруднення, перемикати трекер у безпечний режим експлуатації при складних погодних умовах з метою підвищення надійності та тривалості експлуатації системи.

Таким чином, сонячні трекеři, завдяки своїм технічним характеристикам, стають важливою частиною розвитку надійної та високоєфективної сонячної енергетики.

Роботу присвячено виготовленню експериментального зразка трекера ФМ та розробленню схеми управління, алгоритму і програмного забезпечення для керування трекером ФМ.

Об'єкт дослідження – фізичні явища, що є основою сонячних трекерів, процеси автоматичного відстежування положення Сонця та позиціонування фотоелектричного модуля у напрямку, який забезпечує максимальний збір енергії.

Предмет дослідження – методи та алгоритми управління трекером ФМ для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання.

Мета роботи – виготовлення експериментального зразка трекера ФМ та розроблення схеми управління, алгоритму і програмного забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання.

Для досягнення мети роботи виконано завдання:

- виготовлено експериментальний зразок трекера ФМ;
- розроблено схему управління трекера ФМ;
- розроблено алгоритм та програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання.

При виконанні досліджень використано комплексний системний підхід, обумовлений тим, що процеси автоматизованого керування сонячним трекером за різних погодних умов є системою мультифізичних явищ із складною динамікою. Зокрема, виконано систематизацію задач автоматизованого позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання із врахуванням зображення з відеокамери, інформації з давачів освітленості та вітру, та особливостей механічних конструкцій.

З метою розроблення схеми управління трекером проведено теоретичне дослідження кіберфізичної системи (КФС) збору та обробки сигналів давачів різних типів з використанням методів теорії лінійних та нелінійних систем, а також комп'ютерного імітаційного моделювання.

Алгоритми та програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання розроблено із застосуванням методів дискретної математики, числових методів, методів обробки зображень та цифрової фільтрації.

Основні результати роботи:

1) виготовлено експериментальний зразок трекера ФМ, який забезпечує позиціонування робочої поверхні за азимутом та зенітом з метою відстежування напрямку, який відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання протягом світлового дня, згідно із технічними характеристиками ФМ, та може транспортуватися автомобільним причепом, і встановлюватися за місцем розташування мобільної установка переробки полімерних відходів (УППВ);

2) розроблено схему управління трекера ФМ, яка відрізняється тим, що побудована на базі кіберфізичної системи з цифровим двійником (ЦД) трекера, який забезпечує можливість точного налаштування процесу позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання на основі даних з відеокамери, давача освітленості та давача швидкості вітру;

3) розроблено алгоритм і програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання, що відрізняються застосуванням удосконалених методів оброблення даних про позицію трекера та погодні умови з відеокамери, давача освітленості та давача швидкості вітру на основі згорткових функцій, і може переводити трекер у безпечну позицію при виникненні складних погодних умов, таких, як град або сильний вітер;

Отримані наукові результати створюють необхідні умови для максималізації відбору енергії від фотоелектричного модуля протягом доби за різних погодних умов, а також дозволяють проводити подальше вивчення систем керування трекером ФМ з використанням різних типів інформації про позицію робочої поверхні фотоелектричного модуля.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТРЕКЕРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

## 1.1 Методи керування трекером ФМ без зворотного зв'язку

У сучасних системах сонячної енергетики, де важливо максималізувати виробництво електроенергії, методи керування сонячним трекером без зворотного зв'язку із фіксованим часом (Fixed-Time Control) є одним із простих, але ефективних способів оптимізації використання сонячних панелей [1, 2].

Метод керування з фіксованим часом базується на попередньо заданому графіку для регулювання положення сонячного трекера впродовж дня. Цей графік визначає точні моменти часу, коли трекер має змінювати своє положення, щоб максималізувати отримання сонячного випромінювання. Основні риси та переваги цього методу можна визначити наступним чином. Однією з ключових переваг методу керування з фіксованим часом є його відносна простота. Попередньо заданий графік встановлює чіткі інструкції для трекера, і він виконує їх безперервно, що робить систему простою у використанні та надійною.

У порівнянні з деякими складнішими методами керування, керування з фіксованим часом зазвичай вимагає менше технічного обслуговування. Це робить його більш вартісним економічно в областях, де важливо знизити витрати на експлуатацію. В тих регіонах, де стабільність погодних умов та сонячної активності дозволяє передбачувати чіткі моменти максимальної ефективності, керування з фіксованим часом може бути особливо доцільним. Визначення оптимальних моментів руху трекера базується на точних знаннях про сонячний час та його вплив на ефективність енергетичного виробництва.

Однак, важливо відзначити, що метод керування з фіксованим часом може не бути оптимальним у сценаріях, де зміни в погодних умовах важко передбачити, або коли потрібно максималізувати виробництво енергії в реальному часі [3,4].

Крім методів керування із фіксованим часом, серед методів без зворотного зв'язку відомі також методи керування на основі сонячного часу (Solar Time-Based Control)

У сучасних системах сонячної енергетики, де оптимізація використання сонячної енергії є ключовим завданням, методи керування сонячним трекером на основі сонячного часу виходять на передній план як ефективний засіб адаптації до руху Сонця та змін в атмосферних умовах. Керування на основі сонячного часу використовує концепцію сонячного часу для планування та коригування положення сонячного трекера. Сонячний час – це час, що вимірюється за положенням Сонця на небі та залежить від довготи місцезнаходження. Основна ідея полягає в тому, щоб враховувати цей час при визначенні оптимального положення панелей для максимального збору сонячної енергії.

Використання сонячного часу дозволяє адаптувати рух сонячного трекера до географічних координат місцезнаходження. Це важливо для оптимального використання сонячного випромінювання, оскільки положення Сонця на небі змінюється в залежності від широти та довготи.

Врахування сонячного часу дозволяє враховувати динаміку руху Сонця, забезпечуючи точне визначення оптимального положення панелей протягом дня. Це особливо корисно в умовах змінливої сонячної активності. Системи керування на основі сонячного часу можуть використовувати прогнози для коригування положення трекера відповідно до змін в атмосферних умовах. Це дозволяє реагувати на несподівані зміни у погоді та максималізувати виробництво енергії. З урахуванням динаміки руху Сонця та оптимізованого положення панелей, метод керування на основі сонячного часу спрямований на мінімізацію витрат енергії на корекцію положення трекера [5, 6].

Незважаючи на численні переваги, важливо враховувати, що метод керування на основі сонячного часу може бути менш ефективним у зонах з високою хмарністю або значними коливаннями сонячної активності. Однак, з поєднанням із передовими технологіями та прогресом в області прогнозування погоди, цей метод залишається обіцяючим для розвитку сталої та ефективної сонячної енергетики [7, 8].

## 1.2. Методи керування трекером ФМ із зворотним зв'язком

Методи керування трекером ФМ із зворотним зв'язком (Closed-Loop Control) базуються на постійному моніторингу та корекції роботи сонячного трекера за допомогою зворотнього зв'язку. Це означає, що система постійно оцінює реальне положення Сонця та ефективність збору сонячної енергії, і вносить корекції для максималізації продуктивності. Керування із зворотним зв'язком використовує сучасні технології, такі як сенсори та камери, для постійного моніторингу положення Сонця та стану сонячних панелей. Це дозволяє системі точно визначати оптимальне положення трекера [9].

Однією з основних переваг є здатність систем керування із зворотним зв'язком коригувати положення трекера в реальному часі. Це особливо важливо при змінах в погодних умовах або тіньових ефектах, що можуть виникнути через перешкоди. Завдяки постійному аналізу та корекції, система керування із зворотним зв'язком дозволяє мінімізувати втрати ефективності через забруднення, пошкодження або інші аномалії, що можуть виникнути в експлуатації. Система керування із зворотним зв'язком може адаптуватися до змін в атмосферних умовах та вимогах, що дозволяє збільшити надійність сонячних установок у різних кліматичних умовах.

Незважаючи на суттєві переваги, керування із зворотним зв'язком вимагає високоточних сенсорів та складних алгоритмів обробки даних. Вдосконалення технологій штучного інтелекту та машинного навчання є важливим напрямком розвитку для оптимізації функціональності цих систем [10–13].

Метод керування сонячним трекером з використанням сенсорів сонячного випромінювання, відомий як Sun Sensor Control, є важливим інструментом для точного визначення положення Сонця та оптимізації роботи сонячних панелей. Системи керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання використовують спеціальні сенсори, які реагують на сонячне випромінювання, для визначення точного положення Сонця на небі. Ці сенсори можуть бути різного типу, таких як фотодіоди, фототранзистори або сонячні компаси, і їх розташування на трекері дозволяє визначати напрямок до джерела світла [14].

Однією з ключових переваг керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання є висока точність визначення положення Сонця. Це забезпечує оптимальне положення сонячного трекера для максимального отримання сонячної енергії. Сенсори сонячного випромінювання працюють ефективно навіть при хмарному чи похмурому небі, що робить керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання надійним у різних атмосферних умовах. Багато сучасних систем керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання мають автономний характер та не вимагають зовнішніх втручань. Це сприяє збільшенню ефективності та зменшенню витрат на обслуговування. Застосування сенсорів сонячного випромінювання дозволяє мінімізувати вплив тіней від будь-яких перешкод чи конструкцій, що можуть перебувати поруч із сонячним трекером.

Проте, слід зазначити, що керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання може характеризуватися суттєвими похибками у випадку екстремальних погодних умов, таких як сильна хмарність або велика концентрація атмосферних аерозолів. Розвиток технологій сенсорів та алгоритмів обробки даних є важливим напрямком для подолання цих проблем і покращення функціональності систем керування із використанням сенсорів сонячного випромінювання [15–17].

Фільтри Калмана - це математичні алгоритми, що використовуються для оцінки стану динамічної системи на основі послідовності вимірів. У випадку сонячних трекерів, фільтри Калмана можуть використовуватися для корекції та оптимізації положення трекера в реальному часі [18, 19].

Фільтри Калмана можуть забезпечити високу точність оцінки положення Сонця та ефективно коригування положення сонячного трекера, забезпечуючи стабільну роботу системи в різних умовах. Врахування динаміки зовнішніх факторів, таких як зміни в атмосферних умовах або тіньові ефекти, дозволяє фільтрам Калмана адаптуватися до реальних умов та забезпечувати оптимальну ефективність системи. Фільтри Калмана дозволяють ефективно враховувати та коригувати вимірювання, що можуть містити похибки, що забезпечує більш точну оцінку стану системи. Фільтри Калмана мають здатність адаптуватися до змін у вхідних параметрах та робити прогнози на основі історії вимірів, що робить їх ефективними в змінних умовах.

Проте, використання фільтрів Калмана вимагає докладного моделювання динаміки сонячних трекерів та попередньої калібрування системи. Перспективи розвитку цього підходу включають поєднання фільтрів Калмана з іншими технологіями, такими як штучний інтелект, для максималізації точності та надійності керування [18].

### 1.3 Методи керування трекером ФМ з передбаченням

Методи керування з передбаченням використовують інформацію про погоду, географічні координати та характеристики сонячного трекера для прогнозування майбутнього положення Сонця та оптимального положення панелей. Це передбачення дозволяє системі адаптуватися до змін в умовах та максималізувати збір сонячної енергії.

Однією з основних переваг керування з передбаченням є можливість оптимізувати положення сонячного трекера відповідно до прогнозу руху Сонця. Це дозволяє максимізувати збір сонячної енергії протягом дня та року. Системи керування з передбаченням здатні адаптуватися до змін в атмосферних умовах, які впливають на сонячну активність. Це важливо для підтримання ефективності навіть у змінливих погодних умовах. Попереднє прогнозування положення Сонця дозволяє системі попереджувати потенційні втрати в енергії, забезпечуючи точне налаштування трекера для максимального використання сонячного випромінювання.

Методи керування з передбаченням можуть використовуватися для ефективного управління енергією, враховуючи плановані зміни в енергетичних потребах та умовах споживання.

Незважаючи на численні переваги, важливо враховувати, що точність прогнозування залежить від доступності точних метеорологічних даних та адекватності математичних моделей. Розвиток технологій прогнозування та навчання машин може сприяти покращенню результатів керування з передбаченням [20–24].

Використання прогнозу погоди в системах керування сонячними трекерами з передбаченням дає можливість інтеграції передових метеорологічних моделей та алгоритмів обробки даних.

Основна ідея полягає в тому, щоб попереджати зміни у погодних умовах та підлаштовувати положення сонячного трекера для оптимального збору сонячної енергії [25].

Прогноз погоди дозволяє системі керування планувати заздалегідь, адаптуючи положення сонячного трекера відповідно до очікуваних змін у сонячній активності. Забезпечуючи адекватну реакцію на зміни у погодних умовах, система може мінімізувати втрати в продуктивності та зберігати вироблену енергію.

Спрогнозовані зміни в погодних умовах можуть бути враховані для попереднього реагування, що дозволяє сонячному трекеру ефективно пристосовуватися до змінливих умов.

