

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)
«_____» _____ 2026 р.

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)
«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Підвищення ефективності генерування електроенергії сонячною електростанцією з використанням системи трекерів»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Петренко А.В.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Степовий В.Р.
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
_____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«_____» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Степовому Владиславу Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Підвищення ефективності генерування електроенергії сонячною електростанцією з використанням системи трекерів»** затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 30.05.2026 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: План, місце розташування, нормативні документи, каталоги, обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Сонячний трекер.
2. Технології стеження. Ефективність стеження за сонцем.
3. Механізми керування та елементи системи керування
4. Моделювання системи стеження за сонцем

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «18» 11. 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Петренко А.В.

Завдання прийняв до виконання _____ Степовий В.Р

РЕФЕРАТ

Актуальність теми полягає у необхідності підвищення енергетичної ефективності комерційних та промислових об'єктів в умовах постійного зростання вартості електроенергії та розвитку відновлюваної енергетики. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності сонячних електростанцій є використання трекерних систем, які дозволяють збільшити виробіток електроенергії за рахунок автоматичного відстеження положення Сонця.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи сонячної електростанції шляхом застосування трекерних систем та дослідження їх впливу на генерацію.

Об'єкт дослідження: процес генерування електроенергії фотоелектричною станцією з використанням систем сонячного трекінгу.

Предмет дослідження: вплив трекерних систем на ефективність роботи сонячної електростанції.

Для досягнення поставленої мети у роботі було виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сонячної енергетики; досліджено типи та принципи роботи трекерних систем; виконано вибір основного обладнання сонячної електростанції; розроблено схему електропостачання об'єкта; змодельовано роботу фотоелектричної станції у програмному комплексі PVsyst.

За результатами моделювання у програмному комплексі PVsyst встановлено, що використання одноосьових трекерів дозволяє збільшити річну генерацію електроенергії приблизно на 13,5 % у порівнянні зі стаціонарною системою.

Розроблені проєктні рішення можуть бути використані під час проєктування промислових та комерційних сонячних електростанцій із системами автоматичного позиціонування фотомодулів.

Ключові слова: сонячна електростанція, фотоелектричні модулі, одноосьовий трекер, PVsyst, гібридний інвертор, система накопичення енергії, генерація електроенергії.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	8
1.1. Огляд стану та тенденцій розвитку сонячної енергетики в Україні і світі.	8
1.2 Аналіз перспективних напрямів розвитку сонячних електростанцій.	11
1.3 Визначення проблем підвищення ефективності генерування електроенергії.	12
Висновки до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ВІДСТЕЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	14
2.1 Призначення та види трекерних систем.....	14
2.2 Конструкція та принцип роботи механізмів відстеження положення Сонця.....	19
2.3 Порівняльний аналіз використання трекерів на генерування електроенергії	25
Висновки до розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СЕС ДЛЯ ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	29
3.1 Характеристика об'єкта для проектування системи.....	29
3.2 Кліматичні умови об'єкта проектування.....	32
3.3 Розрахунок та вибір трекерної системи.....	35
3.4 Вибір та технічне обґрунтування основного обладнання СЕС	38
3.4.1 Вибір фотоелектричних панелей	39
3.4.2 Вибір приводів для позиціонування трекера	41
3.4.3 Вибір алгоритму керування трекерною системою.....	44
3.4.4 Вибір інверторів	46
3.4.5 Обґрунтування доцільності встановлення АКБ.	50
3.5 Розміщення обладнання СЕС.....	53
Висновки до розділу 3	56
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	57
4.1. Аналіз вихідних даних дослідження сонячної електростанції з трекерною системою.....	57
4.2 Розрахунок генерування електроенергії з фіксованими панелями ...	62
4.3 Розрахунок генерування електроенергії з використанням системи трекерів.....	66

4.4 Порівняльний аналіз та оцінка економічної доцільності впровадження системи трекерів	69
Висновки до розділу 4	73
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ	79
Додаток А.....	79
Додаток Б	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ	– відновлювані джерела енергії;
АС	– змінний струм;
ДС	– постійний струм;
АКБ	– акумуляторна батарея;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
СЕС	– сонячна електростанція;
ФЕМ	– фотоелектричний модуль;

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетичної галузі характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є сонячна енергетика, яка демонструє стабільне зростання встановлених потужностей у більшості країн світу. [4, 11]

Незважаючи на динамічний розвиток фотоелектричних систем, один із основних недоліків сонячних електростанцій залежність від кута падіння сонячного випромінювання, все ще суттєво впливає на рівень генерації.

Одним із способів підвищення ефективності фотоелектричних систем є використання трекерних систем, які забезпечують автоматичне відстеження положення Сонця. Це дозволить збільшити генерацію електроенергії від стабільної сонячної інсоляції протягом дня та ефективно використовувати площу розміщення фотомодулів.

У роботі розглядається розробка сонячної електростанції з трекерними системами та дослідження ефективності використання систем автоматичного відстеження положення Сонця шляхом порівняння їх роботи зі стаціонарними фотоелектричними системами.

Об'єктом дослідження розглядається мережева сонячна електростанція з одноосьовими трекерними системами, для живлення сервісного центру сільськогосподарської техніки.

Предмет дослідження: процеси генерування електроенергії фотоелектричною системою з одноосьовими трекерами, а також вплив орієнтації фотомодулів на ефективність роботи сонячної електростанції.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проектування промислових та комерційних сонячних електростанцій із системами автоматичного позиціонування фотоелектричних модулів.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Огляд стану та тенденцій розвитку сонячної енергетики в Україні і світі.

На сьогоднішній день відновлювана енергія є однією з провідних галузей в світі, яка дозволяє зменшити залежність від традиційних джерел енергії. Сонячна енергетика, яка нещодавно була новою технологією видобутку електроенергії сьогодні демонструє найбільш динамічний розвиток серед усіх відновлювальних джерел та може нав'язати конкуренцію нарівні з викопними джерелами енергії та ядерною енергетикою.

Основних причин такого росту дві:

1) Поступове здешевшання сонячних панелей на ринку: через зниження ціни на компоненти та масовість виготовлення ФЕМ, особливо в Китаї, від чого будівництво власних СЕС для господарства стало доступніше. [1]

2) Розвиток сонячної енергетики у світі супроводжується не лише збільшенням встановленої потужності виділяючи більше площі для встановлення, але й змінами в архітектурі самих систем. Якщо раніше використовувались переважно статичні наземні сонячні електростанції, то сьогодні впроваджуються універсальні рішення станцій з інтелектуальним керуванням, трекерними системами, інверторами з функціями оптимізації та інтеграцією СЕС з установками зберігання енергії. Це означає, що основна увага зміщується від простого нарощування кількості панелей до підвищення ефективності кожного встановленого кіловата інноваційними рішеннями та технологіями.

Ситуація з сонячною енергетикою в світі

Станом на кінець 2025 року сонячна енергетика значний отримала приріст потужностей на 510 ГВт встановивши черговий рекордний показник генерації. Беззаперечним лідером в галузі сонячної енергетики являється материкова Азія в обличчі Китаю, який перевищив відмітку потужностей понад 1 терават (ТВт) додавши в 2025 році 277 ГВт сонячної генерації та зайняв місце головного постачальника фотомодулів та комплектуючих до них в світовому ринку, через масштабні проєкти розвитку в галузі сонячної енергетики на державному рівні та інноваційним розробкам таких як установки зберігання енергії (УЗЕ) з впровадженням «розумних мереж» для підвищення ефективності використання енергії. [2, 4]

Слідом йде США яка займає друге місце в світі з загальною потужністю фотовольтаїчних систем 211,6 ГВт отримавши приріст в 2025 році на 34 ГВт завдяки внескам приватних інвесторів для програми будівництва та розвитку зеленої енергетики в країні.

Третє місце замикає Індія – відносно новий гравець на ринку, який стабільно нарощує власні потужності використовуючи ідеальне розміщення та розміри країни для отримання сонячної енергії. В 2025 році країна подолала відмітку 135,5 ГВт генеруючих потужностей.

Протягом останніх 4 років ВДЕ на основі енергії Сонця в багатьох країнах демонструє експоненційне зростання, обсяги збільшення потужності з 2022 року лише вирости завдяки зниженню цін комплектуючих СЕС та місцями витісняючи генерацію енергії на викопних паливах таких як нафта та газ, що дозволяє знизити попит на ці джерела оскільки вони обмежені ресурсами планети.

Наприклад Німеччина попри не саме найкраще географічне положення для збору сонячної енергії займає 4 сходинку за зростанням фотовольтаїчних систем

на фоні реалізації програми відмови від ядерної енергетики, яка змістила пріоритет енергетики на розвиток ВДЕ в країні.

Сонячна енергетика в Україні

В Україні на сьогодні відбувається унікальна ситуація, яка демонструє необхідність переходу від централізованої системи до розподіленої генерації з виявленням вразливостей після значних пошкоджень великих промислових об'єктів енергетичної інфраструктури у 2022-2025 роках та аварійних ситуацій, які впливають на стійкість енергетичної системи. Тому на фоні цих проблем сонячна енергетика перестала працювати як інструмент для переходу на «Зелену енергію», а й сформувала нову опору для національної енергетичної безпеки та енергонезалежності, яка динамічно розвивається.

Україна має один з найвищих потенціалів для розвитку ВДЕ на основі сонячної енергії завдяки сприятливим кліматичним умовам та географічному розташуванню. Україна має значний потенціал для розвитку фотоелектричних систем як промислового, так і побутового рівня. На території України проходить достатньо багато сонячних днів, які з урахуванням найбільшої площі територій серед країн ЄС (навіть з урахуванням втрат через окупацію та бойові дії). Сонячна інсоляція на території України досягає від 1000 до 1450 кВт/м², що більше навіть згаданої вище Німеччини – лідера в сфері фотовольтаїки в ЄС, тому такі фактори сприяють вкладенню ресурсів в розвиток фотоелектричних систем. [3]

Основна ідея розвитку цієї галузі полягає в тому, що фотоелектричні системи можуть ефективно інтегруватися у великі енергетичні комплекси та локальні мережі на рівні домогосподарств, підприємств і громад. Це дозволяє зменшити навантаження на магістральні мережі, підвищити енергетичну незалежність регіонів і забезпечити часткову автономність споживачів.

1.2 Аналіз перспективних напрямів розвитку сонячних електростанцій.

Для росту сонячної енергетики, як одного з домінуючих секторів недостатньо просто збільшити кількість територій заповненими фотоелектричними модулями. Сучасний етап розвитку галузі спрямований в напрямку підвищення ефективності генерування електроенергії, зменшення втрат в конструкції фотомодулів та інтеграція сонячних електростанцій із сучасними енергетичними системами.

Один з найбільш очевидних напрямів розвитку технологій фотомодулів є збільшення коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів. Сучасні високоефективні фотомодулі на ринку мають ККД в межах 22-24%, а нові серії фотомодулів, які розробляються за технологіями такі як TOPCon, HJT, Bifacial та Перовскітні фотомодулі можуть підняти планку стандарту ККД до 25-30 %. Перевагами нового покоління фотомодулів є не лише високий ККД, а також покращена робота при високих температурах, стійкість до деградації панелей. [8]

Другим перспективним напрямом розглядається використання інтелектуальних систем. Інвертори та системи моніторингу нового покоління дозволяють в режимі реального часу аналізувати її роботу СЕС та в автоматичному режимі її оптимізувати. На основі отриманих даних система може контролювати власне споживання об'єкта або регулювати пріоритетність розподілу електроенергії використовуючи її максимально ефективно.

Також важливим напрямом розвитку сонячної енергетики інтеграція системи накопичення енергії (BESS), яка на сьогоднішній день може використовуватись в промислових масштабах і використовується не тільки як резервне джерело живлення окремих об'єктів, а й як елемент живлення.

Іншим перспективним напрямом розглядається впровадження систем автоматичного позиціонування панелей для відстеження положення Сонця.

1.3 Визначення проблем підвищення ефективності генерування електроенергії.

Попри стрімкий розвиток сонячної енергетики та постійне вдосконалення технологій сонячних панелей, питання підвищення ефективності генерації електроенергії в хоч і невичерпному джерелі, але все ще залишається однією з пріоритетних задач у сфері ВДЕ.

Основною проблемою сонячної енергетики є нестабільність сонячного випромінювання, яке динамічно змінюється протягом доби, місяця, року. Також при низькому ККД фотоелектричних перетворювачів навіть з покращеннями за останнє десятиліття залежність від кліматичних умов та географічного розташування об'єкта все ще залишається

Суттєвий вплив на роботу фотоелектричних систем має затінення фотомодулів, яке сильно залежить від оточення сонячної електростанції та погодних умов. Затінення може суттєво вплинути, оскільки навіть затінення одного елемента в ряду фотомодулів може знизити продуктивність всієї станції через те, що більшість фотомодулів з'єднуються послідовно. Причинами затінення можуть бути сусідні ряди панелей, будівлі, дерева або часте явище забруднення панелей снігом та пилом.