З використанням прогнозів погоди можна забезпечити оптимальне управління системами зберігання енергії, плануючи періоди виробництва та використання.

Використання прогнозу погоди у системах керування сонячними трекерами вимагає точних прогностичних моделей та високоточних даних. Завдяки швидкому розвитку технологій збору та аналізу даних, вдається покращувати якість прогнозів та робити системи ще більш ефективними [26].

У сучасних сонячних трекерах активно впроваджуються методи машинного навчання. Машинне навчання (МН) дозволяє системам керування сонячним трекером "вивчати" та адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища.

Алгоритми МН можуть аналізувати великі обсяги даних про сонячну активність, погодні умови, географічні характеристики та інші параметри для прийняття рішень щодо оптимального положення сонячного трекера [6,27–29].

Машинне навчання дозволяє сонячному трекеру адаптуватися до змін у погоді, атмосферних умовах та інших факторах, що впливають на виробництво сонячної енергії. Алгоритми МН можуть аналізувати та інтерпретувати складні взаємозв'язки між різними факторами, що дозволяє точніше прогнозувати майбутні зміни та оптимально налаштувати сонячний трекер. Машинне навчання може використовуватися для оптимізації виробництва та розподілу сонячної енергії, реагуючи на динаміку електричних мереж та вимоги споживачів. Автоматизація за допомогою МН може сприяти зменшенню витрат на обслуговування та забезпечити надійну та ефективну роботу сонячних установок.

Впровадження МН у керування сонячним трекером характеризується проблемами, такими як потреба великої кількості даних для тренування моделей та необхідність виправлення алгоритмів у реальному часі. Проте швидкий розвиток технологій та постійне вдосконалення алгоритмів МН вказують на потенційно значущий внесок цих методів у сонячну енергетику [6,30,31].

#### 1.4 Диференційні контролери трекерів ФМ

Диференційні контролери використовують принцип вимірювання різниці між актуальним положенням Сонця і поточним положенням сонячного трекера. Це досягається за допомогою сенсорів та давачів, що вимірюють кутові відхилення трекера від ідеального положення [14, 32, 33].

Диференційні контролери забезпечують високу точність вирішення задачі керування, оскільки вони реагують на невеликі відхилення в реальному часі. Такі контролери характеризуються високою швидкістю реакції на зміни положення Сонця, що дозволяє максималізувати ефективність збору сонячної енергії. Диференційні контролери добре працюють в змінних атмосферних умовах та при різних освітленій умовах, забезпечуючи стабільну роботу системи. Оскільки диференційні контролери використовують дані з сенсорів для вирішення завдань керування, вони зазвичай вимагають менше енергії порівняно з іншими методами.

Слід також зазначити, що, диференційні контролери можуть бути менш ефективними в умовах інтенсивної тіні чи при швидких та непередбачуваних змінах в атмосферних умовах. Для подолання цих проблем, можливе поєднання диференційних контролерів із іншими методами, такими як алгоритми машинного навчання [8, 14, 17, 20, 34–38].

Методи керування з відстеженням руху Сонця тільки з однією віссю обертання (Single-Axis Tracking) дозволяють суттєво спростити конструкцію трекера ФМ. Диференційні контролери в одновісних сонячних трекерах використовуються для вимірювання різниці у положенні між сонячним трекером і Сонцем. Зазвичай, це досягається за допомогою сенсорів, що фіксують кутові відхилення трекера. Контролери визначають оптимальний кут нахилу панелей для забезпечення максимальної ефективності збору сонячної енергії.

Одновісні трекери ведуть за собою можливість максималізації збору сонячної енергії протягом дня, оскільки їхні панелі постійно адаптуються до змін положення Сонця. Вони дозволяють збільшити ефективність використання земельної площі, оскільки вони здатні збирати енергію впродовж більшого періоду дня. Диференційні контролери дозволяють точно визначати положення Сонця, що зменшує енергозатрати на позиціонування сонячного трекера.

Одновісне відстеження забезпечує характеризуються високою стабільністю. Проте, вони можуть мати нижчу ефективність в умовах поганої видимості Сонця або в зонах з великими коливаннями виробництва енергії протягом дня. Додатковою перспективою є вдосконалення диференційних контролерів та їх інтеграція з іншими технологіями, такими як машинне навчання, для оптимізації виробництва енергії.

Більш ефективними є методи керування з відстеженням руху Сонця за азимутом та зенітом з двома осями обертання трекера (Dual-Axis Tracking). Двовісне відстеження дозволяє максимізувати збір сонячної енергії, оскільки робоча поверхня завжди позиціонується перпендикулярно до променів Сонця. Збільшення обсягу виробництва енергії завдяки поєднанню руху трекера за осями азимуту і зеніту. Здатність трекера пристосовуватися до різних атмосферних умов, максимізуючи продуктивність навіть при змінних умовах освітлення.

Слід зазначити, що подвійне відстеження може вимагати більше ресурсів, особливо у відсутності добре підготовлених алгоритмів керування. Перспективи розвитку включають у себе оптимізацію алгоритмів та використання технологій штучного інтелекту для автоматичного пристосування до змінних умов [8,12].

### 1.5 Методи керування трекером ФМ на основі оптимізації

У сучасному світі, коли збереження енергії та використання відновлювальних джерел стають невід'ємною частиною нашого життя, сонячні трекери є ключовим елементом сонячних електростанцій. Вирішальною у цьому контексті стає оптимізація методів керування сонячним трекером, спрямована на максимізацію збору сонячної енергії та підвищення ефективності.

Використання алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми чи алгоритми імітації вибору, для визначення оптимальних кутів нахилу та азимутального положення трекера в реальному часі. Розробка математичних моделей та симуляційних інструментів для аналізу впливу різних параметрів (освітлення, атмосферні умови) на продуктивність сонячного трекера та подальше вдосконалення його роботи.

Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу та передбачення патернів роботи сонячного трекера, що дозволяє системі самостійно вдосконалюватися та адаптуватися до змінних умов. Розробка адаптивних систем керування, які можуть змінювати свою стратегію в залежності від зовнішніх факторів та мети максимізації збору енергії. Оптимізація дозволяє досягти максимальної ефективності сонячного трекера, що в перспективі призводить до максимальної виробництва енергії. Забезпечення ефективного використання земельної площі за рахунок точного контролю над положенням сонячного трекера.

Використання оптимізованих алгоритмів сприяє ефективній роботі трекера при мінімальних енергозатратах на його позиціонування. Можливість трекера адаптуватися до різних умов, таких як зміна освітленості, і забезпечення сталого виробництва енергії.

Хоча оптимізація є ключовим елементом сучасних сонячних трекерів, до основних її проблем відносяться складність моделювання реальних умов та нестабільність у випадку дуже змінних погодних умов. Розвиток та вдосконалення технологій машинного навчання, а також удосконалення алгоритмів оптимізації, стануть ключовими напрямками в подальшій науковій та інженерній діяльності в цій галузі [4, 22, 39–41].

Керування із використанням математичних моделей прогнозування та оптимізації положення трекера в майбутньому (Model Predictive Control) дозволяє суттєво знизити похибки позиціонування робочої поверхні ФМ із врахуванням багатьох факторів.

В умовах постійного зростання інтересу до сонячної енергетики, розробка ефективних методів керування сонячними трекерами стає актуальнішою ніж будь-коли. Один із передових підходів до цього завдання - використання MPC. Такий підхід використовує математичні моделі для прогнозування та оптимізації положення сонячного трекера в майбутньому, забезпечуючи максимальний збір сонячної енергії.

Розробка точних математичних моделей, які відображають фізичні властивості сонячного трекера та його відповідь на зовнішні фактори, такі як сонячна радіація, атмосферні умови і т.д. Використання математичних моделей для прогнозування майбутнього руху Сонця та ефективного положення сонячного трекера відповідно до цього руху [23, 24, 42, 43].

Впровадження оптимізаційних алгоритмів для визначення найбільш ефективного положення трекера, яке максимізує збір сонячної енергії враховуючи обмеження, такі як максимальний кут нахилу та азимутальний діапазон. Робота в режимі реального часу, що дозволяє системі негайно адаптуватися до змінних умов, таких як хмарність, та зберігати оптимальне положення трекера.

Здатність MPC прогнозувати майбутнє рух Сонця та адаптувати положення трекера гарантує максимальний збір сонячної енергії. Система реагує на непередбачені зміни в умовах оточення, такі як зміни освітленості, інтенсивність сонячної радіації і т.д.

MPC враховує обмеження, такі як максимальний кут нахилу та азимутальний діапазон, забезпечуючи безпеку та стабільність системи. Адаптація трекера до оптимального положення допомагає зменшити витрати енергії на його позиціонування.

Однак, для реалізації повного потенціалу MPC в сонячних трекерах, необхідні подальші дослідження у напрямках підвищення точності математичних моделей та розвитку більш швидких обчислювальних алгоритмів. Оптимізація та адаптація MPC до різних географічних областей також визначатиме майбутнє розвитку такого підходу в сонячній енергетиці.

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЗРАЗОК ТРЕКЕРА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

### 2.1 Експериментальний зразок трекера ФМ



Рис. 2.1 - Експериментальний зразок трекера ФМ

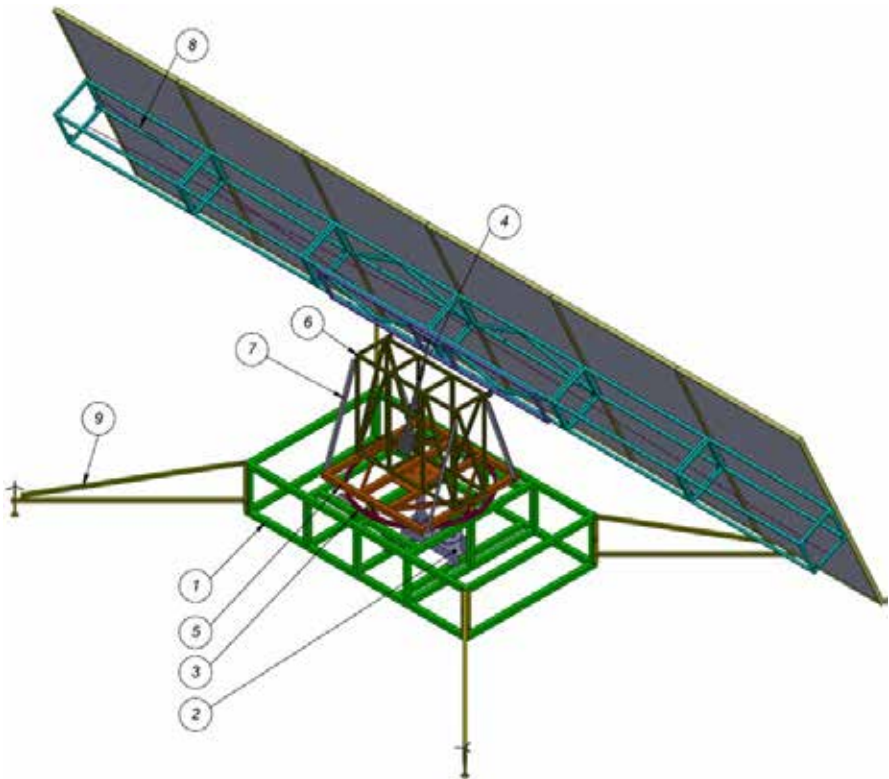


Рис. 2.2 - Схема трекера ФМ з позначками

На рис. 2.2 цифрами позначено:

- 1 – платформа експериментального зразка трекера ФМ;
- 2 – механізм для обертання трекера ФМ за азимутом;
- 3 – кільцева рейка;
- 4 – актуатор
- 5 – рухома платформа для обертання за азимутом
- 6 – вертикальна опора;
- 7 – розтяжки;
- 8 – ферма ФМ;

9 – опора для кріплення експериментального зразка до землі.

Схема експериментального зразка трекера ФМ зображена на рис.

2.3.

На рис. 2.3 зображено схему експериментального зразка трекера ФМ із вказанням розмірів механічної конструкції.

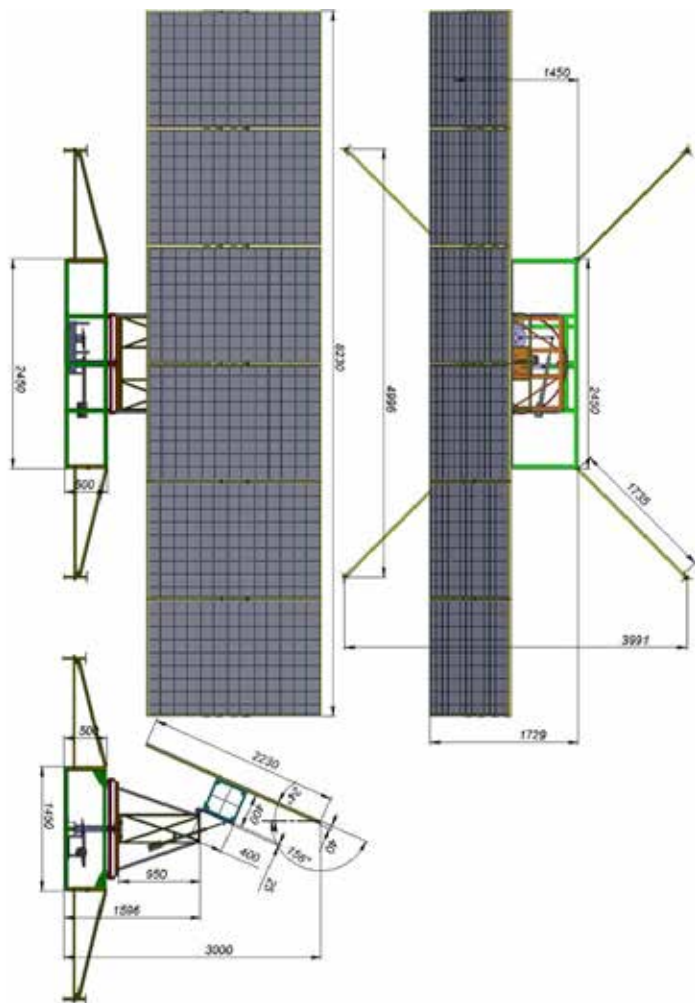


Рисунок 2.3 - Розміри експериментального зразка трекера ФМ

## 2.2 Несуча конструкція експериментального зразка трекера ФМ

Несуча конструкція експериментального зразка трекера ФМ розташована на платформі, що зображена на рис. 2.4.

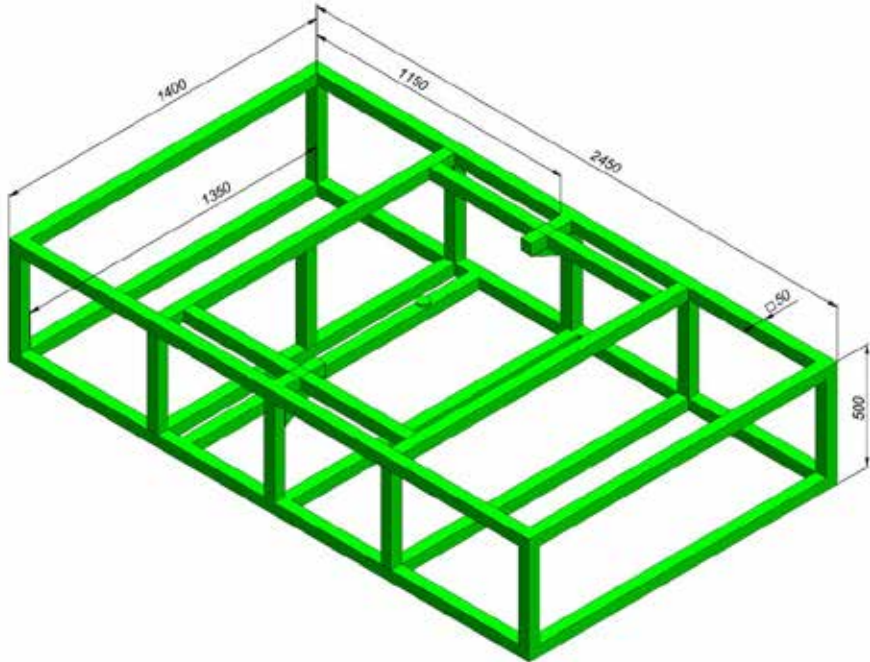


Рисунок 2.4 – Платформа експериментального зразка трекера ФМ

Платформа (рис. 2.4) призначена для закріплення трекера на поверхні землі з чотирма опорами (рис. 2.5).

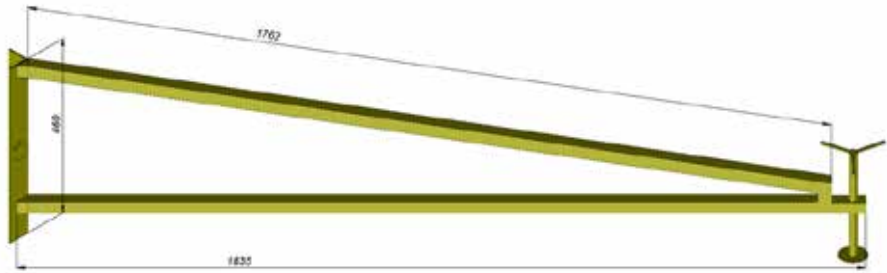


Рисунок 2.5 – Опора для кріплення експериментального зразка трекера ФМ до землі.

Опори (рис. 2.5) призначені для підвищення стійкості механічної конструкції експериментального зразка трекера ФМ в умовах вітру.

До платформи (рис. 2.4) приєднується кільцева рейка, що зображена на рис. 2.6, необхідна для обертання рухомої частини конструкції трекера за азимутом.

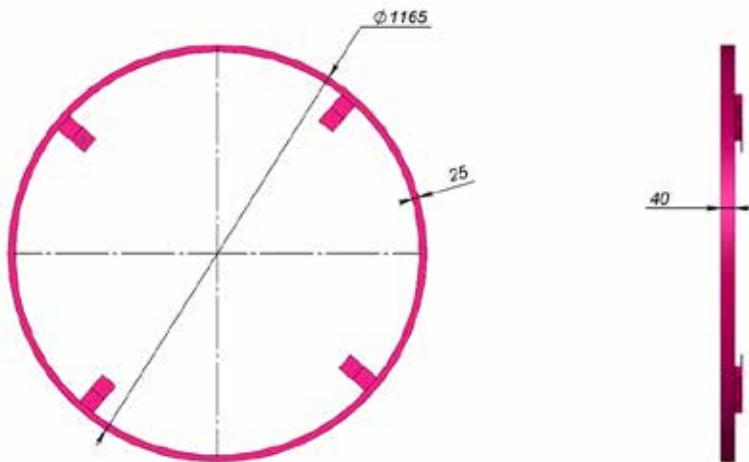


Рисунок 2.6 – Кільцева рейка для обертання трекера за азимутом  
Обертання трекера за азимутом здійснюється шляхом руху колісної платформи, зображеної на рис. 2.7., по кільцевій рейці (рис. 2.6).

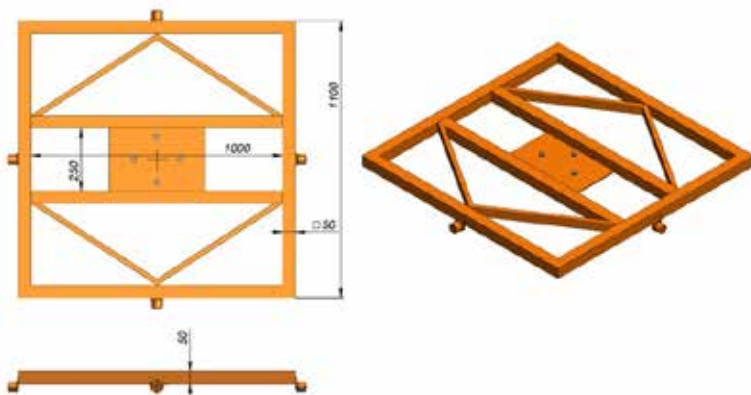


Рисунок 2.7 – Рухома платформа для обертання за азимутом

До рухомої платформи (рис. 2.7) приєднується вертикальна опора несучої конструкції, зображена на рис. 2.8.

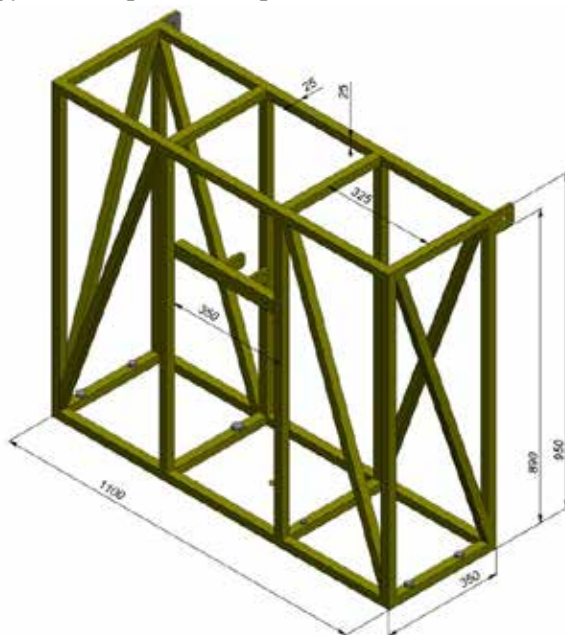


Рисунок 2.8 – Вертикальна опора несучої конструкції

З метою забезпечення надійності при складних погодних умовах вертикальна опора несучої конструкції (рис. 2.8) виконана у формі трьох секцій із ребрами жорсткості.

До вертикальної опори несучої конструкції приєднується вісь, на якій обертається шестисекційна ферма з фотоелектричними модулями. Кріплення одного ФМ до секції ферми зображено на рис. 2.9.

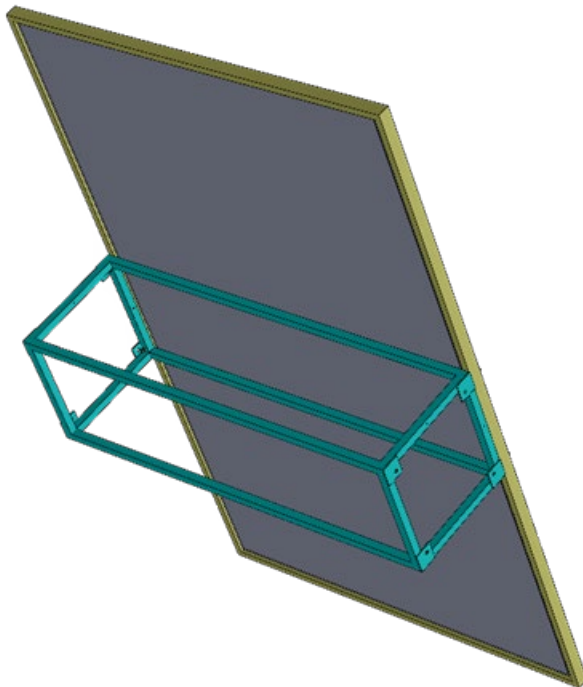


Рисунок 2.9 – Кріплення одного ФМ до секції ферми несучої конструкції  
З'єднання шести секцій ферми ФМ зображено на рис. 2.9.

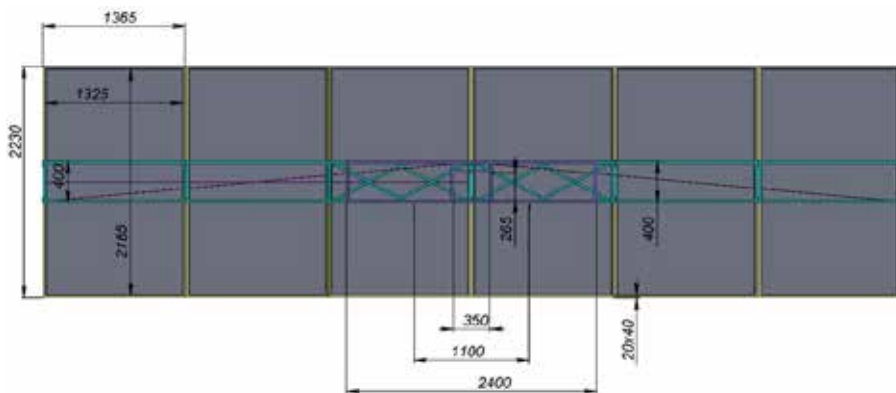


Рисунок 2.10 – Кріплення ФМ до ферми несучої конструкції  
Кріплення ферми несучої конструкції із вказанням розмірів усіх  
ФМ зображено на рис. 2.11.

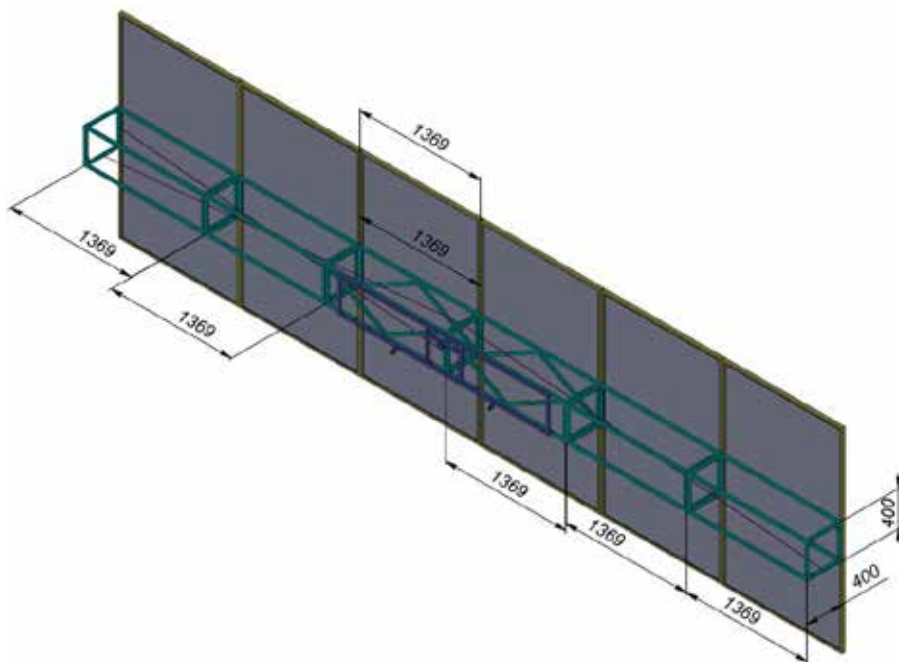


Рисунок 2.11 – Кріплення ферми несучої конструкції із  
вказанням розмірів ФМ

Третя та четверта секції ферми обладнані додатковими ребрами жорсткості з метою забезпечення підвищеної міцності в області рухомого з'єднання з вертикальною опорою.