Одним із способів підвищення ефективності фотоелектричних систем є використання трекерних систем, які забезпечують автоматичне відстеження положення Сонця та дозволяють збільшити генерацію електроенергії, регулюючи кут нахилу панелей, отримуючи максимум сонячного випромінювання протягом дня та дозволяє знизити ймовірність затінення панелей в ранкові та вечірні години коли Сонце низько за горизонтонтом.

Висновки до розділу 1

У ході роботи було проведено аналіз стану розвитку ВДЕ на основі сонячної енергетики в Україні та світі.

Встановлено, що сонячна енергетика демонструє найбільший приріст серед усіх джерел енергії завдяки постійному зростанню потужностей, зниженню вартості обладнання та впровадження сучасних технологій для підвищення ефективності генерації.

Проаналізовано світові тенденції розвитку фотоелектричних систем та визначено, що основний напрям модернізації сучасних СЕС сфокусований на підвищенні ефективності використання сонячного випромінювання шляхом застосування високоефективних фотомодулів, впровадження систем накопичення енергії, інтелектуальних систем керування та автоматичного позиціонування панелей.

Розглянуто основні проблемних факторів, які знижують продуктивність фотомодулів. До них відносяться обмеженість в ККД, постійна зміна положення Сонця протягом року, затінення фотомодулів, температурі та погодні умови.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ВІДСТЕЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Призначення та види трекерних систем.

Сонячний трекер – система, яка здатна безперервно та автоматично відстежувати рух Сонця і втримувати фотоелектричні панелі під максимально перпендикулярним кутом до сонячних променів, при цьому підвищуючи виробіток від 20 – 50% (в залежності від технології трекерів) за рахунок максимального збору сонячного випромінювання протягом дня. [2, 29]

Як нам відомо, Сонячне випромінювання – це екологічно чистий та найбільш доступний вид енергії придатний для перетворення в електроенергію, без шкоди навколишньому середовищу. Протягом останніх 10 років цей вид видобутку енергії успішно використовується та просувається, як основна альтернатива ядерним та викопним джерелам енергії.

Але в даного виду видобутку енергії є суттєвий недолік – низький ККД фотоелектричних модулів, який може впасти, оскільки їх ефективність напряду залежить від інтенсивності випромінювання, і при зміні положення Сонця протягом дня, місяця, року та під впливом несприятливих погодніх умов системи працює не на максимальну потужність і її ефективність знижується.

Тому в більшості систем, які були побудовані, обирали компромісні варіанти орієнтування панелей для статичних систем жертвуючи максимальною генерацією в пік сонячної активності заради стабільності протягом року.

Використання технології стеження за сонцем дозволяє позбутись обмежень на генерації енергії протягом дня, і це дозволяє зменшити втрати від не виловленого сонячного випромінювання панелями та знизити залежність від обмежень в розмірах території за рахунок зменшення площі поля при ті й же ефективності.

За своєю конструкцією сонячний трекер представляє з себе конструкцію подібну до статичних з тим же самим фотомодулем, але з тою різницею що в ній нусуча конструкція, яка тримає фотомодуль поділяється на дві частини: рухому (вісь) та нерухому (опорна конструкція), яка тримає вісь та фотомодуль. В трекерах з'являються нові елементи: система позиціонування для керування віссю, що складається з актуаторів, приводів з двигунами та пристроїв навігації, які виконують оцінку географічного положення СЕС та оцінює кліматичні умови навколишнього середовища.

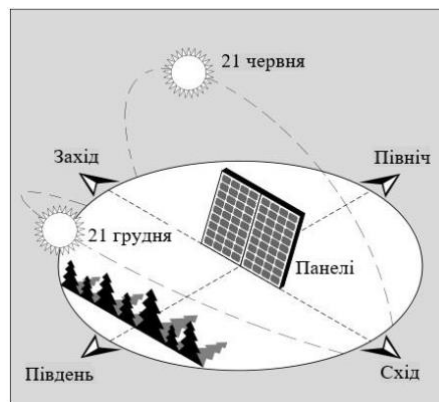


Рис. 2.1. Ілюстрація руху Сонця в літній та зимній періоди.

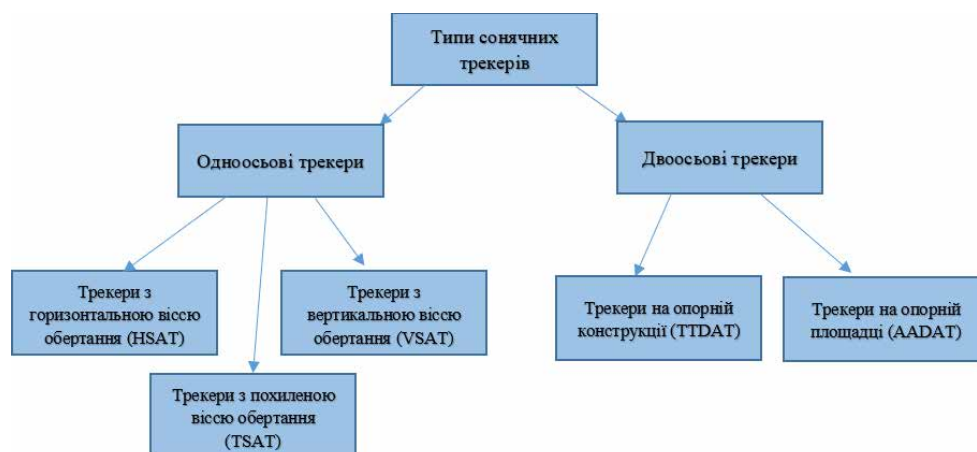


Рис. 2.2. Класифікація сонячних трекерів

Класифікація трекерів:

Трекери класифікуються за кількістю та траєкторією руху поворотної вісі:

Одноосьові трекери (Single axis trackers – SAT)

Найбільш поширений та збалансований варіант конструкції, з необмеженою варіативністю координатних напрямів та легкою інтеграцією всіх доступних видів автоматики стеження за сонцем. Даний тип трекерів набув поширення завдяки суттєвому приросту генерації енергії 15 – 20% при відносно невеликих капіталовкладеннях та при тій же самій площі ділянки, що й для статичних систем.

В одноосьових трекерах присутня вісь на якій панель може змінювати своє проложення вздовж цієї осі в напрямку Сонця протягом дня від сходу до заходу.

Існує декілька видів конструктивного виконання сонячних трекерів. Вони включають в собі: трекери з горизонтальною віссю обертання – Horizontal single axis tracker (HSAT); трекери з вертикальною віссю обертання – Vertical single axis tracker (VSAT); трекер з похиленою віссю обертання – Tilted single axis tracker (TSAT);

– Трекери типу HSAT: трекери такого типу отримали найбільше поширення через схожість конструкції столів із фіксованими панелями завдяки своїй простоті конструкції та стійкості до вітрових навантажень. Панелі в трекерах цього типу встановлюються на вісь, що встановлена відносно поверхні горизонтально та орієнтована на напрямок «Північ – Південь» або «Схід – Захід».

Трекер приводиться в рух двигуном, який розміщується в центрі вісі та обертає весь стіл панелей по всій довжині орієнтуючи її в напрямку сонячних променів. [17]

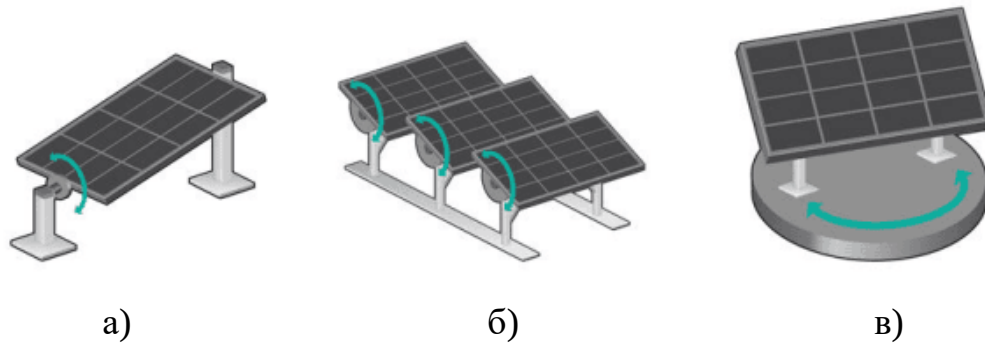


Рис.2.3. Сонячні трекери типу: а) TSAT; б) HSAT, в) VSAT.

– Трекери типу VSAT: трекери з вертикальною орієнтацією рухають вісь по азимуту від сходу на захід слідуючи за сонцем. Такі трекери актуальні для високих широт де час руху Сонця найдовше всього (10-15 годин в літній період). Для подібних конструкцій необхідно враховувати, що через вертикальне розміщення панелі може бути затінення сусідніх рядів і для уникнення втрат необхідно розраховувати розміщення столів, а також для них необхідно мати стабільну та міцну конструкцію для стійкості до вітрових навантажень.

– Трекери типу TSAT: трекери даного типу результат розробок для балансу між горизонтальним та вертикальним трекерами. У цих трекерів конструкція зроблена таким чином, що вісь змонтована на двох опорах, які розміщені зі зміщенням по висоті, що надає конструкції нахил за зенітом та можливість відстеження рухомою віссю Сонця за азимутом. Така конструкція дозволяє щільно розмістити панелі при цьому досягаючи продуктивності на рівні двоосьових трекерів.

Двоосьові трекери (Dual axis trackers – DAT):

Найрезультативіший тип систем стеження за сонцем, який використовує рух по двох напрямках дозволяючи максимально точно позиціонувати панель в напрямку Сонця з точністю до 1 градуса. Це дозволяє системі протягом всього року збільшуючи приріст генерації електроенергії в 35-45%. [16]

Поширення набули два основних типи двоосьових трекерів:

Двоосьовий трекер на несучій опорі Tip-tilt dual axis tracker (TTDAT) та Двоосьовий трекер на опорній платформі Azimuth-altitude dual axis tracker (AADAT). В обох типах конструкція трекера має дві незалежні вісі, які регулюють положення стола з панелями по горизонталі та вертикалі, але основна відмінність цих типів у способі кріплення. Тип TTDAT має опору на яку встановлюють двигуни (або комбінацію двигунів з актуаторами), та самі панелі тоді як в трекерах типу AADAT сама конструкція являється основною віссю з поворотним механізмом у вигляді кільця, що обертає масив панелей по горизонталі та комплектується актуаторами або двигунами для регулювання по вертикалі. [2]



Рис. 2.4. Трекер типу TTDAT



Рис. 2.5. Конструкція трекера типу AADAT

2.2 Конструкція та принцип роботи механізмів відстеження положення Сонця.

Основне завдання сонячного трекера – можливість відстеження Сонця прототягом всього дня. Цього досягти можливо встановленням рухомого елемента, який приводиться в рух вручну або автоматизованими приводами.

Про ручне управління трекером: така система набула поширення в приватних домогосподарствах з невеликою кількістю панелей, де СЕС мають мінімум рухомих елементів і їх положення регулюють ручною працею. Точність цього способу доволі низька, оскільки регулювання відбувається переважно «на око» і підходить лише для сезонного орієнтування з ціллю підвищити денний виробіток електроенергії та вимагає присутності оператора для орієнтування.

У загальному вигляді до нас дійшов трекер який окрім фотоелектричних панелей та конструкції яка їх утримує, має в собі автоматизовану систему моніторингу положення Сонця і датчиками погодніх умов, та виконавчий механізм у вигляді привода, який регулює поточне положення панелей.

Склад сонячного трекера в зборі:

- Фотоелектричні модулі (ФЕМ);
- Несуча конструкція з фундаментом, та поворотного механізму в якому задають рух по горизонталі, вертикалі або їх комбінацію;
- Система навігації до яких входять різноманітні датчики: оптичні, термоелектричні, метеостації (опціонально);
- Пристрої позиціонування: двигуни та актуатори.
- Контролери системи управління з системою керування та інтерфейсу;
- Система віддаленого доступу через мережу Інтернет для моніторингу та контролю роботи сонячного трекера

В реальних умовах рідко можна побачити зазначені елементи в повній комплектації, оскільки їх наявність залежить від типу трекера, умов застосування і це просто ускладнює загалом конструкцію. Тому з ціллю економічної доцільності роблять робочу систему надійною та легкою.

Єдина річ у конструкції трекерів, якою не варто нехтувати – це стійкість конструкції та кріплень ФЕМ до вітрових навантажень, оскільки зі збільшенням розміру масиву ФЕМ зростає ймовірність виникнення ефекту парусності. Тому в конструкції не тільки має витримувати вагу всіх елементів трекера, а бути стійкою до поривів вітру.

Розглянемо механізми приведення в рух трекера:

Основних типи, які поширені в більшості типах трекерів класифікуються за способом позиціонування:

1) Активні системи – це повністю автоматизовані установки до яких входять поворотні електродвигуни поєднані з редукторами (черв'ячними, планетарними або циліндричними) та лінійними актуаторами. Даний тип пристроїв набув поширення завдяки своїй високій точності позиціонування, можливості роботи на постійному та змінному струмі та просту інтеграцію з системами керування (див. рисунок 2.6).