Ферма, зображена на рис. 2.10 та рис. 2.11, забезпечує обертання фотоелектричних модулів за зенітом, відносно вертикальної опори рухомої частини конструкції експериментального зразка.

2.3 Поворотний механізм експериментального зразка трекара  
ФМ

Схема поворотного механізму експериментального зразка трекера ФМ зображена на рис. 2.12.

Поворотний механізм трекера забезпечує обертання робочої поверхні ФМ за азимутом та зенітом з метою її позиціонування під кутом 90 градусів до падаючого сонячного випромінювання для максималізації відбору сонячної енергії.

Поворот ФМ за зенітом та азимутом здійснюється за допомогою двох електродвигунів з двома відповідними актуаторами. Перший електродвигун приєднано до нерухомої платформи експериментального зразка. За допомогою актуатора задається швидкість обертання рухомої платформи (рис. 2.7), необхідна для відстежування положення Сонця.

Конструкція механізму, що розташований на нерухомій нижній платформі трекера та призначений для обертання трекера за азимутом, зображена на рис. 2.13.

Другий електродвигун з актуатором приєднаний до вертикальної опори несучої конструкції (рис. 2.8), і забезпечує обертання ферми з фотоелектричними модулями за зенітом (рис. 2.12).

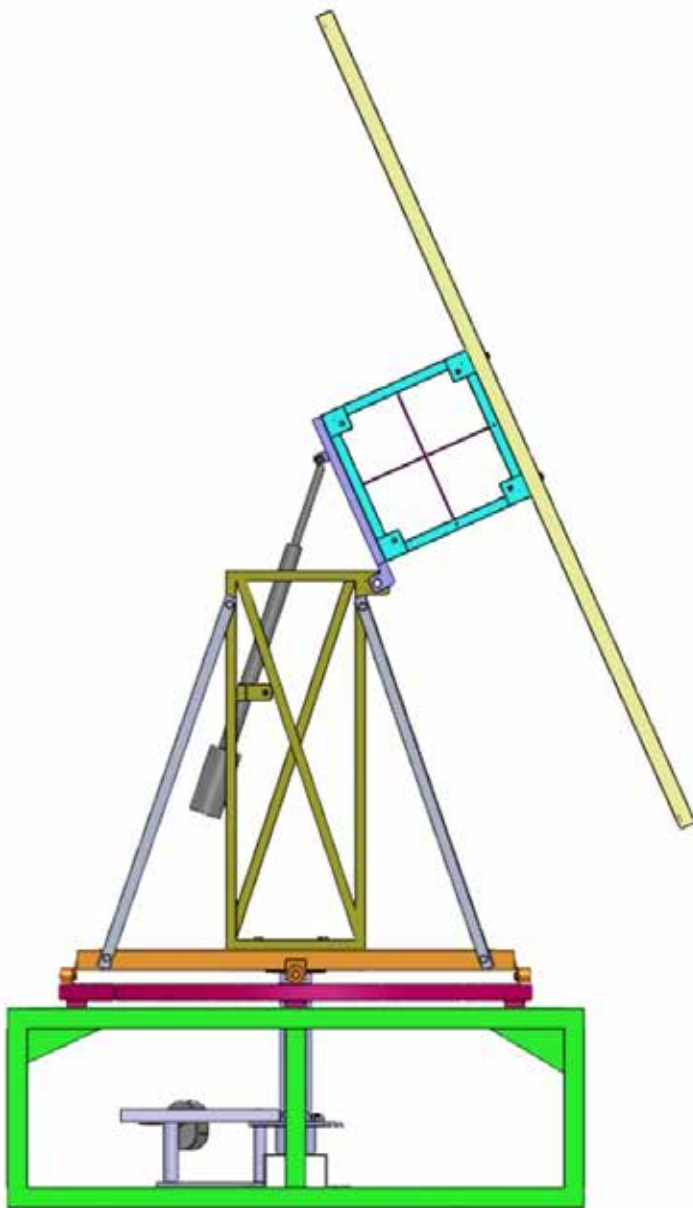


Рисунок 2.12 – Поворотний механізм експериментального зразка трекера

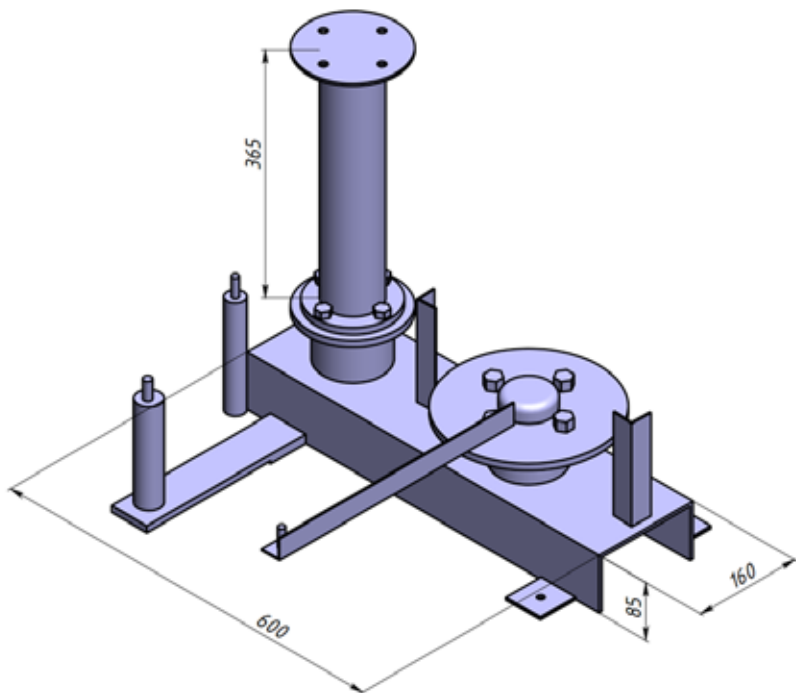


Рисунок 2.13 – Механізм для обертання за азимутом експериментального зразка трекера ФМ

#### 2.4 Транспортування експериментального зразка трекера ФМ

Експериментальний зразок трекера ФМ, складений та розташований на автомобільний причіп для транспортування, зображений на рис. 2.14.

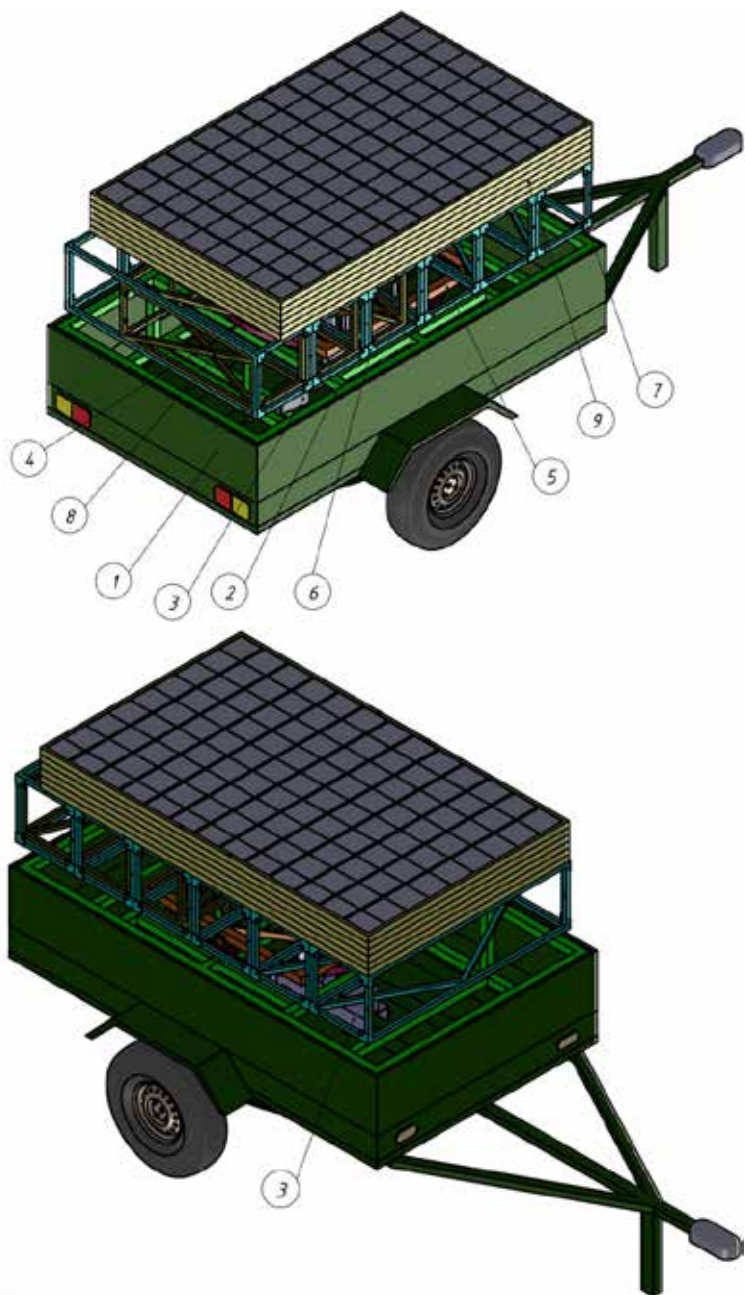


Рисунок 2.14 – Транспортування експериментального зразка трекера ФМ

На рисунку 2.14 цифрами позначено:

- 1 – автомобільний причіп;
- 2 – платформа експериментального зразка трекера ФМ;
- 3 – механізм для повороту за азимутом;
- 4 – кільцева рейка;
- 5 – рухома платформа для обертання за азимутом;
- 6 – ферма 1;
- 7 – ферма 2;
- 8 – опора;
- 9 – ФМ.

Експериментальний зразок трекера ФМ, складений для транспортування, зображено на рис. 2.15.

Схема причіпу із складеним експериментальним зразком трекера ФМ зображені на рис. 2.16.



Рисунок 2.15 – Складений для транспортування експериментальний зразок трекера ФМ

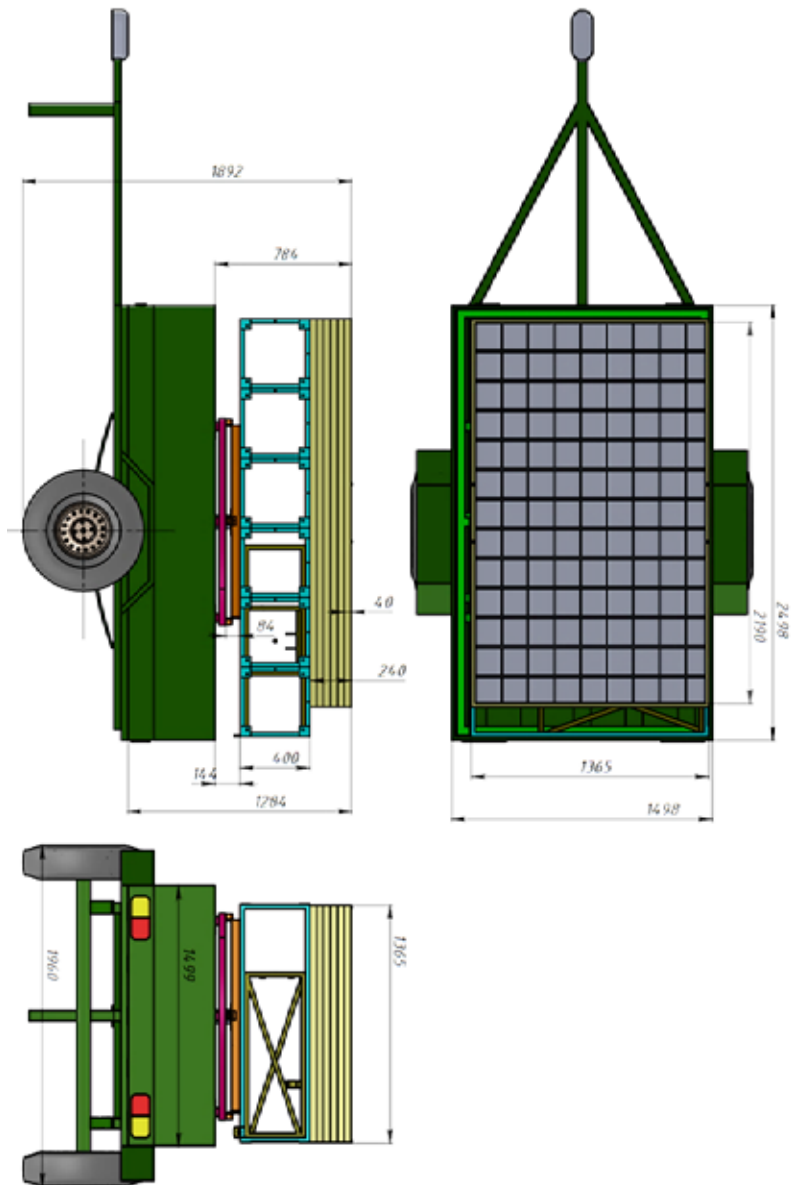


Рисунок 2.16 – Схема причіпу із складеним експериментальним зразком трекера ФМ

На рис. 2.17 зображено автомобільний причіп, що використовується для транспортування виготовленого експериментального зразка трекера ФМ.