Електроприводи трекерів, які працюють на змінному струмі мають можливість отримувати живлення від панелей, тобто жити саму себе що робить ці системи автономними в порівнянні з установками на змінному струмі, яким потрібно зовнішнє джерело для їх роботи.

Опорно-поворотні та крокові двигуни – це компактний закритий механізм, що складається з черв'ячної передачі та опорно-поворотного пристрою. Основною перевагою таких приводів є здатність витримувати високі осьові та радіальні навантаження при відносно невеликих габаритах, високою точністю

позиціонування, відносною простотою керування та можливістю інтеграції з автоматизованими системами управління.



Рис. 2.6. Зображення опорно-поворотного приводу на базі електродвигуна з черв'ячним приводом

Лінійний актуатор – це електромеханічний пристрій у вигляді телескопічної труби або профіля з направляючою, яка приводиться в рух двигуном постійного струму і під дією обертального руху двигуна направляюча змінює своє положення. Один з найпоширеніших варіантів керування трекером завдяки високій точності ходу та простотою монтажу, але для надійності потрібно забезпечити механізм направляючої від потряплення вологи та пилу.

2) Пасивні системи – системи для руху трекера, які працюють за рахунок теплового розширення робочих тіл або зміщення центру мас під дією сонячного нагріву. Хоча такі системи мають низьку вартість та просту конструкцію, їх точність і ефективність суттєво поступаються активним трекерам, що обмежує сферу їх застосування.

Методи позиціонування сонячних трекерів:

Основний принцип роботи сонячного трекера заснований на основі постійного порівняння даних про положення Сонця знятих за допомогою навігаційних пристроїв та фотодатчиків, які передають інформацію на пристрій контролю трекера для формування сигналу, що передається до поворотних механізмів та актуаторів.

Принцип роботи системи позиціонування показано на рисунку 2.7

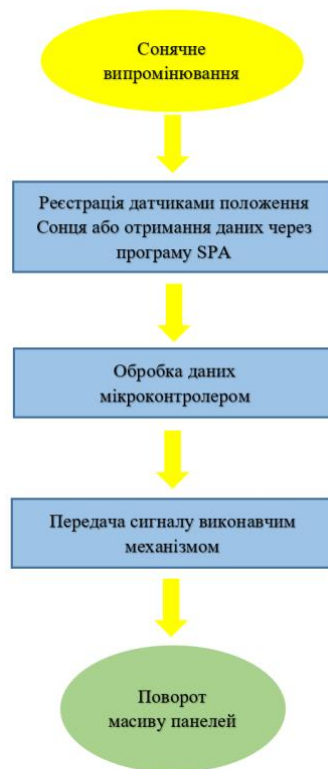


Рис. 2.7. Алгоритм роботи трекера.

Для керування трекером застосовують три основні методи:

1) Трекер на фотодатчиках:

Принцип роботи пов'язаний на встановленні на масив з сонячними панелями фотодатчиків, які визначають напрямок максимальної освітленості та орієнтує панелі перпендикулярно сонцю. Самий поширений варіант системи стеження за сонцем який має застосування в приватних домогосподарствах, рідше в СЕС промислових масштабів через свою простоту та дешевизну.

Конструкція фотодатчика містить в собі чотири фотоелементи, які розташовані під кутом 45° на рівні площини панелей та під кутом 90° відносно інших датчиків, самі датчики розділені між собою непрозорою перегородкою.

У нормальному режимі датчики повністю освітлені сонячним випромінюванням, якщо панелі перпендикулярні сонцю, напруга в цих датчиків однакова. Але при зміні положення Сонця фотодатчики починають затінюватися,

відповідно в них стає різною напруга. Пристрій фіксує це, та порівнює результати замірів, і передає керуючий сигнал на контролер, який починає позиціонувати конструкцію до тих пір, поки в датчиках напруга не матиме однакові значення.

Основна проблема такого типу позиціонування: працездатність фотодатчиків падає при похмурій погоді та при забрудненості пилом датчика. Від чого в такого способу низька точність, але це компенсується доступністю та простотою. [13]

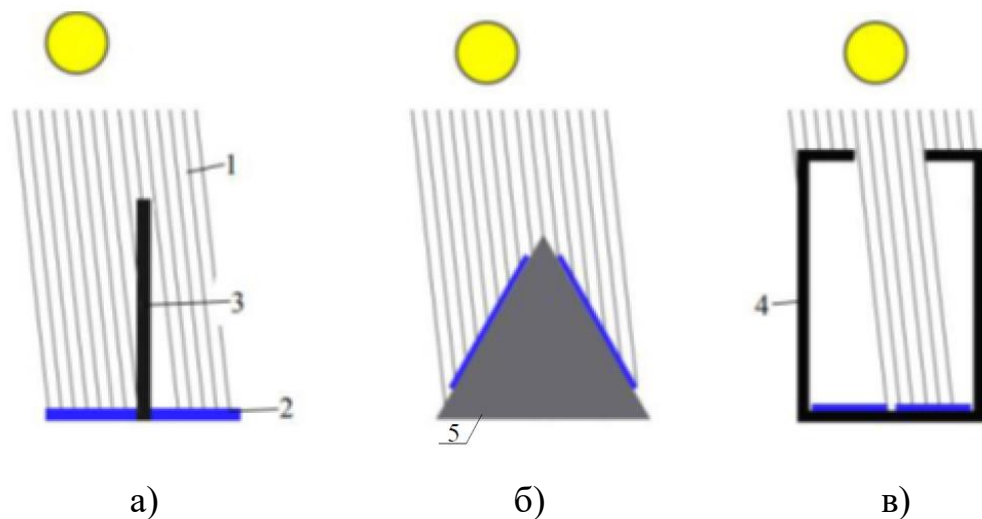


Рис. 2.8. Зображення основних типів фотодатчиків: а – з затінювальною перегородкою; б – пірамідна основа; в – коліматорна трубка

1 – сонячне випромінювання; 2 – фотоелемент датчика; 3 – затінювальна перегородка; 4 – коліматорна трубка; 5 – основа у вигляді піраміди.

2) Трекер на основі Алгоритму сонячної позиції (SPA):

Пристрої такого типу працюють на основі передавання даних про географічне розташування, дату та часу для пошуку оптимального розміщення Зенітного та Азимутальних кутів та відстеження переміщення Сонця.

Для роботи використовується астрономічний таймер, який відстежує добове та річне переміщення Сонця і керує двигунами для позиціонування

панелей. Цей метод не вимагає встановлення додаткових пристроїв для відстеження Сонця та не має проблем з відстеженням в похмуру погоду, натомість тут перед запуском станції пристрій програмується, задається добова (або річна) траєкторія відстеження положення Сонця.

З мінусів такого методу можна виділити те, що пристрій має непостійну точність через можливі відхилення у розрахунковій траєкторії руху Сонця. Оскільки для роботи пристрій попередньо програмується, трекер весь час працює на основі цієї програми накопичуючи похибку, тому збій в точності вкрай легко пропустити, якщо програму не перевіряти.

3) Трекер на основі програми комп'ютера з контролером:

Найбільш ефективний варіант керування трекером, який поєднує в собі можливості двох вище наведених методів. Цей контролер являє собою мікроконтролер з спеціальним ПЗ, в якого закладено алгоритм відстеження який за своїм принципом роботи схожий на алгоритм сонячної позиції (SPA).

Отримуючи дані про значення азимутального та зенітних кутів через часові інтервали, програма опрацьовує та передає керуючий сигнал на виконавчі механізми для переміщення панелей. Але на відміну від методу з астрономічним таймером, де дані попередньо задаються в програмованому контролері у даній системі ці дані постійно перераховуються та коригуються.

Дані пристрої універсальні у своєму використанні, оскільки можуть підключатися до пристроїв стеження (фотодатчики, датчики вітру, температури) або підключитись до системи моніторингу, яка під'єднана до мережі Інтернет. Це дозволяє отримувати дані про положення Сонця та метеодані уникаючи встановлення додаткових датчиків.

Ця система є повністю автономною та забезпечує можливість дистанційно моніторити дані про роботу СЕС та віддалено нею керувати. У масштабних системах одним таким контролером можна керувати великою кількістю панелей.

2.3 Порівняльний аналіз використання трекерів на генерування електроенергії

На основі розглянутих конструкцій та принципів роботи трекерних систем може скластися висновок, що двовісні сонячні трекери є ефективнішими за одноосьові, оскільки забезпечують вищий приріст генерації електроенергії. У середньому приріст генерації електроенергії порівняно зі стаціонарними системами досягає значень 30 – 40 %, а в окремих кліматичних умовах може бути ще вищим. Для одноосьових трекерів цей показник зазвичай перебуває в межах 15–25 %.

Проте оцінка ефективності трекерних систем не може ґрунтуватися виключно на показниках приросту виробітку електроенергії.

Основна перевага двовісних систем в тому, що вони дозволяють максимально точно позиціонування панелей перпендикулярно сонцю практично в будь-який період часу. Двовісні системи в цьому плані дійсно краще проте виникають проблеми пов'язані з ускладненням конструкції панелей та вищими вимогами до використання простору.

Трекер типу DAT для роботи повинен мати дві незалежні вісі, більшу кількість датчиків, складнішого програмного забезпечення та більш міцної конструкції, тобто витрати на виготовлення одного такого трекера зростають майже вдвічі. Все це впливає на витрати на спорудження СЕС такого типу та на технічне обслуговування через високий ступінь ризику зношування рухомих деталей, що знижує надійність системи.

Не менш важливим є питання використання земельної ділянки. В переважній більшості двовісні трекери це індивідуальні автономні конструкції зі своїм масивом панелей. Через великі розміри масивів зростає висота фундаментів та площа конструкцій. Відповідно для уникнення взаємного затінення сусідніх

панелей під час зміни положення, відстань між панелями збільшується. Це призводить до зменшення щільності розміщення ФЕМ на одиницю площі.

Незважаючи на менший приріст генерації, одноосьові трекери (SAT) характеризуються нижчим енергоспоживанням приводів, простішим обслуговуванням та меншою вартістю виробництва. Одноосьові трекери мають доволі просту конструкцію, яка дозволяє на одній вісі розмістити до 100 панелей і ця вісь може керуватись одним приводом.

Саме тому вони набули найбільшого поширення у великих промислових сонячних електростанціях.

Для порівняння проведемо аналіз доцільності застосування обох типів трекерів за допомогою онлайн-сервісу PVGIS.

Онлайн-сервіс [PVGIS](#) призначений для оцінювання потенціалу сонячної енергетики та моделювання роботи фотоелектричних систем див. рис 2.13.

Розглядатиметься локація з проектуємим об'єктом за координатами 48.799,30.256 для якого необхідно виконати встановлення СЕС.

Результати порівняння трекерних систем наведено в таблиці 2.1.

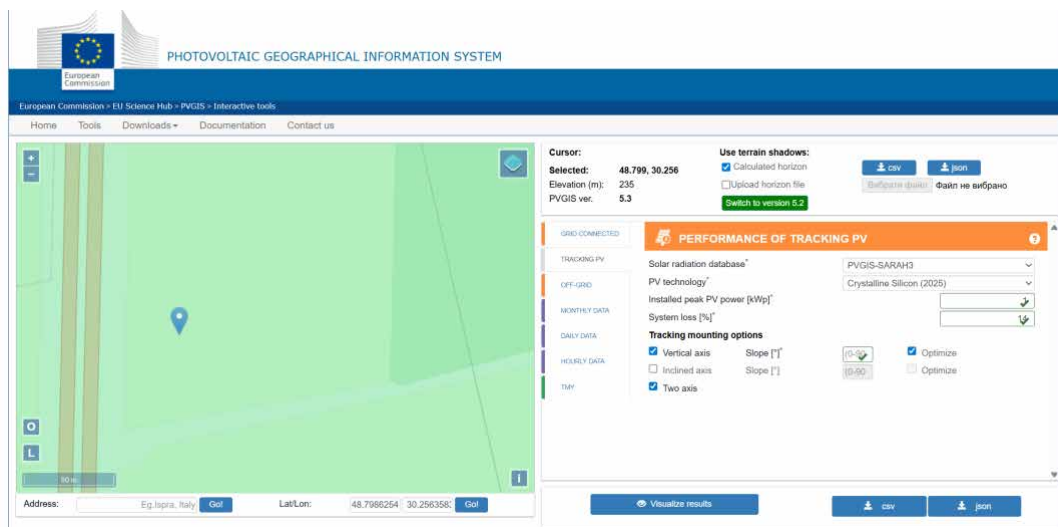


Рис. 2.9. Інтерфейс онлайн сервісу PVGIS з обраними параметрами системи.

Таблиця 2.1

Продуктивність трекерних систем

Місяць	Одновісний			Двовісний		
	E_m	H(i)_m	SD_m	E_m	H(i)_m	SD_m
Січень	41,1	46,5	10,2	41,7	47,1	10,9
Лютий	66,6	75,7	17,2	67,2	76,4	18,1
Березень	117,3	137,5	27,2	118,5	139,0	27,9
Квітень	155,2	187,7	28,5	158,1	191,2	28,9
Травень	187,6	231,4	25,7	193,0	238,4	26,3
Червень	200,6	250,4	14,4	207,6	259,6	14,7
Липень	207,3	259,3	13,7	213,7	267,7	14,1
Серпень	199,6	249,9	20,0	203,7	255,3	20,4
Вересень	155,1	188,4	29,6	157,5	191,4	30,3
Жовтень	113,5	134,2	22,1	115,7	136,8	23,1
Листопад	49,1	56,5	9,1	50,0	57,5	9,8
Грудень	37,2	42,3	11,0	38,2	43,4	11,9

де:

E_m – середньомісячний виробіток електроенергії, кВт·год;

$H(i)_m$ – середньомісячне сонячне випромінювання на площину модулів, кВт·год/м²

SD_m – стандартне відхилення значень генерації,

З таблиці 2.1 видно, що двовісна система забезпечує високий рівень генерації електроенергії в літню пору, особливо у місяці довгих сонячних днів, де сонячна активність максимальна в червні та липні.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що одноосьові трекери при значно простішій конструкції та нижчій вартості системи в порівнянні з двовісними системами забезпечують задовільний рівень приросту генерації.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено дослідження трекерних систем,

Було вивчено основні типи трекерів для збільшення генерації електроенергії, їх конструктивні особливості, склад та варіанти застосування,

У результаті порівняння двовісних та одновісних трекерів, було визначено перевагу одновісних трекерів як оптимальний варіант застосування на території України та найбільш раціональний з техніко-економічної точки зору,

Тому в подальших розділах магістерської роботи саме цей тип трекерів буде розглядатися як основа для проектування електропостачання об'єкта.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СЕС ДЛЯ ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Характеристика об'єкта для проектування системи.

У цьому розділі магістерської роботи передбачається проектування сонячної електростанції для створення енергонезалежного об'єкта. Основною метою проєкту є підвищення ефективності використання електроенергії, зменшення залежності від централізованої електромережі та забезпечення стабільного енергопостачання у разі виникнення аварійних ситуацій або дефіциту потужності в зовнішній мережі.

В якості об'єкта проектування в даній роботі розглядається сервісний центр для обслуговування сільськогосподарської техніки ТОВ «РДО Україна» необхідно запроектувати СЕС з застосуванням одноосьових трекерів.

Сервісний центр має існуючу систему електропостачання для живлення основної будівлі та допоміжних приміщень. Заживлення виконується через ввідно-розподільчий щит, що встановлений всередині будівлі, яка підключена до існуючої трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ з силовим трансформатором 250 кВА та забезпечена резервним джерелом живлення у вигляді генератора.

Основними вихідними даними на даний об'єкт є схема електропостачання з таблицею навантажень об'єкта в зимній період. На основі цих даних можна оцінити характер споживання та виявити найбільших споживачів електроенергії для розрахунку майбутньої СЕС. Навантаження сервісного центру в зимовий період наведено на таблиці №3.1.

Для даного об'єкта характерна наявність достатньо великої кількості технологічного обладнання, систем вентиляції, кондиціонування освітлювальних установок. Найбільша частина обладнання працює в денний період часу, що збігається з часом роботи СЕС.

Таблиця 3.1

Перелік основних споживачів в зимній період

№	Найменування споживача	Р _у ,кВт	К _п	Р _р ,кВт	cosφ	Sp,кВА
	Загалом ВРП сервісного центру	331,86	0,55	183,4	0,79	233,6
1	Комп. розетки робочих місць	24,05	0,7	16,8	0,85	19,8
2	Технологічне обл. кухні	11,5	0,5	5,8	0,95	6,1
3	Технологічне обл. пральні	11,9	0,5	6,0	0,85	7,0
4	Рукосушарки, фени	11,2	0,3	3,4	0,75	4,5
5	Бойлери	2,7	0,5	1,4	0,98	1,4
6	Побутові розетки, прибирання	23,5	0,1	2,4	0,85	2,8
7	Освітлення	14,0	0,9	12,6	0,85	14,8
8	Освітлення території, фасаду	3,3	1	3,3	0,85	3,9
9	Вентиляція	15,92	0,6	9,5	0,75	12,7
10	Теплова завіса	13,5	0,6	8,1	0,95	8,5
11	Ел. воронки	0,1	1	0,1	0,98	0,1
12	Кондиціонування	23,5	0,6	14,1	0,75	18,8
13	Котельня	10,1	0,7	7,1	0,75	9,4
14	Технологічне обладнання	137,3	0,54	74,1	0,75	98,9
15	Розетки склада	6,0	0,5	3,0	0,75	4,0
16	Ворота	8,14	0,6	4,9	0,65	7,5
17	Мийка	5,3	0,6	3,2	0,75	4,2
18	Протипожежна сигналізація та автоматика	3,0	1	3,0	0,85	3,5
19	Слабкострумні системи	6,8	0,7	4,8	0,85	5,6
20	Евакуаційне освітлення «вихід»	0,044	1	0,0	0,85	0,1

Крім основних споживачів, на об'єкті наявні споживачі, які потребують безперебійного електропостачання: пожежна сигналізація; аварійне освітлення; слабкострумні мережі та системи автоматики будівлі. Також для об'єкта характерна робота споживачів у нічних час: освітлення території та фасадів; Вентиляція; Опалення; побутові розетки для чергового персоналу.

На основі цих даних можна зробити висновок, що для функціонування обладнання критично важливих споживачів вночі, необхідно додатково впровадити системи накопичення згенерованої вдень енергії.

Таблиця 3.2

Перелік критично важливих споживачів вночі

№	Найменування споживача	Р _у ,кВт
	Споживання вночі	22,3
1	Побутові розетки, прибирання	3
2	Освітлення	2,5
3	Освітлення території, фасаду	1,3
4	Вентиляція	2,5
5	Котельня	7
6	Ворота	1
7	Протипожежна сигналізація та автоматика	3
8	Слабкострумні системи	2
9	Евакуаційне освітлення «вихід»	0,044

Враховуючи характер навантажень об'єкта та необхідність для даного об'єкта резервного електропостачання, доцільним є впровадження гібридної СЕС із одноосьовими трекерами та встановлення системи накопичення енергії.

Використання такого типу системи дозволить підвищити рівень енергонезалежності об'єкта та зменшити споживання електроенергії з зовнішньої мережі.

3.2 Кліматичні умови об'єкта проектування

Об'єкт розташований за координатами 48,799° північної широти та 30,256° східної довготи поблизу м.Умань, Черкаської області.

Клімат регіону відноситься до Центральної кліматичної зони та лісостепової підзони. Клімат Умані – помірно-континентальний, вологий, з м'якою зимою, частими відлигами та помірно теплим літом. Середньорічна температура повітря становить 8,3°C.

Найхолодніший місяць – січень зі середньою температурою -4,5°C, а найтепліший – липень з середньою температурою +19,2°C.

Середня кількість опадів за рік – 550-600 мм, з максимальними опадами влітку, зокрема у липні, та мінімальними у березні. Абсолютний мінімум температури досягав -35°C, а абсолютний максимум +38°C. Середня річна температура становить 7,5°C.

Глибина промерзання ґрунту в районі Умані становить 0,9 м.

Сніговий покрив утворюється щороку, але як правило, не тримається довго через часті відлиги. Найчастіше вітри в районі Умані дмуть із заходу та північного заходу. У січні середня швидкість вітру становить 3,8 м/с, а в липні знижується до 2,5 м /с.

Найменша хмарність у районі розташування об'єкта спостерігається у літній період, коли переважають ясні та малохмарні дні. Найбільш сприятливими місяцями для роботи ФЕМ є червень, липень та серпень місяці.

Середньорічна сонячна інсоляція регіону коливається в межах 1150-1250 кВт/м². Найбільші значення спостерігаються в період з травня по серпень місяць, коли світловий день максимальний забезпечується найвищий показник генерації енергії фотоелектричними модулями.

Карта сонячної інсоляції показана на рис.3.1

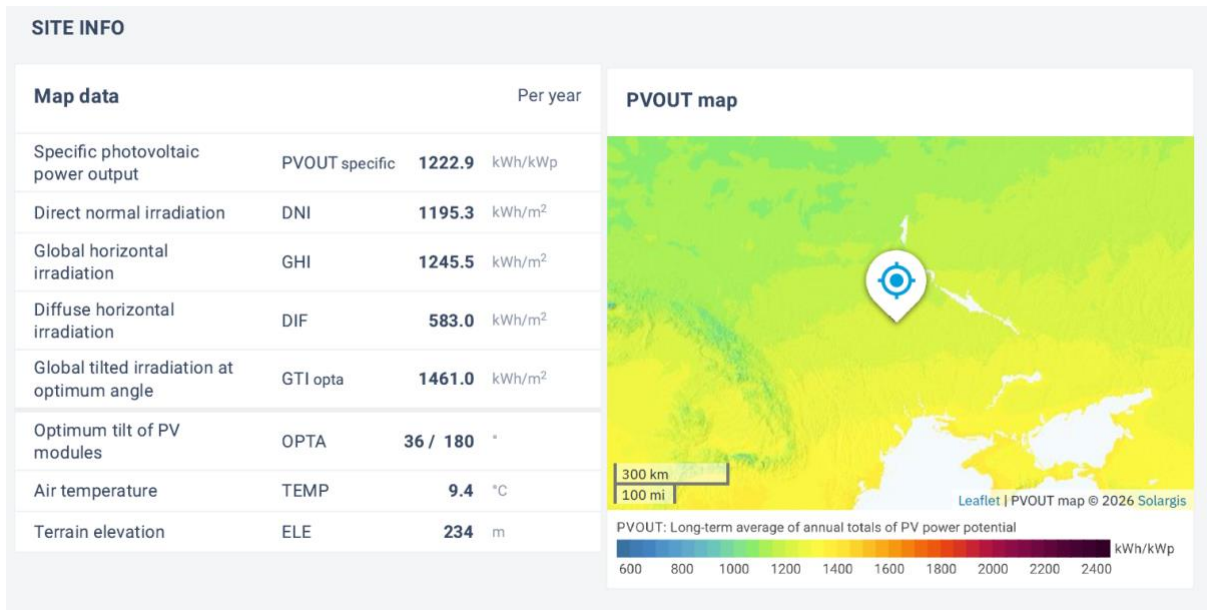


Рис. 3.1. Карта сонячної інсоляції в районі м.Умань

У літній період тривалість світлового дня в районі м.Умань досягає 15-16 годин, тоді як в зимовий період тривалість знижується до 8-9 годин на добу. Це призводить до нерівномірної генерації ФЕМ електроенергії зі зміною сезону.

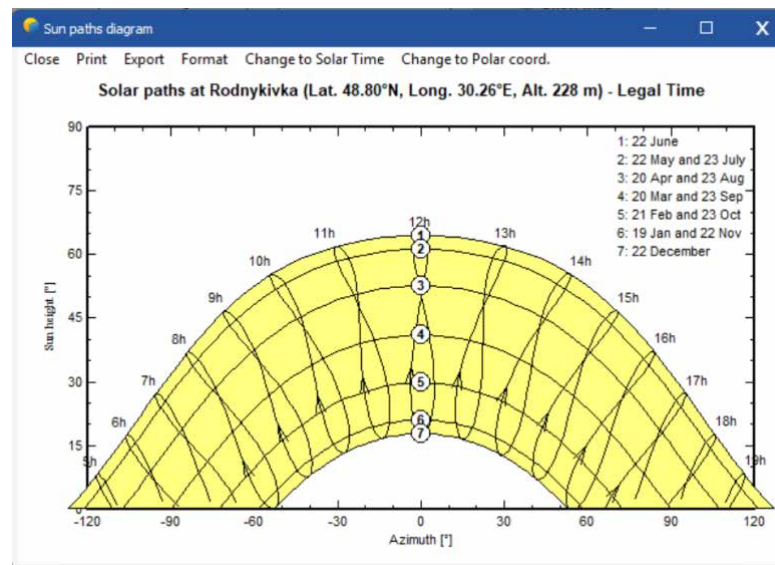


Рис. 3.2. Діаграма руху Сонця протягом року в районі м.Умань

Територія об'єкта характеризується відкритою місцевістю з достатньою площею для встановлення сонячної електростанції з використанням одноосьових трекерів та мінімальною кількістю прилеглих до ділянки споруд або дерев. Такі умови дають можливість розмістити ряди ФЕМ з оптимальними відстанями між ними для уникнення затінення панелей.

Розташування СЕС передбачається в безпосередній близькості до будівлі основного споживача в якого є існуюча внутрішня мережа. Таке розміщення дозволяє максимально ефективно споживати вироблену електроенергію мінімізуючи втрати на передачу енергії кабельними лініями та дає можливість підприємству самому обслуговувати СЕС навченим персоналом.