Рисунок 2.17 – Автомобільний причіп для транспортування експериментального зразка трекера ФМ

## 2.5 Додатковий тестовий макет трекера ФМ

Для виконання експериментів із системою керування трекера ФМ виготовлено також додатковий тестовий макет трекера, який може виконувати позиціонування тільки одного фотоелектричного модуля (рис. 2.17).

Додатковий тестовий макет трекера призначений для виконання досліджень систем керування трекера, а також для подальших вимірювань параметрів фотоелектричного модуля, які не вимагають інформації про роботу електродвигунів та механічні характеристики експериментального зразка трекера ФМ.



Рисунок 2.18 – Додатковий тестовий макет трекера з одним ФМ

# 3 СХЕМА УПРАВЛІННЯ ТРЕКЕРА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

## 3.1 Система автоматичного керування трекера ФМ

Система автоматичного керування трекера ФМ зображена на рис. 3.1.

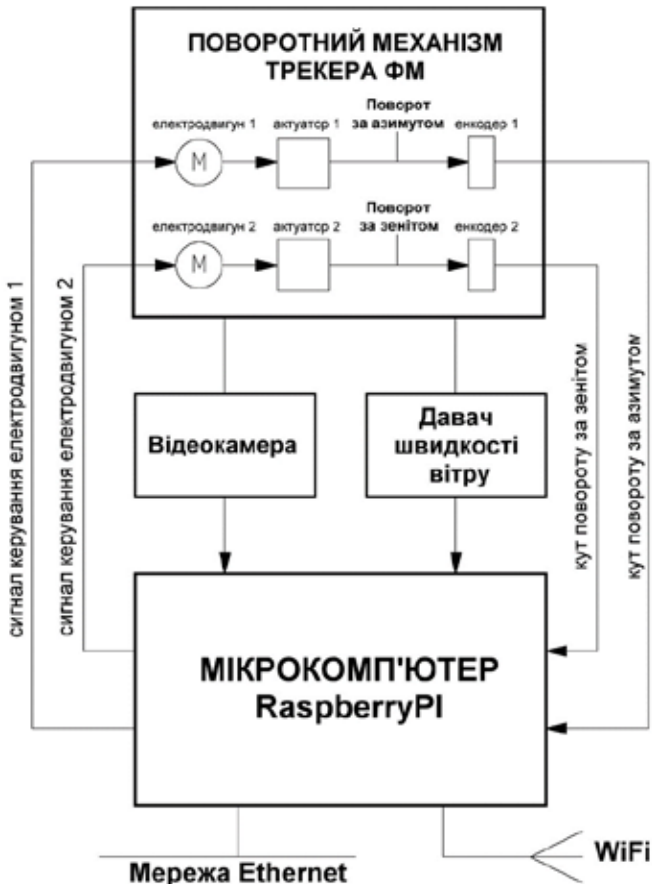


Рисунок 3.1 – Система автоматичного керування трекером ФМ

Система автоматичного керування трекара ФМ (рис. 3.1) побудована на основі мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+, який передає сигнали керування двома електродвигунами для обертання фотоелектричних модулів за азимутом та за зенітом. Сигнали керування формуються мікрокомп'ютером на основі зображення, отриманого з відеокамери, даних про швидкість вітру та значень поточних кутів повороту трекара. Значення кутів повороту передаються до мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+ двома енкодерами, що закріплені, відповідно, на осях обертання за азимутом та за зенітом. Мікрокомп'ютер трекара може здійснювати обмін даними з ПК та іншими пристроями через провідну мережу (Ethernet) та безпроводну мережу (WiFi), що необхідно для дистанційного керування через веб-інтерфейс, а також для реалізації кіберфізичної системи трекара ФМ.

### 3.2 Мікрокомп'ютер трекара ФМ

Мікрокомп'ютер RaspberryPI Model B+, що використовується для автоматизованого керування трекаром ФМ, зображено на рис. 3.2.

RaspberryPI Model B+ є одноплатним комп'ютером на основі SoC BCM2837B0, що побудована на базі чотириядерного 64-розрядного процесора ARMv8 з тактовою частотою 1,4ГГц та достатньо продуктивним відеопроектором.

Характеристики мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+:

- SoC: Broadcom BCM2837B0 (CPU, GPU, DSP, and RAM);
- ЦП: ARMv8 Cortex-A53 такт. частота 1,4 ГГц, 64 розр., 4 ядра;
- ГП: VideoCore IV 3D;
- Оперативна пам'ять: 1 Гб LPDDR2 (900 МГц);

Порти мікрокомп'ютера:

- USB: USB 2.0 - 4 шт
- відео та аудіо (аналоговий порт): 3,5 мм jack (4 pin)
- відео та аудіо (цифровий порт): HDMI
- Відеокамера: MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)
- Провідна мережа інтернет: 10/100 Ethernet
- Дисплей: Display Serial Interface (DSI)

- Додатковий накопичувач: microSD
- Порти введення та виведення: 40 pin GPIO

Безпроводні інтерфейси:

- Bluetooth 4.2 Classic і Low Energy (BLE)
- WiFi: двосмуговий 2,4 ГГц та 5 ГГц IEEE 802.11.b / g / n / ac

2,4 ГГц

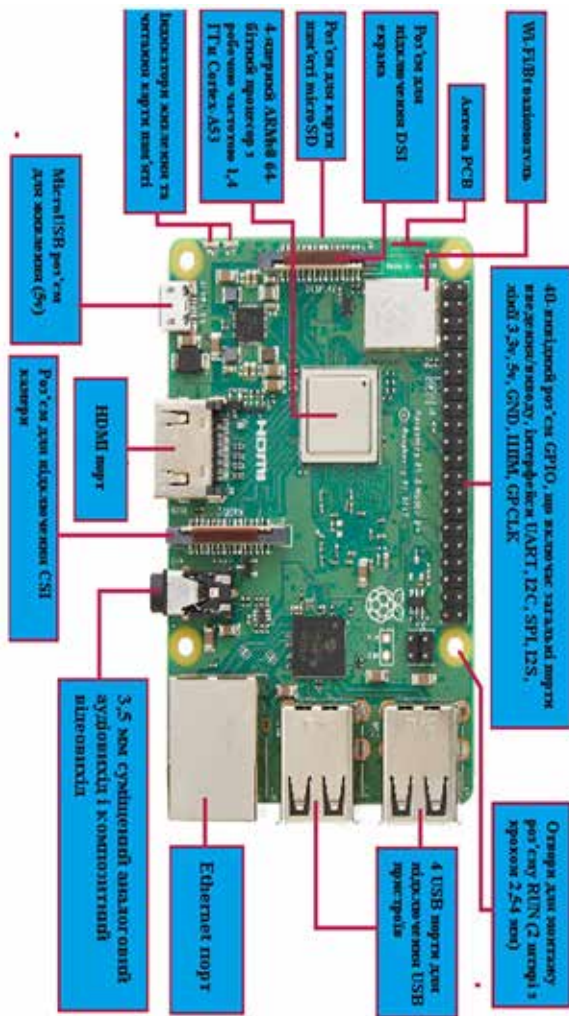


Рисунок 3.2 – Одноплатний мікрокомп'ютер RaspberryPI Model B+

### 3.3 Пристрої для відстежування положення Сонця і та погодних умов

Для визначення положення робочої поверхні ФМ відносно напрямку, що відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання, використовується відеокамера Canyon CNR-WCAM820, що зображена на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Відеокамера Canyon CNR-WCAM820

Відеокамера фіксує зображення у напрямку, перпендикулярному до робочої поверхні ФМ та передає відеосигнал до мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+ з метою аналізу та формування команд повороту трека за азимутом та зенітом.

Технічні характеристики відеокамери:

- матриця: 2 млн пікселів., CMOS;
- роздільна здатність (відео): 1600x1200;
- максимальна частота кадрів: 30 Гц;
- формат зображення: 640x480 при 30 Гц 1600x1200 при 15 Гц;
- глибина кольору: 24-розрядний
- підключення: USB 2.0;
- мікрофон: вбудований;
- кут огляду об'єктива :70 град;
- розміри (ШxВxГ): 72x42x65 мм;

- вага: 96 гр.

Для аналізу погодних умов використовується давач швидкості вітру, зображений на рис. 3.4.



Рисунок 3.2 – Давач швидкості вітру VMS-3000-FS-N01

Давач швидкості вітру має три лопаті, які обертаються відповідно до швидкості потоку повітря. Дані про швидкість обертання лопатей давача у цифровій формі передаються до мікрокомп'ютера по протоколу ModBus.

### 3.4 Кіберфізична система трекара ФМ

З метою точного налаштування, коригування та дослідження роботи трекара ФМ використовується кіберфізична система, зображена на рис. 3.5.

Кіберфізична система складається з ПК, мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+, поворотного механізму трекара, відеокамери, давачів швидкості вітру і температури та піранометра.

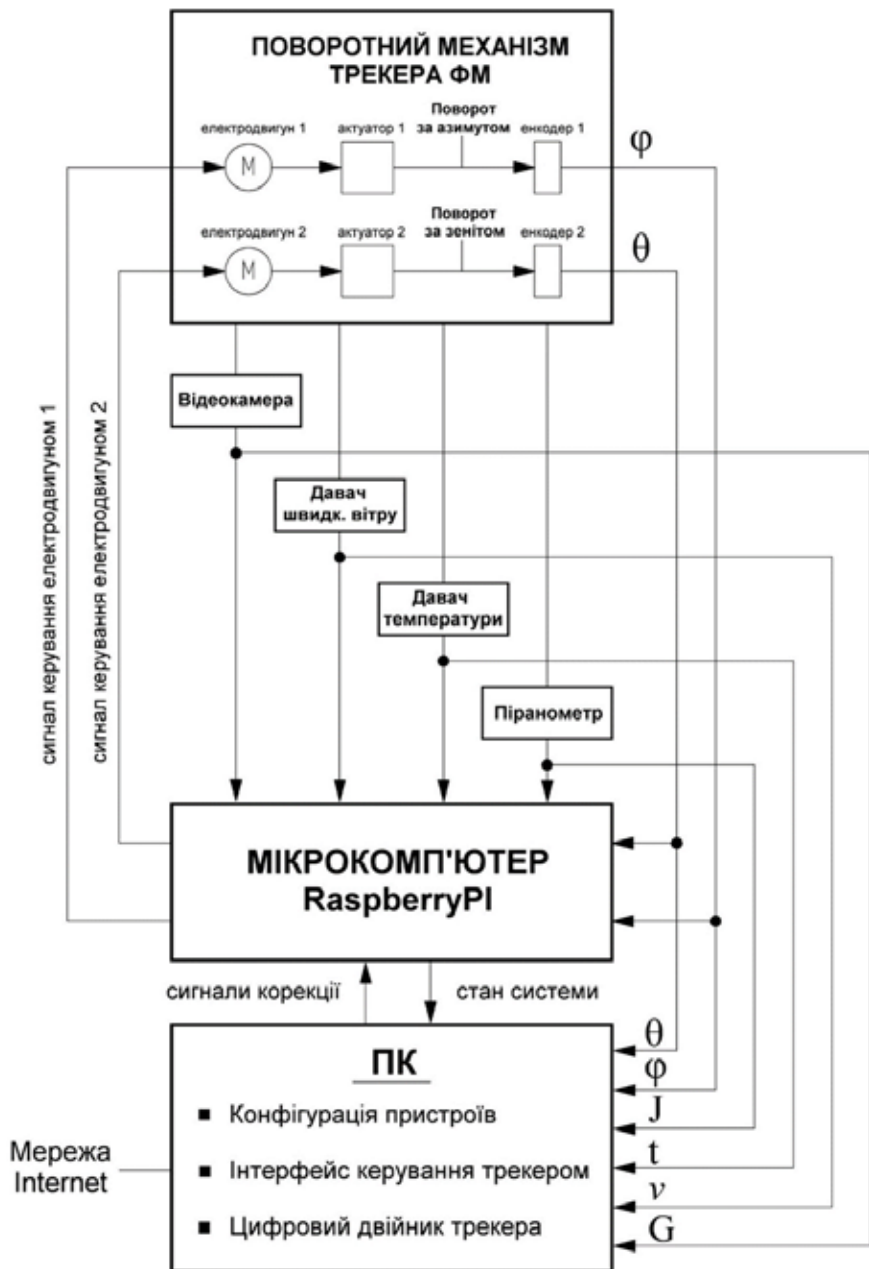


Рисунок 3.4 – Кіберфізична система трекера ФМ

Для визначення позиції робочої поверхні ФМ відносно напрямку, що відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання, використовується відеокамера Canon CNR-WCAM820 (рис. 3.3). З метою визначення рівня освітленості використовується піранометр HQJYFSV12VOC, який по протоколу ModBus передає дані про величину енергії сонячного випромінювання на 1 квадратний метр площі робочої поверхні ФМ. Піранометр HQJYFSV12VOC зображений на рис. 3.6.