Зображення об'єкта проектування наведено на рис. 3.3



Рис. 3.3. Об'єкт проектування на Google Maps.

Враховуючи вище наведені факти можна зробити висновок, що за географічним розташуванням та кліматичними умовами об'єкт підходить для розміщення сонячної електростанції з одноосьовими трекерами.

3.3 Розрахунок та вибір трекерної системи

На основі проведеного дослідження типів трекерних систем, наведеного в 2 розділі магістерської роботи для проектованої сонячної електростанції було вибрано одноосьову трекерну систему.

Враховуючи специфіку руху Сонця зі сходу на захід протягом року, для проектованої СЕС доцільне використання горизонтально-осьових трекерів HSAT з орієнтацією поворотної осі вздовж напрямку Північ-Південь. Це дозволить фотомодулям відстежувати рух Сонця протягом дня з максимальною амплітудою повороту зі Сходу на Захід без затінення конструкцій та генерувати максимальну кількість електроенергії.

Проте для проектування СЕС з одноосьовими трекерами для об'єкта необхідно використати ділянку для встановлення секцій трекерів враховуючи рельєф проектуємої ділянки. В статичних системах з фіксованими панелями, де панелі встановлюються на металевий каркас по 20-40 панелей складають в одну секцію і ці секції панелей формують ряд панелей який підлаштовується під рельєф поверхні. В одноосьових трекерах конструкція являє собою суцільний довгий вал на якому розміщується ряд панелей без значних відхилень по висоті.

Конструктивно одноосьові трекери типу HSAT складаються металевої опорної конструкції, поворотного валу, системи кріплення фотомодулів, виконавчого механізму у вигляді двигуна та системи автоматичної системи керування з контролерами та датчиками.

Основним елементом конструкції являється горизонтальна вісь на яку розміщуються по всій довжині трекара фотомодулі, тому для сонячних трекерів поворотна вісь виконується із сталевого квадратного профіля або труби для стійкості до навантаження ваги системи та поривів вітру. Вісь трекера в більшості випадків орієнтується в напрямку Північ-Південь для можливості повороту панелей зі Сходу на Захід відстежуючи добове преміщення Сонця.

Модель одновісного сонячного трекера показана на рис. 3.4

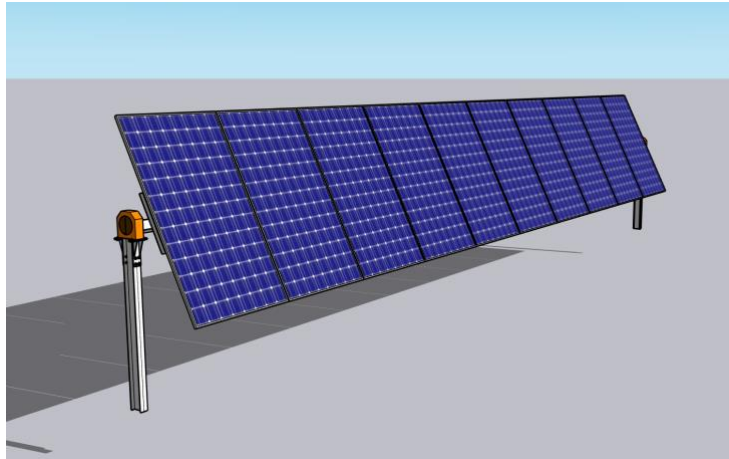


Рис. 3.4. 3-D Модель одноосьового трекера типу HSAT в програмі SketchUP.

Поворот конструкції в даного типу трекера здійснюється за допомогою поворотного двигуна який реалізований на основі двигуна-редуктора. Керування двигуном та положення вісі бере на себе контролер, який виконує розрахунок на оптимального кута нахилу панелей.

В якості прикладу для розробки повноцінної робочої системи розглянемо будову трекерної системи HSAT HORIZON STR-111 від української компанії SOLARsk. [10]

Конструкція HSAT HORIZON STR-11, являє собою однорядну систему розміщення фотомодулів, які закріплюються на спільній горизонтальній поворотній осі. Для закріплення вісі з фотомодулями їх встановлюють на опору з металевих профілів та труб, які мають достатню міцність.

Позиціонування конструкції на весь ряд системи до 56 шт панелей потужністю до 650 Вт виконує один поворотний двигун, який має достатній крутний момент для обертання всієї конструкції трекера, додатково для плавності обертання осі та рівномірного розподілу навантаження на металеві опори

встановлюються самозмащувальні підшипники, які обертаються разом поворотним двигуном.

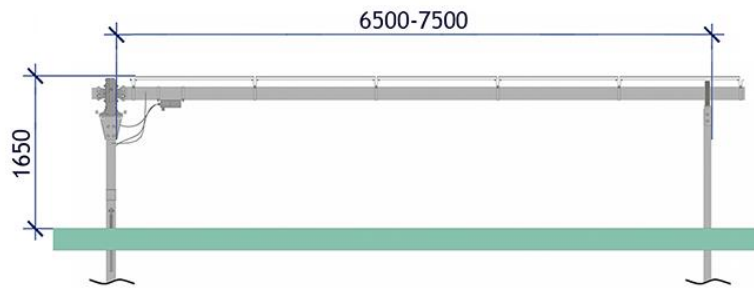


Рис. 3.5. Конструкція одноосьового трекера HSAT HORIZON STR-11

Для нашого об'єкта враховуючи доступну для встановлення ширину ділянки 56м, не потрібно настільки довгі ряди трекерів як продемонстровано в аналогу. Тому для власної трекерної системи передбачається трекер довжиною 54 м, який складається з чотирьох поворотних секцій по 10 панелей потужністю 610 Вт на кожную секцію.

Попередньо для забезпечення об'єкта потужністю 183,4 кВт на ділянку розміром 58×56 м передбачається поле з 8 рядів трекерів роташовані на відстані 6м для уникнення взаємозатінення. Потужність проектованої СЕС складе 195кВт.

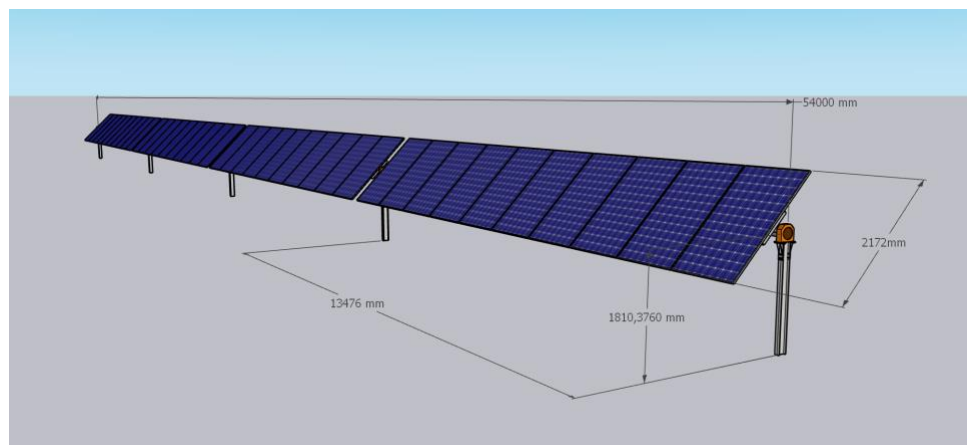


Рис. 3.6. 3-D Модель одноосьового трекера на 40 модулів.

3.4 Вибір та технічне обґрунтування основного обладнання СЕС

Для роботи сонячної електростанції системою стеження необхідно укомплектувати ряди панелей основним обладнанням. Підбір основних комплектуючих виконуватиметься на основі потужності об'єкта та особливостей роботи одноосьових трекерів.

Для реалізації сонячної електростанції потужністю 195 кВт до складу СЕС входять такі компоненти:

- 1) Фотоелектричні модулі;
- 2) Одноосьові трекерні системи;
- 3) Поворотні приводи трекерів;
- 4) Система автоматичного керування трекерами;
- 5) Гібридні інвертори;
- 6) Система накопичення електричної енергії;
- 7) Комутаційне та захисне обладнання;
- 8) Кабельна продукція та система електричних з'єднань;
- 9) Система моніторингу та диспетчеризації.

Основною метою вибору обладнання є забезпечення максимальної ефективності генерації електроенергії, підвищення рівня енергонезалежності об'єкта та забезпечення надійної роботи системи в умовах нестабільності зовнішньої електромережі.

3.4.1 Вибір фотоелектричних панелей

Для перетворення сонячної енергії в електричну енергію постійного струму проектом передбачено встановлення монокристалічних фотоелектричних модулів (ФЕМ) типу Trina Solar TSM-NE19R-610W (Vertex), виробництва "Trina Solar", потужністю 610 Вт. [27]

Дані модулі виготовлені за технологією з використанням монокристалічного кремнію. Цей тип фотомодулів позиціонується на ринку, як збалансоване рішення між вартістю та продуктивністю виробітку електроенергії. ККД вибраної панелі складає 22,6 %, що відносить цей тип панелей до класу високоефективних і використання таких панелей дозволяє підвищити генерацію електроенергії з одиниці площі та зменшити потребу у виділенні більшої площі.

ФЕМ встановлюються на конструкції для кріплення сонячних панелей на руромій осі трекара.

Фотоелектричні модулі типу Trina Solar TSM-NE19R-610W (Vertex) з'єднуються в стрінги. ФЕМ в стрінгу обрана з умови досягнення максимальної ефективності фотоелектричного поля. Загальні технічні характеристики ФЕМ наведені в таблиці 3.3



Рис. 3.7. Сонячна панель TSM-NE19R-610W

Таблиця 3.3

Загальні технічні характеристики Trina Solar TSM-NE19R-610W (Vertex)

№ п/п	Параметр	Одиниця вимірювання	Величини	
			STC	NOCT
1	Електричні параметри			
2	Максимальна (пікова) потужність ФЕМ	P _{max} , (Вт)	610	472
3	Позитивне відхилення потужності	P _{max} , (Вт)	0~+5	
4	Максимальна робоча напруга	U _{mpp} , (В)	40,8	38,6
5	Максимальний робочий струм	I _{mpp} , (В)	14,96	12,12
6	Ефективність фотоелектричного модуля STC	%	22,6	
7	Максимальна напруга збірки	В	1500	
8	Температурний коефіцієнт потужності	%/°C	-0,29	
9	Температурний коефіцієнт напруги	%/°C	-0,24	
10	Температурний коефіцієнт струму	%/°C	0,04	
11	Діапазон робочих температур	°C	-40 °C +85°C	
12	Номінальна робоча температура комірки (NOCT)	°C	43 ± 2	
13	Габаритні розміри	мм	2382x1134x30	
14	Маса	кг	28,8	

Вибір кількості та потужності ФЕМ, виконується на основі електричних навантажень об'єкта. Згідно цих вихідних даних, активна потужність об'єкта в зимовий період складає 183,4 кВт.

Тому для компенсації денного енергоспоживання та забезпечення резерву енергії приймаємо до встановлення 8 рядів трекерів по 40 панелей в кожному ряду. Загальна потужність фотоелектричного поля з розміщенням 320 шт панелей потужністю 610 Вт складає 195,2 кВт.

3.4.2 Вибір приводів для позиціонування трекера

Для повороту конструкцій з фотоелементами на трекері необхідно встановити поворотний двигун з достатнім крутним моментом для обертання всієї конструкції трекера та забезпечити стійкість до вітрових навантажень.

Перед початком розрахунку визначимося з типом приводу. Оскільки трекер в нас одноосьовий, необхідно вибрати привід який буде обертати вісь по горизонталі на $\pm 60^\circ$ та мати достатній крутний момент для переміщення панелей. Для проекту обираємо вертикальний одноосьовий поворотний привід VN7.

Привід VN7 оснащений електродвигуном постійного струму з робочою напругою 24 В, що задає рушійну силу редуктору черв'ячного типу з високим передаточним числом 60:1, що дає пристрою високу точність яка не перевищує $0,2^\circ$ та плавність поворотів. Використання в приводі черв'ячного редуктора при невеликій потужності електродвигуна дозволяє отримати значний крутний момент, а також забезпечується функція самогальмування при відсутності живлення для уникнення люфту осі з панелями при вітровому тиску.



Рис. 3.8. Вертикальний одноосьовий поворотний привід VN7

Для визначення необхідного крутного моменту для вибору двигуна необхідно визначити вагу всіх конструкцій, які будуть позиціонуватись приводом.

Загальна маса конструкцій:

$$M_{\text{конст}} = M_1 + M_2 \quad (3.1)$$

де:

M_1 – вага сонячних панелей, кг;

M_2 – вага поворотної осі кг.

Для поворотної осі приймаємо до встановлення сталеву профільну трубу 100x100x3 мм вагою 9 кг на м.п, довжиною 54 м та профільну трубу 25x25x3 в кількості 44 шт по 250 мм кожна вагою 1,95 на м.п. Загальна вага металевих конструкцій 507,45 кг.

Вага однієї сонячної панелі, яка необхідна нам для визначення маси конструкції становить 28,8 кг. Всього панелей що розміщуються на осі – 40 шт.

Тоді маємо:

$$M_{\text{конст}} = (28,8 \times 40) + 507,45 \approx 1660 \text{ кг}$$

Далі необхідно розрахувати мінімальний крутний момент який повинен розвивати привод:

$$F = M_{\text{конст}} \times g \quad (3.2)$$

де:

F – крутний момент, Н;

m – маса конструкції, кг;

g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с².

Тоді значення крутного моменту складе:

$$F = 1660 \times 9.81 \approx 16284 \text{ Н}$$

Далі розрахуємо статичний момент навантаження конструкції, для розрахунку якого потрібно врахувати відстань від поворотної осі до центра мас

конструкції. Для спрощеного розрахунку приймаємо середнє плече прикладання сили, тобто середину панелей $r = 1,1$:

Маємо:

$$M = F \cdot r = 16284 \times 1.1 \approx 17912 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Отримане значення статичного моменту є теоретичним та визначене без врахування балансування конструкції відносно поворотної осі. У реальній трекерній системі центр мас фотоелектричних модулів наближений до осі обертання, що суттєво зменшує навантаження на привід. Тому привід VN7 з номінальним крутним моментом 6300 Н·м є достатнім для надійного позиціонування ряду фотоелектричних модулів.

У разі виникнення несприятливих погодних умов або сильних поривів вітру надходить сигнал від анемометра про перевищення критичної швидкості вітру, система керування може автоматично переводити трекер у нейтральне положення, при якому зменшується парусність конструкції та механічне навантаження на опори й привід.

Таблиця 3.4

Основні технічні характеристики привода VN7

№	Показник	Значення
1	Номінальний крутний момент	6300 Н·м
2	Утримуючий момент	45 кН·м
3	Передаточне число	60:1
4	Максимальний кут повороту	$\pm 60^\circ$
5	Точність позиціонування	$\leq 0,2^\circ$
6	Ступінь захисту	IP65
7	Робоча температура	-30...+70 °C
8	Напруга двигуна	24 В
9	Номінальний струм	6,5 А

3.4.3 Вибір алгоритму керування трекерною системою

Одним із основних елементів проекрованої СЕС з трекерами, являється блок керування, який керує положенням сонячних модулів та аналізує параметри положення Сонця протягом днів та місяців.

Для розробки алгоритму керування трекерами в нашому проекті, розглянемо встановлення блоку керування CST1000W від українського виробника GreenChip, який буде вираховувати положення Сонця та керувати приводами для змінення положення рядів.

Даний блок працює на основі програмованого алгоритму відстеження Сонця. Отримуючи дані про значення азимутального та зенітних кутів через часові інтервали, програма опрацьовує та передає керуючий сигнал на виконавчі механізми для переміщення панелей. [14]

Даний контролер має в собі такий функціонал:

- керування поворотними приводами;
- розрахунок положення Сонця;
- автоматичне позиціонування конструкції;
- роботу за астрономічним алгоритмом;
- інтеграцію з датчиками швидкості вітру;
- можливість дистанційного керування та налаштування.

Система блоку керування CST1000W складається з контролера позиціонування додатково комплектується анемометром для контролю швидкості вітру.

Для проекрованої СЕС передбачено встановлення восьми блоків керування CST 1000W відповідно до кількості рядів трекерів.

Алгоритм роботи системи позиціонування показано на рисунку 3.

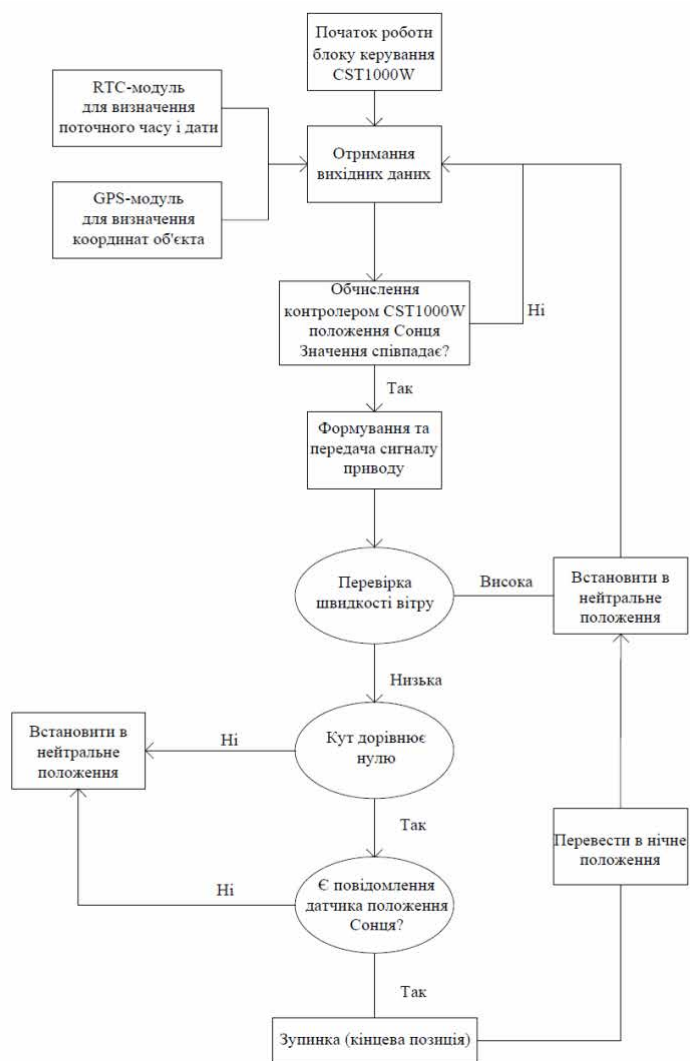


Рис. 3.9. Алгоритм керування трекером



Рис. 3.10. Блок керування трекерами CST1000W

3.4.4 Вибір інверторів

Для перетворення електроенергії постійного струму, яку виробляють фотоелектричні панелі, у змінний струм промислової частоти 50 Гц для живлення споживачів та роботи з мережею.

В проектуванні СЕС передбачена установка трифазних високовольтних гібридних інверторів постійного струму в змінний, виробництва «Deye» моделі SUN-50KSG01HP3(400V). **[Error! Reference source not found.]**

Гібридний інвертор – це електронний пристрій, який комбінує функції звичайного мережевого інвертора для сонячних панелей з іншими функціями, такими як зарядка акумулятора та підтримка роботи в автономному режимі за відсутності мережі.

Основні технічні характеристики інвертора наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Технічні характеристики інвертора

№ п/п	Параметр	Одиниця вимірювання	Величини
1	Ефективність	%	97
2	Макс.вхідна напруга пост.струму	U _{maxdc} PV, (В)	1000
3	Макс. вхідна потужність пост.струму	P _{maxdc} PV, (Вт)	65000
4	Діапазон робочої напруги MPPT, В	U _{mppt} , (В)	150-850
5	Кількість входів постійного струму	п	8
6	Кількість MPPT контролерів	п	4
7	Номинальний вихідний змінний струм	А	75,8
8	Габаритні розміри, Д х В х Г	мм	527x894x294



Рис. 3.11 Інвертор Deye SUN-50KSG01HP3

Для забезпечення максимальної ефективності перетворення електроенергії інвертори обладнані чотирма незалежними MPPT-трекерами. Використання MPPT-контролерів дозволяє підтримувати робочу точку фотоелектричних модулів у режимі максимальної потужності залежно від рівня сонячної інсоляції, температури модулів та інших зовнішніх факторів.

У нашій системі необхідно визначити оптимальну кількість інверторів та виконати розподіл фотоелектричних модулів між MPPT-входами інверторів.

Згідно розділу 3.4.1, встановлена потужність проектного поля фотомодулів становить 195,2 кВт. Враховуючи таку потужність системи, приймаємо до встановлення вибраний інвертор у кількості 4 шт. Така кількість інверторів дозволяє рівномірно розподілити навантаження між ними та суттєво збільшити строк служби системи без перевантажень інверторів.

Вибране інверторне обладнання працює у трифазній мережі 380 В та підтримує паралельну роботу декількох інверторів із синхронізацією режимів роботи. Один інвертор може виконувати функцію головного «master», а інші

працюють у підлеглому режимі «slave», що дозволяє реалізувати централізоване керування генерацією та системою накопичення енергії.

Для рівномірного розподілу потужності до інверторів, фотоелектричні панелі необхідно розділити по групах до кожного інвертора сформувавши так звані стрінги.

Стрінг – це з'єднання групи фотомодулів між собою для формування електричних параметрів напруги та струму на вході інверторів. Формування стрінгів дозволяє регулювати значення напруги та струму узгоджуючи їх з параметрами MPPT-трекерів інвертора забезпечуючи ефективне передавання електроенергії.

Послідовне з'єднання панелей передбачає приєднання позитивних виводів панелей до негативних наступних панелей. При такому з'єднанні напруги фотомодулів сумуються між собою, а струм в стрінгу залишається незмінним.

При паралельному з'єднанні панелі позитивні та негативні виводи підключаються до виводу наступної панелі лише між собою. Таким чином при збільшенні кількості приєднань збільшиться вже струм панелей, а значення напруги залишиться сталою.

Дані типи з'єднання можна комбінувати між собою для можливості регулювання значення струму та напруги в залежності від конфігурації та можливостей інвертора.

В нашій системі панелі 320 шт розподіляються між чотирма інверторами по 80 панелей на кожен інвертор. Для формування стрінгів приймаємо послідовне з'єднання 20 панелей потужністю 610 Вт. Загальна потужність стрінга складає 12,2 кВт. Схема підключення стрінгів до інвертора наведено в Додатку А.

Максимальна робоча напруга при такій конфігурації складе:

$$U = n \times U_{\text{панелі}} = 20 \times 40,8 = 816 \text{ В} \quad (3.3)$$

де:

n – кількість панелей;

$U_{\text{панелі}}$ – робоча напруга однієї панелі

Отримане значення не перевищує допустимий діапазон MPPT та максимальну вхідну напругу інвертора, що забезпечує безпечну та стабільну роботу системи.

В результаті маємо систему в якій на кожен інвертор приєднується 4 стрінга по 20 панелей у кожному. Загалом система має 16 стрінгів на всю СЕС.

Підключення сонячних панелей до інверторів виконується кабелем для сонячних панелей марки PV1-F 1x4 мм².

Схему електропостачання інверторним обладнанням наведено в Додатку Б.

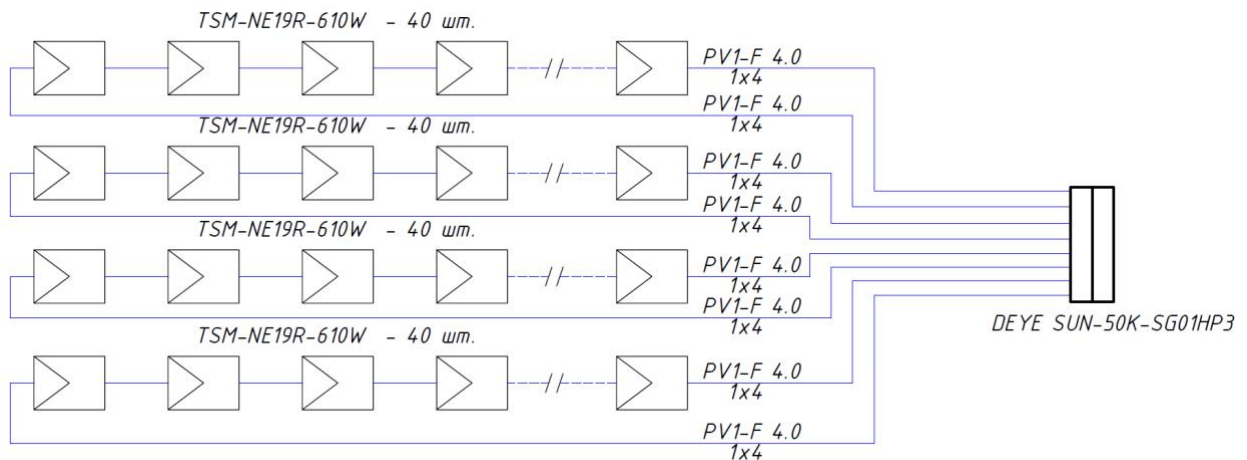


Рис.3.12 Підключення сонячних панелей

3.4.5 Обґрунтування доцільності встановлення АКБ.

Збезпечення постійного та безперебійного електропостачання об'єкта, є одною із актуальних задач на сьогоднішній день. Сонячні електростанції нездатні працювати постійно на максимум, оскільки робота станції протягом дня може бути нерівномірною через постійну зміну погодніх умов таких, як хмарність чи опади компенсувати вплив, яких не здатні навіть трекерні системи. Також суттєво впливає на роботу СЕС повна відсутність генерації в нічний період.

Для даного об'єкта впровадження системи накопичення енергії дозволить жити категорію особливих споживачів в аварійні режими забезпечуючи об'єкт електроенергією без потреби подачі електроенергії від зовнішньої мережі, а також згладжувати пікові навантаження, компенсуючи нестачу потужності СЕС.