Рисунок 3.6 – Піранометр HQJYFSV12VOC

Інформація про погодні умови отримується з датчиків швидкості вітру та температури. Значення кутів повороту за азимутом та зенітом передаються з енкадерів, приєднаних до осей обертання конструкції трекара.

Мікрокомп'ютер трекара та ПК можуть обмінюватися даними через мережі Ethernet, WiFi та по порту USB.

У кіберфізичній системі ПК працює одночасно з мікрокомп'ютером RaspberryPI, та приймає і обробляє дані про кути повороту трекара, позицію відносно напрямку на Сонце, рівень освітленості, температуру та швидкість вітру, а також службову інформацію про стан системи, яку передає мікрокомп'ютер.

На основі аналізу та оброблення вказаних вхідних даних на ПК формуються сигнали для корекції обертання трекера і зміни параметрів конфігурації мікрокомп'ютера з метою максималізації відбору енергії від ФМ та мінімізації втрат на роботу трекера.

У запропонованій кіберфізичній системі також передбачена можливість створення цифрового двійника трекера ФМ з метою отримання високої точності корекції динаміки обертання за азимутом та зенітом.

### 3.5 Цифровий двійник трекера ФМ

Цифровий двійник трекера ФМ зображений на рис. 3.7. Цифровий двійник трекера ФМ приймає вхідні дані про обертання трекера за зенітом та азимутом, рівень освітленості, температуру, швидкість вітру та позицію робочої поверхні ФМ відносно напрямку на Сонце. На основі прийнятих вхідних даних здійснюється моделювання процесу руху конструкції трекера ФМ та розраховуються прогнозовані значення кутів повороту для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання.

За вхідними даними та отриманими значеннями кутів виконується аналіз та оцінка потенційного рівня втрат енергії, які можуть виникнути внаслідок відхилень робочої поверхні ФМ від напрямку, який відповідає максимальній передачі енергії сонячного випромінювання.

За результатами проведеного аналізу формуються команди для корекції руху трекера ФМ та зміни конфігурації мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+ з метою мінімізації втрат енергії, що виникають внаслідок похибок керування трекером.

Моделювання трекера ФМ виконується цифровим двійником у реальному масштабі часу на основі числових методів розв'язання диференційних рівнянь. Параметри процесу моделювання можуть налаштовуватися за допомогою елементів людино-машинного інтерфейсу цифрового двійника. Процес функціонування цифрового двійника відображається у веб-браузері в формі 3D-моделі, яка

рухається синхронно із приєднаним експериментальним зразком трекера ФМ. Алгоритм роботи цифрового двійника експериментального зразка трекера приведено у розділі 4 (п.4.3).

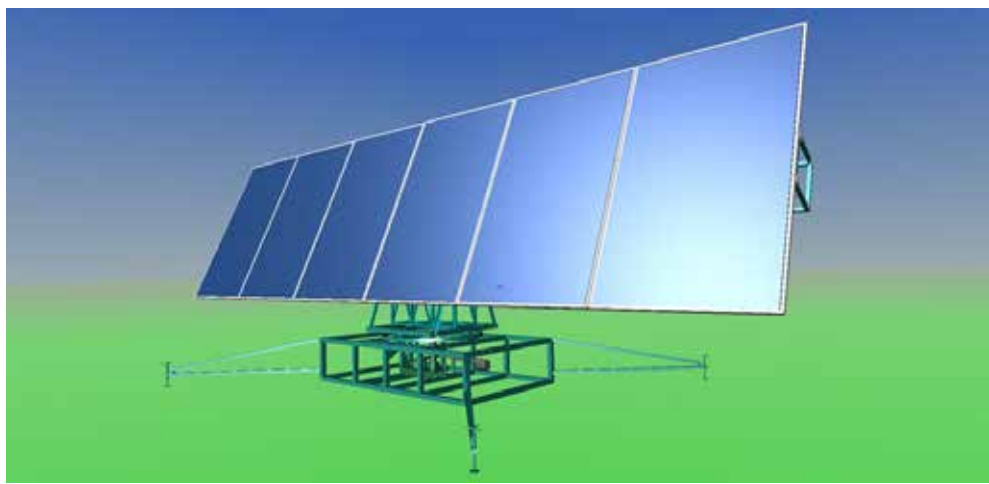
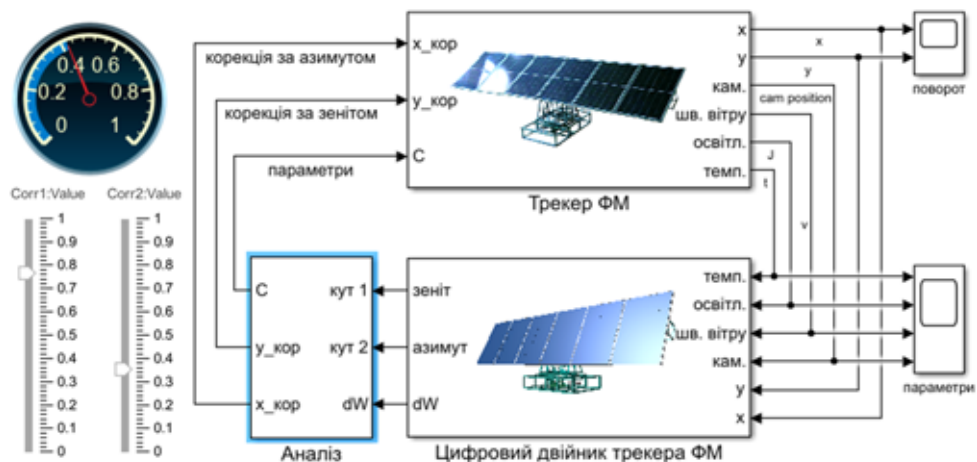


Рисунок 3.7 – Цифровий двійник трекера ФМ

# 4 АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

## 4.1 Алгоритм керування трекером ФМ

Керування експериментальним зразком трекера ФМ відбувається за алгоритмом, зображеним на рис. 4.1.

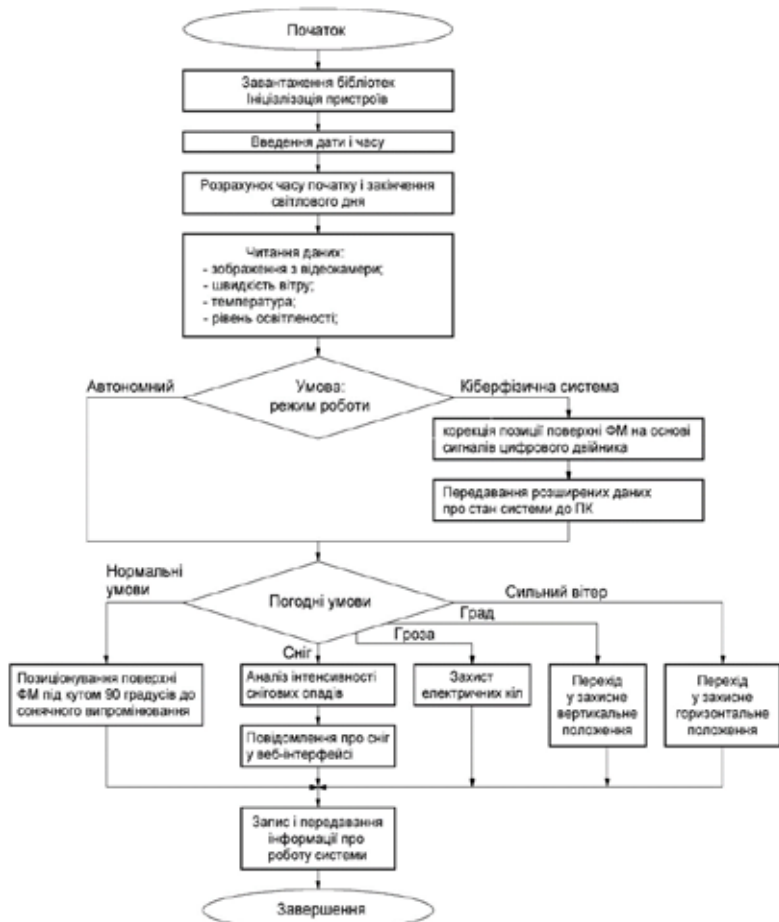


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму керування трекером ФМ

Згідно з блок-схемою, вказаною на рис. 4.1, на початковому етапі відбувається завантаження необхідних бібліотек та ініціалізація усіх приєднаних пристроїв. У програму вводяться значення дати і часу та визначається час початку і закінчення світлового дня. Здійснюється читання даних: зображення з відеокамери, швидкість вітру, температура та рівень освітленості.

У автономному режимі автоматизоване керування трекером здійснюється мікрокомп'ютером RaspberryPI Model B+. Дані про результати керування з мікрокомп'ютера можуть передаватися через мережу Internet до веб-інтерфейсу (п 4.4).

У режимі кіберфізичної системи автоматизоване керування трекером здійснюється одночасно ПК та мікрокомп'ютером RaspberryPI Model B+. На ПК у реальному часі передаються дані про обертання трекера за зенітом та азимутом, рівень освітленості, температуру, швидкість вітру та позицію робочої поверхні ФМ відносно напрямку на Сонце. Виконується аналіз усіх прийнятих сигналів, виконується оцінка потенційних похибок керування трекером ФМ, які ведуть до втрат енергії. Далі на ПК формуються сигнали для корекції обертання трекера і зміни параметрів конфігурації мікрокомп'ютера з метою максималізації відбору енергії від ФМ та мінімізації втрат на роботу трекера.

У процесі автоматизованого керування трекером виконується оцінка погодних умов із розрізненням таких варіантів:

- нормальні умови;
- сильний вітер;
- град;
- гроза (загроза удару блискавки);
- сніг.

При нормальних умовах трекер може працювати у штатному режимі та виконувати позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання. Алгоритм для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання приведений на рис. 4.2.

У випадку сильного вітру трекер переходить у захисне положення, з розташуванням робочої поверхні ФМ відповідно до напрямку вітру.

У випадку граду Трекер переводить ФМ у захисне вертикальне положення з метою захисту робочої поверхні від ударів.

Коли виявлено небезпеку грозових розрядів, вмикається посилений захист електричних кіл. Кола, чутливі до грозових розрядів вимикаються з мережі та переходять у захисні режими.

Взимку, при від'ємних температурах навколишнього середовища, коли з'являється ймовірність покриття снігом робочої поверхні ФМ та замерзання поворотних механізмів трекера, до веб-інтерфейсу системи передаються повідомлення про необхідність очищення трекера від снігу та/або льоду.

В процесі роботи трекера ФМ виконується запис та передавання інформації про погодні умови та результати керування трекером до бази даних для аналізу статистичної інформації.

#### 4.2 Алгоритм для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом $90^\circ$ до падаючого сонячного випромінювання

Блок-схема алгоритму для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання зображена на рис. 4.2. Спочатку виконується завантаження бібліотек та ініціалізація відеокамери. Встановлюються параметри відеозображення та початкові умови для процесу автоматизованого відстеження положення Сонця. Виконується ініціалізація бази даних Redis.

Згідно з датою та даними відеокамери визначається час світлового дня.

У випадку виконання умови світлового дня далі виконується захоплення зображення з камери. Здійснюється фільтрація зображення для знаходження області з найвищою освітленістю. Виконується аналіз розмірів та округлості контуру знайденої області.

Якщо довжина та округлість контуру відповідають відображенню Сонця, то відбувається визначення центру контуру області з найвищою інтенсивністю світла. Розраховується зміщення центру контуру відносно центру зображення. Величина зміщення центру зберігається у базі даних Redis (TTL 5с). Отримані дані

передаються для формування команди керування електродвигунами з метою мінімізації зміщення центру.