На основі аналізу системи електропостачання сервісного центру в розділі 3.1 було визначено, що в об'єкта є споживачі, які потребують безперебійного електропостачання: пожежна сигналізація; аварійне освітлення; слабкострумні мережі та системи автоматики будівлі та є споживачі та необхідність в роботі обладнання які працюють вночі.

Для забезпечення максимально ефективного використання сонячної електроенергії, передбачено встановлення АКБ (акумуляторних блоків) Deye BOSGM5.1 LiFePO4 на стійці для високовольтних інверторів. Акумуляторна батарея Deye BOS-GM5.1 LiFePO4 – це передовий енергетичний резерв, розроблений спеціально для високовольтних інверторів. **[Error! Reference source not found.]**

Ця батарея поєднує в собі високу потужність, довгий термін служби та безпекові характеристики, що робить її ідеальним вибором для систем енергозабезпечення, які вимагають надійного та стабільного джерела енергії.

Основні особливості та характеристики:

1) Технологія LiFePO₄: Акумулятор використовує технологію літій-фосфату заліза (LiFePO₄), що відома своєю високою ефективністю, довгим терміном служби та високою стійкістю до циклічного розряду та заряду. Ця технологія забезпечує стійку продуктивність протягом багатьох років.

2) Матеріал анода: LFP.

3) Номінальна напруга системи (В): 51.2.

4) Ємність акумуляторного модуля (А·г): 100.

5) Енергія модуля (кВт·год): 5.12.

6) Ступінь захисту корпусу: IP20.

7) Велика ємність: 5.1 кВт·год.



Рис. 3.13 Система накопичення енергії BOS-GM5.1 LiFePO₄

В нашому проекті система накопичення енергії складається з чотирьох стійок типу Deue BOS-GM5.1, кожна з яких містить 10 акумуляторних модулів. Ємність одного модуля становить 5,12 кВт·год, тому загальна встановлена ємність системи накопичення визначається:

$$E_{\text{АКБ}} = N_{\text{акб}} \times P_{\text{акб}} = 40 \times 5,12 = 204,8 \text{ кВт.} \quad (3.4)$$

де:

Накб – кількість акумуляторів;

Ракб – потужність одного акумулятора.

Враховуючи допустиму глибину розряду для довговічності даних акумуляторів, що складає 90% від ємності АКБ. Реальна ємність системи накопичення складе 184 кВт.

При середньому нічному навантаженні 22,3 кВт орієнтовний час автономної роботи системи накопичення складає:

$$t = \frac{E_{\text{АКБ}} \times DOD}{P_{\text{спож}}} \quad (3.5)$$

де:

$E_{\text{АКБ}}$ – кількість акумуляторів;

DOD – допустима глибина розряду акумулятора (90%)

$P_{\text{спож}}$ – споживання електроенергії об'єктом вночі.

Маємо:

$$t = 204,8 \times 0,9 / 22,3 = 8,25 \text{ годин.}$$

Враховуючи такі показники автономності системи можна зробити висновок, що система підходить для тимчасового живлення критичних споживачів та роботи обладнання будівлі в нічний період часу використовуючи накопичені надлишки генеровної енергії СЕС. Проте така кількість не підходить для повної автономії об'єкта протягом всієї ночі, наприклад з 19:00 до 06:00 години, оскільки така система потребує більшої кількості накопичувачів, що призведе до збільшення вартості системи, а в умовах сервісного центру це недоцільне рішення.

Тому в даному проекті системи накопичення розглядаються лише, як резервне джерело живлення для критичних споживачів під час довготривалих відключень та елемент балансу під час пікових навантажень працюючи в парі з інвертором. Гібридний інвертор Deye SUN-50KSG01HP3 сумісний з системою накопичення та може одночасно працювати з АКБ, використовуючи накопичену

енергію для компенсації нестачі генерації СЕС, наприклад взимку через низьку інсоляцію та тривалість сонячного дня для живлення навантаження об'єкта.

3.5 Розміщення обладнання СЕС

Проектована сонячна електростанція конструктивно складається з двох основних функціональних частин: фотоелектричного поля з одноосьовими трекерними системами та окремого контейнерного модуля, у якому розміщується основне електротехнічне обладнання системи.

До складу фотоелектричного поля входять вісім рядів одноосьових трекерів типу HSAT, на яких встановлюються фотоелектричні модулі Trina Solar TSM-NE19R-610W. Кожен ряд містить 40 фотомодулів, що дозволяє сформувати фотоелектричне поле загальною потужністю 195,2 кВт. Розміщення трекерів виконано з урахуванням мінімізації взаємного затінення між рядами, забезпечення вільного переміщення конструкцій при повороті та можливості технічного обслуговування обладнання.



Рис. 3.14 Генеральний план СЕС.

Орієнтація трекерних рядів прийнята у напрямку Північ–Південь, що дозволяє забезпечити максимальну ефективність добового відстеження положення Сонця зі сходу на захід. Відстань між рядами виставлено з урахуванням кута нахилу фотомодулів у крайніх положеннях трекера та необхідності уникнення затінення у зимовий період при низькому положенні Сонця над горизонтом.

Підключення фотомодулів між собою виконується кабелем PV1-F 1x4 мм² з захищеною від ультрафіолетового випромінювання ізоляцією та стійких до температурних перепадів.

Для з'єднання фотоелектричного поля з інверторами передбачається прокладання кабелю в захищених трубах або металевих лотках з достатнім запасом механічної міцності.

Для розміщення силового електротехнічного обладнання передбачено використання окремого металевого контейнера типу 20 ft, який виконує функцію енергетичного модуля сонячної електростанції.

- У контейнері розміщуються:
- Гібридні інвертори;
- Системи зберігання енергії;
- BMS-контролери акумуляторних батарей;
- щити постійного та змінного струму з захисним комутаційним обладнанням;
- Блок живлення з перетворювачем з AC/DC 220/24 В.
- Розподільчий щит для з'єднання інверторного обладнання з навантаженням.

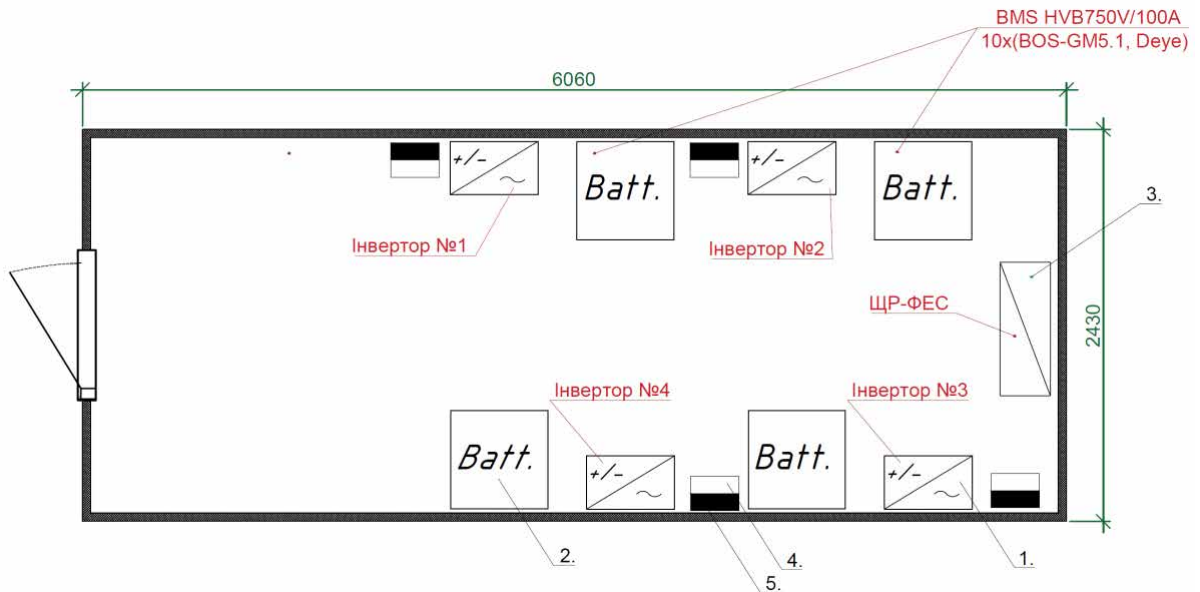


Рис. 3.15 Контейнер з інверторним обладнанням.

1 – Інвертор; 2 – Система накопичення; 3 – розподільчий щит;

4 – щит захисту АС; 5 – щит захисту DC.

Встановлення запроектованого обладнання в захищеному контейнері дозволяє централізовано розмістити в одному місці та безросередньо до фотоелектричної станції. Металевий контейнер забезпечує механічний захист обладнання від впливу опадів, запилення та можливого захисту від несанкціонованого доступу до дороговартісного обладнання.

Обладнання у контейнері повинно розташовуватись на оптимальній відстані, щоб уникнути взаємного нагріву обладнання від перегріву та виділити достатньо місця для обслуговування кожного окремого обладнання.

Додатково в контейнері розміщується блок живлення з перетворювачем з АС/DC 220/24 В, для забезпечення централізованого живлення контролерів CST1000W та приводів для позиціонування трекерів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи було виконано проектування сонячної електростанції для об'єкта електропостачання сервісного центру.

Проаналізовано існуючу схему електропостачання об'єкта та досліджено потенціал розташування об'єкта для проектування СЕС.

Розроблено майданчик фотоелектричних модулів потужністю 195,2 кВт на базі фотомодулів Trina Solar TSM-NE19R-610W та одноосьових трекерних систем горизонтального типу.

Виконано розрахунок параметрів трекерної системи, вибір приводу позиціонування VH7 та алгоритму автоматичного керування на базі контролера CST1000W.

Запропоновано використання системи накопичення енергії на базі LiFePO₄ акумуляторів загальною ємністю 204,8 кВт·год для балансування системи електропостачання в умовах низкого рівня генерації та резервного живлення критичних споживачів.

Розроблено структурну схему розміщення обладнання СЕС із використанням окремого контейнерного модуля для інверторного обладнання, систем накопичення енергії та захисної автоматики.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

4.1. Аналіз вихідних даних дослідження сонячної електростанції з трекерною системою.

Для оцінки ефективності запроєктованої в даній магістерській роботі сонячної електростанції потрібно визначити доцільність використання трекерної системи. Для цього в даному розділі виконаємо комп'ютерне моделювання роботи СЕС в програмі PVsyst. [25]

Програмний комплекс PVsyst – це спеціалізоване програмне середовище для проектування та аналізу роботи фотоелектричних систем. В цій програмі є функціональний набір для розрахунків генерації електроенергії урахуванням метеорологічних даних, орієнтації фотомодулів, затінення та інших факторів.

Для виконання моделювання роботи проекрованої сонячної електростанції використовується остання версія програмного комплексу PVsyst 8.0 [26]

Після запуску програмного середовища відкривається головне вікно PVsyst, представлене на рис. 4.1.

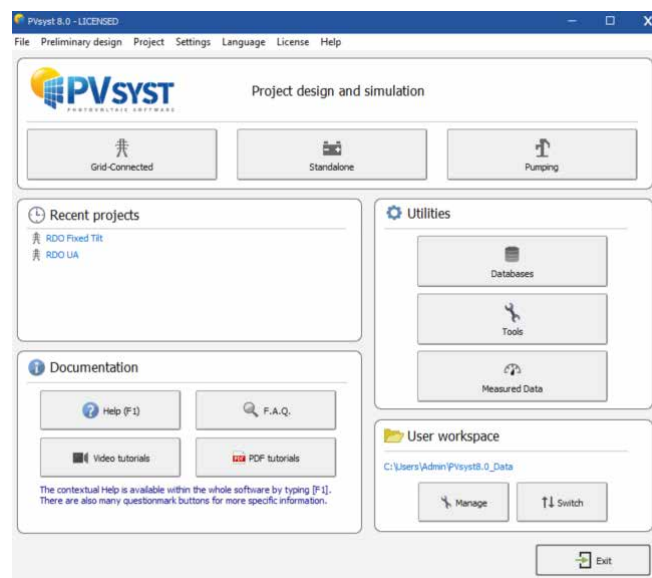


Рис. 4.1 Головне вікно програмного комплексу PVsyst 8.0.

На головному екрані програми доступні три основні режими роботи:

- 1) *Grid-Connected* – проектування мережевих сонячних електростанцій;
- 2) *Standalone* – автономні фотоелектричні системи;
- 3) *Pumping* – системи живлення насосного обладнання.

Останні два варіанти в нашій роботі не розглядаються, оскільки в роботі розглядається мережева сонячна електростанція з гібридними інверторами, тому обираємо для роботи режим *Grid-Connected*.

Після створення нового проєкту відкривається вікно налаштування основних параметрів сонячної електростанції. На цьому етапі формується базова конфігурація проєкту, яка буде використовуватись для подальшого моделювання як статичної системи, так і системи з трекерами. Для забезпечення об'єктивності результатів дослідження тип обладнання та його кількість у цих двох моделях залишаються незмінними.