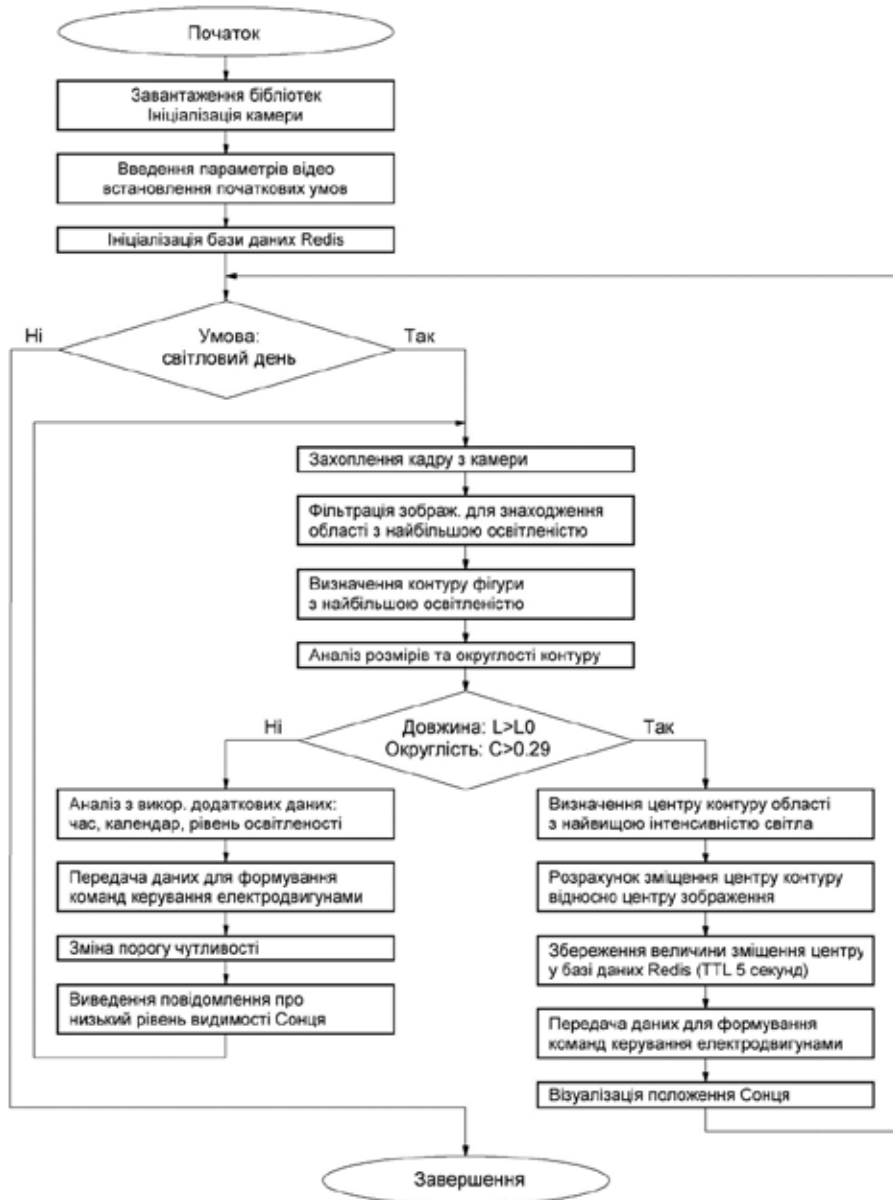


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання

Положення Сонця може візуалізуватися у веб-інтерфейсі програмного забезпечення трекера ФМ.

Якщо довжина та округлість отриманого контуру мають складну форму та/або велику площу, і напрям, що відповідає максимальній сонячній енергії, може не відповідати центру області, то виконується розширений аналіз з використанням додаткових даних (час, календар, рівень освітленості). На основі результатів аналізу передаються дані для формування команд керування електродвигунами з метою максималізації відбору енергії від ФМ. Виводиться повідомлення про низький рівень видимості Сонця.

#### 4.3 Алгоритм роботи цифрового двійника трекера ФМ

При роботі трекера у режимі кіберфізичної системи може використовуватися його цифровий двійник (рис. 3.7). Алгоритм роботи цифрового двійника трекера наведено на рис. 4.3.

Цифровий двійник як вхідні дані використовує інформацію про дату, час, рівень освітленості, швидкість вітру, дані про зображення з відеокамери, температуру робочої поверхні фотоелектричного модуля, повороти за азимутом та зенітом (рис. 3.7).

На основі вказаних вхідних даних здійснюється моделювання процесу позиціонування ФМ у реальному масштабі часу. За результатами моделювання виконується аналіз та оцінка похибок позиціонування трекера, які можуть призводити до втрат електричної енергії.

За результатами аналізу формуються команди для корекції руху трекера ФМ з метою мінімізації втрат.

Цифровий двійник трекера ФМ є зручним засобом для дослідження параметрів і характеристик механічних приводів та процесів перетворення енергії з відстежуванням положення Сонця.

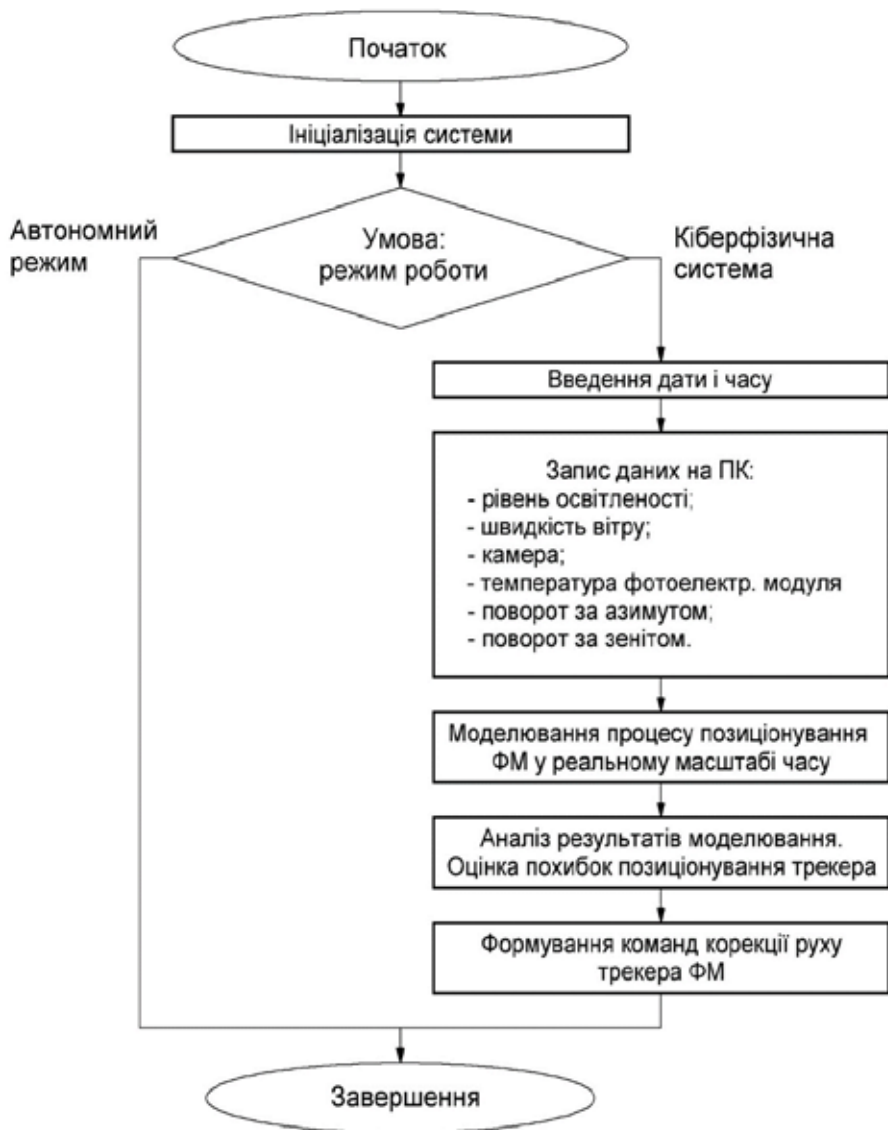


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму роботи цифрового двійника трекера

#### 4.4 Програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом $90^\circ$ до падаючого сонячного випромінювання

На основі алгоритмів, описаних у розділі 3, розроблено програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання. Розроблене ПЗ виконує читання даних із відеокамери, давача вітру та інших зовнішніх пристроїв для оцінки погодних умов та позиції робочої поверхні ФМ відносно напрямку, який відповідає максимальному відбору сонячної енергії. Далі здійснюється аналіз отриманих даних та формування команд для керування електродвигунами, які повертають ферму з фотоелектричними модулями.

Вікно веб-інтерфейсу програмного забезпечення для керування трекером ФМ зображено на рис. 4.4.

Кут	Значення в градусах	Значення з кодера
Азимут	154.46.10.1	60.0
Висота	16.25.16.3	17.0
Дані		Значення
Схід сонця		2023-11-24 07:35:38
Захід сонця		2023-11-24 16:21:10
Швидкість вітру м/с		0

Рисунок 4.4 – Веб-інтерфейс розробленого програмного забезпечення трекера ФМ

ПЗ (рис. 4.4) може функціонувати в режимі автоматичного керування (авторежим, за замовчуванням) та у режимі ручного керування для коригування конфігурації трекера ФМ.

Код підпрограми `sun_status` для аналізу положення Сонця з використанням дати і часу на мові програмування Python приведено у Додатку А.

Положення Сонця визначається функцією `calculate_sun_alt_az` на основі довготи, широти, часового поясу та локального часу. Визначення часу доби та перевірка умов світлового дня виконується функцією `compare_redis_time`. Далі значення у градусах переводяться у числові значення та оголошуються змінні. Підпрограма запускається на виконання із записом даних у базу Redis (Додаток А). Дані про результати виконання підпрограми передаються до веб-інтерфейсу системи.

Код підпрограми `tracker_sun` на мові Python для відстеження напрямку, що відповідає максимальній сонячній енергії, приведено у Додатку Б. На початковому етапі роботи підпрограми завантажуються необхідні бібліотеки та виконується ініціалізація пристроїв. Встановлюється значення порогу бінаризації для виявлення Сонця, і налаштовується фільтр за освітленістю. Задаються початкові умови.

В основному циклі визначення наявності Сонця та його положення здійснюється захоплення кадру з відеокамери. Отримане зображення фільтрується з метою знаходження області з найбільшою освітленістю з використанням порогового перетворення. Далі визначаються контури та розмір фігури з найбільшою освітленістю. Виконується фільтрація області за розмірами та округлістю.

Якщо визначається відповідність отриманої області зображенню Сонця, то виконуються розрахунки його зміщення від центру зображення. Додаються позначення для візуалізації зміщення центру зображення відносно Сонця. Далі виконується розрахунок повороту робочої поверхні ФМ з метою позиціонування під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання.

Якщо визначено, що виділена область не відповідає зображенню Сонця, то виконується аналіз додаткових даних з метою визначення напрямку, який відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання.

Дані, отримані за результатами розрахунків передаються до підпрограм керування електродвигунами для формування команд повороту.

Код підпрограми `web_socket_server` для оброблення даних та команд веб-сервером системи на мові програмування Python приведено у Додатку В. На початковому етапі виконується завантаження часу,

бібліотек та встановлюється зв'язок з базою даних Redis. Формується список приєднаних клієнтів. При приєднанні нового клієнта викликається функція `async def on_connect`, яка керує очікуванням та обробкою команд від клієнта за допомогою функції `async def process_command`. Далі виконуються дії відповідно до отриманих команд та подаються екеруючі сигнали на виводи GPIO мікрокомп'ютера RaspberryPI Model B+. Далі перевіряється існування та виконується перетворення даних у базі Redis. Відповідь формується у форматі JSON, і відправляється клієнту.

Підпрограма виконує оброблення даних та команд, що надходять із різних пристроїв та дозволяє керувати параметрами роботи трекера ФМ.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання розроблення схеми управління та алгоритму і програмного забезпечення трекера фотоелектричного модуля для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання було виготовлено експериментальний зразок трекера ФМ, який забезпечує позиціонування робочої поверхні за азимутом та зенітом з метою відстежування напрямку, що відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання, і може транспортуватися автомобільним причіпом. Розроблено схему управління трекера ФМ на базі кіберфізичної системи з цифровим двійником трекера для позиціонування робочої поверхні ФМ на основі даних з відеокамери, давача освітленості та давача швидкості вітру. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання із застосуванням вдосконалених методів оброблення даних про позицію трекера та погодні умови на основі згорткових функцій.

Розроблені схема управління та алгоритм і програмне забезпечення трекера ФМ дозволяють здійснювати позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання протягом світлового дня при різних погодних умовах із низькими витратами енергії на рух поворотних механізмів трекера.

В процесі виконання роботи отримано такі основні наукові результати:

- 1) Виготовлено експериментальний зразок трекера ФМ, який забезпечує позиціонування робочої поверхні за азимутом та зенітом з метою відстежування напрямку, який відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання протягом світлового дня, згідно із технічними характеристиками ФМ. Експериментальний зразок трекера ФМ може транспортуватися автомобільним причіпом, та встановлюватися за місцем розташування мобільної установка переробки полімерних відходів.

2) Розроблено схему управління трекера ФМ, яка відрізняється тим, що побудована на базі кіберфізичної системи з цифровим двійником трекера, який забезпечує можливість точного налаштування процесу позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання на основі даних з відеокамери, давача освітленості та давача швидкості вітру. Схема управління трекера ФМ забезпечує виконання умов для мінімізації втрат енергії на живлення електродвигунів поворотного механізму протягом доби.

3) Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання, що відрізняються застосуванням вдосконалених методів оброблення даних про позицію трекера та погодні умови з відеокамери, давача освітленості та давача швидкості вітру на основі згорткових функцій. Розроблений алгоритм та програмне забезпечення дозволяє здійснювати відстежування положення Сонця та позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом  $90^\circ$  до падаючого сонячного випромінювання протягом світлового дня, а також переводити трекер у безпечну позицію при виникненні складних погодних умов, таких, як град або сильний вітер.

Експериментальний зразок трекера ФМ може використовуватися для створення високоєфективної системи електроживлення мобільної установки переробки полімерних відходів, з метою покращення характеристик автономного режиму її роботи та зниження шкідливого впливу на довкілля. Крім того, експериментальний зразок може застосовуватися для дослідження роботи поворотних механізмів при відстежуванні положення Сонця, для аналізу характеристик фотоелектричних модулів та розроблення і вдосконалення засобів відновлюваної енергетики.

Розроблена схема управління трекера ФМ, може використовуватися для позиціонування робочої поверхні ФМ за напрямом, що відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання, а також для дослідження і вдосконалення процесів керування поворотними механізмами трекера ФМ та розвитку теорії і методів автоматизованого керування із застосуванням цифрових двійників.

Розроблений алгоритм та програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ може використовуватися для автоматизованого керування трекером, а також для розвитку методів оброблення даних про положення робочої поверхні ФМ відносно напрямку, що відповідає максимальній енергії сонячного випромінювання на основі відеозображення та інформації про рівень освітленості і швидкість вітру.

Отримані результати дозволяють виконувати подальше розроблення високоефективної автономної системи електроживлення установки переробки полімерних відходів у дизпаливо на основі методів максималізації відбору сонячної енергії при різних погодних умовах.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- [1] Özer SM, İftar A. DrStabilization: A Matlab-based Software to Design Structured Time-delay Controllers. IFAC-PapersOnLine 2022;55:252–7. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2022.11.366>.
- [2] O. Erdinc and M. Uzunoglu, “Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches,” Renewable Sustainable Energy Rev. 16(3), 1412–1425 (2012).
- [3] Valera A, Vallés M, Tornero J. Real-Time Robot Control Implementation with Matlab/Simulink. IFAC Proceedings Volumes 2001;34:527–32. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)41762-9](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)41762-9).
- [4] Liu X, Gan H, Luo Y, Chen Y, Gao L. Digital-Twin-Based Real-Time Optimization for a Fractional Order Controller for Industrial Robots. Fractal and Fractional 2023;7. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT7020167>.
- [5] Queiroz J da R, Souza A da S, Gussoli MK, de Oliveira JCD, Andrade CMG. Construction and automation of a microcontrolled solar tracker. Processes 2020;8. <https://doi.org/10.3390/pr8101309>.
- [6] Saroja S, Madavan R, Alagan J, Chandrika VS, Karthick A. Wireless Sensing Based Solar Tracking System Using Machine Learning. Smart Antennas, Electromagnetic Interference and Microwave Antennas for Wireless Communications, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003373230-11>.
- [7] Nsengiyumva W, Chen SG, Hu L, Chen X. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>.
- [8] Gaeid KS, Uddin MN, Mohamed MK, Mohmmoud ON. Design and Implement of Dual Axis Solar Tracker System Based Arduino. Tikrit Journal of Engineering Sciences 2020;27. <https://doi.org/10.25130/tjes.27.2.09>.
- [9] Garrido R, Díaz A. Cascade closed-loop control of solar trackers applied to HCPV systems. Renew Energy 2016;97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.022>.

- [10] Saldivar-Aguilera TQ, Valentín-Coronado LM, Peña-Cruz MI, Diaz-Ponce A, Dena-Aguilar JA. Novel closed-loop dual control algorithm for solar trackers of parabolic trough collector systems. *Solar Energy* 2023;259. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.024>.
- [11] Emara MB, Youssef AW, Mashaly M, Kiefer J, Shihata LA, Azab E. Digital Twinning for Closed-Loop Control of a Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot. *Procedia CIRP* 2022;107:1245–50. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.139>.
- [12] Saldivar-Aguilera TQ, Diaz-Ponce A, Valentin-Coronado LM, Pena-Cruz MI, Acevedo RGA. Dual feedback closed-loop control for one-axis solar trackers of parabolic trough collector systems. 2021 23rd IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2021, 2021. <https://doi.org/10.1109/ROPEC53248.2021.9668095>.
- [13] Bhatia D. Linear covariance analysis of closed-loop attitude determination and control system of sub-arcsec pointing three-axes spacecraft. *Advances in the Astronautical Sciences*, vol. 171, 2020.
- [14] Wang JM, Lu CL. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system. *Sensors* (Switzerland) 2013;13. <https://doi.org/10.3390/s130303157>.
- [15] Nahar MJ, Sarkar MR, Uddin M, Hossain MF, Rana MM, Tanshena MR. Single Axis Solar Tracker for Maximizing Power Production and Sunlight Overlapping Removal on the Sensors of Tracker. *International Journal of Robotics and Control Systems* 2021;1. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v1i2.333>.
- [16] Diaz A, Garrido R, Soto-Bernal JJ. A Filtered Sun Sensor for Solar Tracking in HCPV and CSP Systems. *IEEE Sens J* 2019;19. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2879460>.
- [17] Lastya HA, Away Y, Tarmizi T, Sara ID, Ikhsan M, Zikra U, et al. Performance Comparison Between LDR and Phototransistor Sensor for Dual-Axis Sun Tracker Sensor Based on Tetrahedron Geometry. *International Conference on Information Science and Technology Innovation* (ICoSTEC) 2023;2. <https://doi.org/10.35842/icostec.v2i1.50>.

- [18] Quirynen R, Berntorp K. Uncertainty propagation by linear regression Kalman filters for stochastic NMPC. *IFAC-PapersOnLine* 2021;54:76–82. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2021.08.527>.
- [19] Utrera J, Vazquez R. Implementation in MATLAB of a Multiplicative Extended Kalman Filter for live estimation of a smart device's attitude. *IFAC-PapersOnLine* 2021;54:43–8. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2021.11.008>.
- [20] Suria AK, Idris RM. Dual-axis solar tracker based on predictive control algorithms. 2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015, 2015. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409546>.
- [21] Kakosimos PE, Kladas AG. Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique. *Renew Energy* 2011;36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.021>.
- [22] Ikhwan M, Mardijah, Imron C. Model predictive control on dual axis solar tracker using Matlab/Simulink simulation. 2018 International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2018, vol. 2018- January, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350791>.
- [23] Wang W, Li S. Model predictive control of 2-axis solar tracker for solar energy system. Chinese Control Conference, CCC, 2012.
- [24] Metry M, Balog RS. A parameter mismatch study on model predictive control based sensorless current mode. 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2018, vol. 2018- February, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2018.8312065>.
- [25] Li S, Attou A, Yang Y, Geng D. A maximum power point tracking control strategy with variable weather parameters for photovoltaic systems with DC bus. *Renew Energy* 2015;74:478–88. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.056>.
- [26] Jascourt SD, Kirk-Davidoff D, Cassidy C. Forecasting solar power and irradiance - Lessons from real-world experiences. SOLAR 2016 - American Solar Energy Society National Solar Conference 2016 Proceedings, 2016. <https://doi.org/10.18086/solar.2016.01.15>.

- [27] Pavithra C, Rithan R, Rohith R, Santhosh M, Vijayadharshini M, Lokith R. Three Dimensional Solar Tracking Using Machine Learning. 2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2023, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICACCS57279.2023.10113091>.
- [28] Machine Learning Podcast Host and Technology Influencer: Gautam Siwach. LA Weekly 2022.
- [29]. Niu H, Chen YQ, West BJ. Why do big data and machine learning entail the fractional dynamics? Entropy 2021;23. <https://doi.org/10.3390/e23030297>.
- [30] Yamauchi K. Incremental learning on a budget and its application to quick maximum power point tracking of photovoltaic systems. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics 2014;18. <https://doi.org/10.20965/jaciii.2014.p0682>.
- [31] Bickel S, Schleich B, Wartzack S. A Novel Shape Retrieval Method for 3D Mechanical Components Based on Object Projection, Pre-Trained Deep Learning Models and Autoencoder. CAD Computer Aided Design 2023;154. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103417>.
- [32] de Sá Campos MH, Tiba C. Nptrack: A n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection. Energies (Basel) 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14040925>.
- [33] AL-Rousan N, Mat Isa NA, Mat Desa MK. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system. Journal of King Saud University - Engineering Sciences 2020;32. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.004>.
- [34] Ahmad S, Razali AN, Misrun MI. Effective and Low-Cost Arduino based Dual-Axis Solar Tracker. J Phys Conf Ser, vol. 1878, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012049>.
- [35] Sidek MHM, Azis N, Hasan WZW, Ab Kadir MZA, Shafie S, Radzi MAM. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. En 2017;124. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.001>.
- [36] Srang S, Ath S, Yamakita M. Newton-euler based dynamic modeling and control simulation for dual-axis parallel mechanism solar tracker. Advances in Science, Technology and Engineering Systems 2020;5. <https://doi.org/10.25046/AJ050587>.

- [37] Jamroen C, Komkum P, Kohsri S, Himananto W, Panupintu S, Unkat S. A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2020;37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618>.
- [38] Saeedi M, Effatnejad R. A new design of dual-axis solar tracking system with ldr sensors by using the wheatstone bridge circuit. *IEEE Sens J* 2021;21. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3072876>.
- [39] Rauscher A, Hufnagel M, Endisch C. Pareto optimization of wavelet filter design for partial discharge detection in electrical machines: Pareto Optimization of Wavelet Filters. *Measurement (Lond)* 2022; 205. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112163>.
- [40] Rezoug MR, Taibi D, Benaouadj M, Chenni R. A New Optimization Approach for a Solar Tracker Based on an Inertial Measurement Unit. *Engineering, Technology and Applied Science Research* 2021;11. <https://doi.org/10.48084/etasr.4330>.
- [41] Bansal P, Gill SS. Lightning attachment procedure optimization algorithm for optimal design of digital FIR band stop filter. *Measurement: Sensors* 2022;24. <https://doi.org/10.1016/J.MEASEN.2022.100590>.
- [42] Ceha TJ, De Araujo Passos LA, Baldi S, De Schutter B. Model predictive control for optimal integration of a thermal chimney and solar shaded building. 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2021, 2021. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480299>.
- [43] Al-Ammar EA, Habib HUR, Kotb KM, Wang S, Ko W, Elmorshedy MF, et al. Residential Community Load Management Based on Optimal Design of Standalone HRES with Model Predictive Control. *IEEE Access* 2020;8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965250>.

## ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....</b>	<b>1</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>2</b>
<b>1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТРЕКЕРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ</b>	<b>8</b>
1.1 Методи керування трекером ФМ без зворотного зв'язку .....	5
1.2 Методи керування трекером ФМ із зворотним зв'язком .....	7
1.3 Методи керування трекером ФМ з передбаченням.....	9
<b>2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ЗРАЗОК ТРЕКЕРА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ .....</b>	<b>16</b>
2.1 Експериментальний зразок трекера ФМ.....	16
2.2 Несуча конструкція експериментального зразка трекера ФМ.....	19
2.3 Поворотний механізм експериментального зразка трекера ФМ .	25
2.4 Транспортування експериментального зразка трекера ФМ.....	26
2.5 Додатковий тестовий макет трекера ФМ .....	31
<b>3 СХЕМА УПРАВЛІННЯ ТРЕКЕРА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ .....</b>	<b>32</b>
3.1 Система автоматичного керування трекера ФМ.....	32
3.2 Мікрокомп'ютер трекера ФМ .....	33
3.3 Пристрої для відстежування положення Сонця і та погодних умов .....	35
3.4 Кіберфізична система трекера ФМ .....	36
3.5 Цифровий двійник трекера ФМ.....	39
<b>4 АЛГОРИТМИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ.....</b>	<b>41</b>
4.1 Алгоритм керування трекером ФМ .....	41
4.2 Алгоритм для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом 90° до падаючого сонячного випромінювання.....	43
4.3 Алгоритм роботи цифрового двійника трекера ФМ .....	45
4.4 Програмне забезпечення для позиціонування робочої поверхні ФМ під кутом 90° до падаючого сонячного випромінювання.....	47
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>50</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>53</b>
<b>ЗМІСТ .....</b>	<b>58</b>