1) Вибір метеорологічних умов:

Для початку створення робочої моделі СЕС потрібно заповнити метеорологічні дані об'єкта. Для цього в меню проєкта натискаємо вкладку *Weather database*.

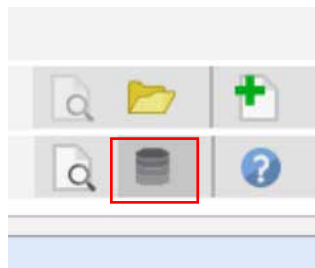


Рис. 4.2 Вкладка *Weather database*

Далі натискаємо *Geographical Sites* і у новому вікні заповнюємо географічні параметри в для даного сайту див рис 4.3. Достатньо ввести координати або вибрати на інтерактивній карті розташування об'єкта.

За допомогою цієї програми можна отримати метеорологічні дані об'єкта на основі бази даних Meteonorm, яка інтегрована у програмне середовище PVsyst.

Дана база містить багаторічні кліматичні спостереження та дозволяє отримати дані, які будуть використовуватись в подальших розрахунках:

- середньомісячні значення сонячної інсоляції;
- температуру навколишнього середовища;
- параметри атмосферних умов;
- тривалість сонячного випромінювання протягом дня.

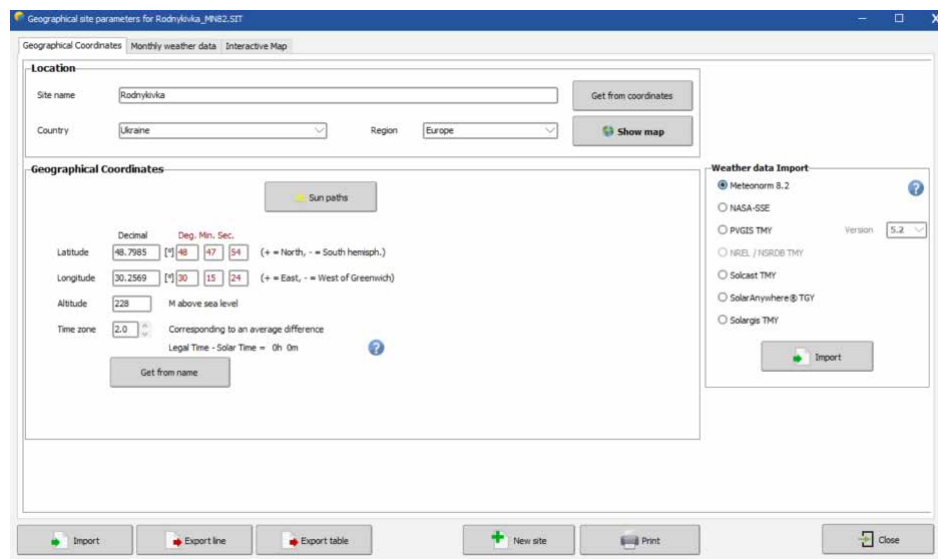


Рис. 4.3 Вкладка *Geographical Sites* з заповненими даними

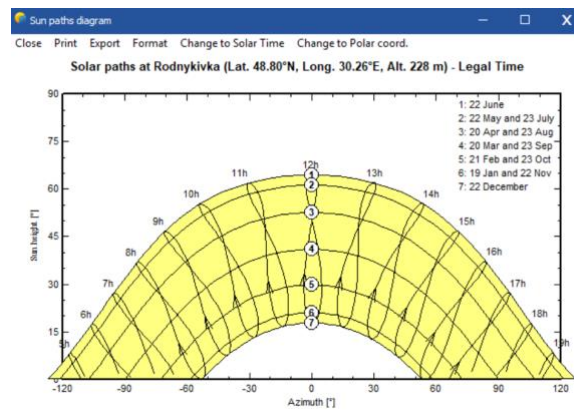


Рис. 4.4 Діаграма руху Сонця на ділянці проектування протягом року.

Наступним етапом є введення параметрів основного обладнання сонячної електростанції. [24]

У вкладці *System* необхідно виконати вибір фотоелектричних модулів та інверторного обладнання із внутрішньої бібліотеки PVsyst.

Згідно з розділу даної роботи, для нашої системи було визначено основне обладнання СЕС:

- 1) ФЕМ Trina Solar TSM-NE19R-610W потужністю 610 Вт;
- 2) Гібридний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт.

В меню параметрів системи додаємо вибране обладнання рис. 4.5

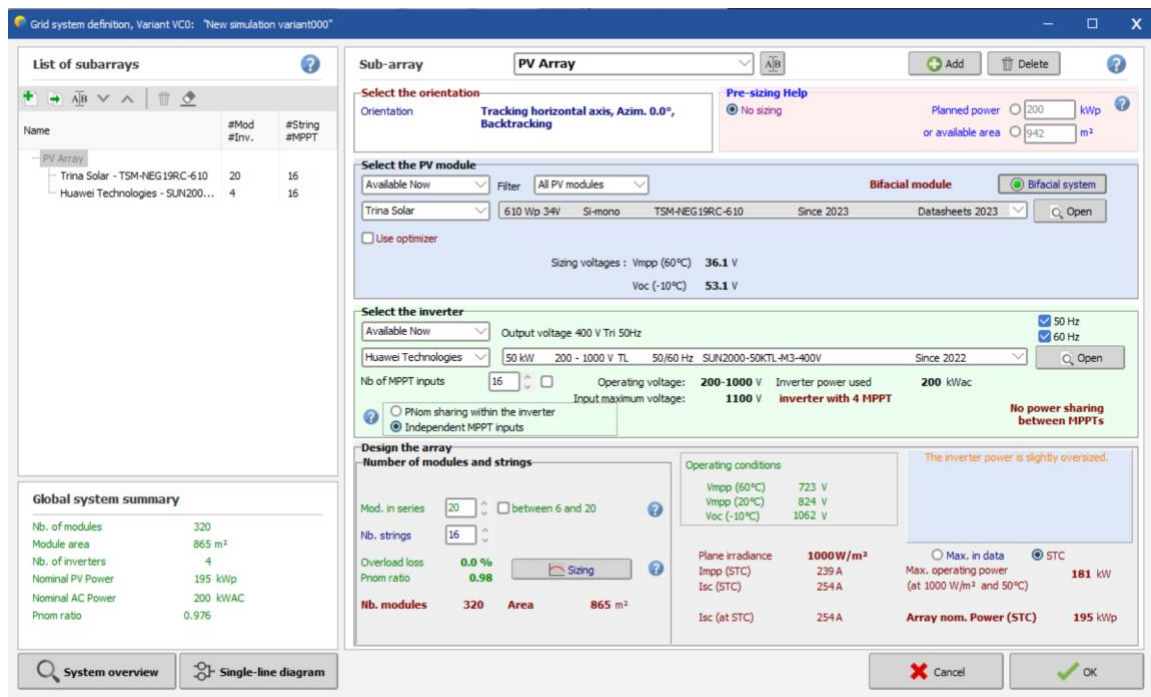


Рис. 4.5 Меню вибору ФЕМ та інверторного обладнання

На даному етапі в меню важливими лише є три блоки: фотоелектричні модулі; інвертори та конфігурації стрингів.

Примітка стосовно інверторів: у бібліотеці PVsyst відсутній вибраний для проекту інвертор марки Deye на потужність 50 кВт, тому використовуємо для розрахунку інвертор від Huawei з аналогічними характеристиками.

У нашому проекті загальна кількість фотомодулів становить 320 шт., які об'єднані у 16 стрінгів по 20 фотомодулів у кожному. Для перетворення електроенергії використовується чотири гібридні інвертори по 50 кВт кожний.

Вводимо ці дані і на цьому робота у розділі *System* закінчується.

Після введення даних програма PVsyst автоматично перевіряє сумісність вибраного обладнання та схеми з'єднань за:

- робочою напругою;
- максимальним струмом;
- діапазоном MPPT;

Також перед початком моделювання роботи сонячної електростанції у вкладці *Detailed losses* необхідно задати основні параметри втрат у системі для наближення результатів розрахунку до реальних умов експлуатації. У програмі враховуються електричні, температурні та експлуатаційні втрати, які виникають під час роботи фотоелектричної установки.

Для даної моделі прийнято такі значення втрат:

- втрати у кабельних лініях (*Ohmic losses*) – 1,5 %;
- втрати внаслідок забруднення поверхні фотомодулів (*Soiling loss*) – 3 %;
- температурні втрати фотомодулів – 0,7 %;
- втрати від невідповідності параметрів фотомодулів та LID-деградації (*Mismatch losses ma Light Induced Degradation*) – 2 %.

4.2 Розрахунок генерування електроенергії з фіксованими панелями

Для розрахунку ефективності використання трекерних систем потрібно виконати базовий розрахунок роботи СЕС на фіксованих панелях для можливості їх порівняння.

Тому після створення проекту в програмі PVsyst та його налаштування процес якого показаний в попередньому розділі, виконаємо налаштування орієнтації фотоелектричних модулів.

В меню проекту відкриваємо розділ *Orientation* та змінюємо тип орієнтації фотомодулів з режиму трекера на режим фіксованої площини *Fixed Tilt Plane* (Важливо: при зміні типу орієнтації в налаштуваннях, необхідно видалити панелі в 3D-режимі оскільки вони між собою зв'язані і інші типи орієнтацій будуть недоступні).

В цій вкладці потрібно задати значення азимуту та кут нахилу панелей.

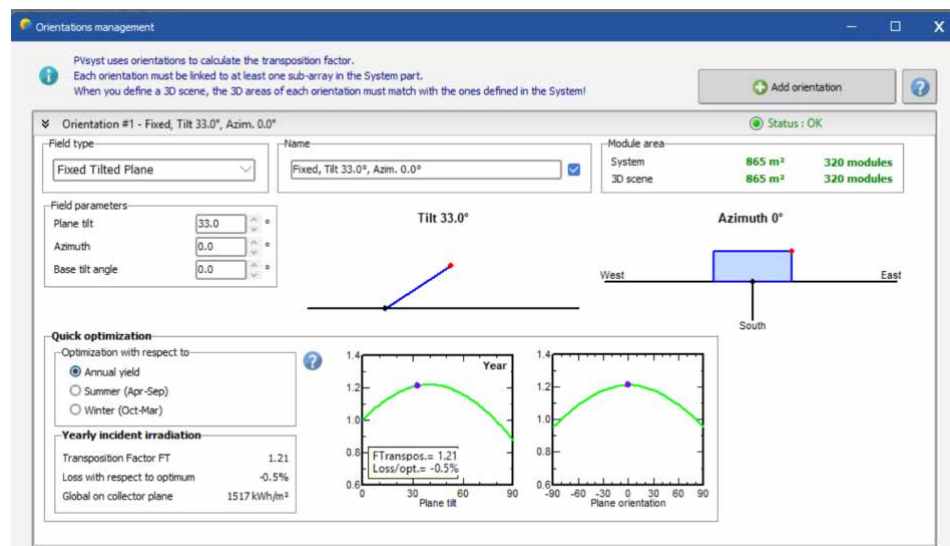


Рис. 4.6 Меню налаштування орієнтації панелей

Для умов центральної частини України оптимальним приймається кут нахилу наземної конструкції фотомодулів 35° , що дозволяє досягти компромісу між літньою та зимовою генерацією електроенергії. Азимут встановлюється

рівним 0° , що відповідає орієнтації фотомодулів точно на Південь та забезпечує максимальне надходження сонячної інсоляції протягом доби.

Після введення параметрів, зробимо модель сонячної електростанції в 3D-режимі програми PVsyst.

За допомогою 3D-моделі в програмі можна виконати прорахунок оптимального розташування панелей для мінімізації затінення сусідніх, відстані між рядами панелей та дає можливість оцінити розташування сонячних панелей на специфічних поверхнях таких як дахи будівель. [26]

Для побудови моделі використовуємо вкладку Near Shadings, далі натискаємо Construction / Perspective. У даному режимі виконується просторове розміщення всього поля фотоелектричних модулів.

Для побудови моделі СЕС в налаштуваннях 3D-моделі необхідно задати такі параметри:

- Габаритні розміри панелей;
- Кількість панелей в ряду;
- Кут нахилу фотомодулів;
- Кількість рядів панелей.

Габаритні розміри панелі програма підтягує самостійно, оскільки їх вже вибрано у вкладці System, також це стосується кута нахилу панелей, яку програма встановлює автоматично на основі вибраного нами раніше параметру.

Тому відповідно до параметрів проекту встановлюємо в одному ряду 40 шт панелей у портретній орієнтації. Панелі розташовуються на стаціонарних металевих платформах з фіксованим кутом 33° та орієнтовані на Південь.

Після формування одного ряду панелей за допомогою інструмента копіювання-вставити або задаємо параметр в налаштуваннях розташовуємо 8 рядів. Для зменшення затінення панелей відстань між рядами приймаємо 5 м.

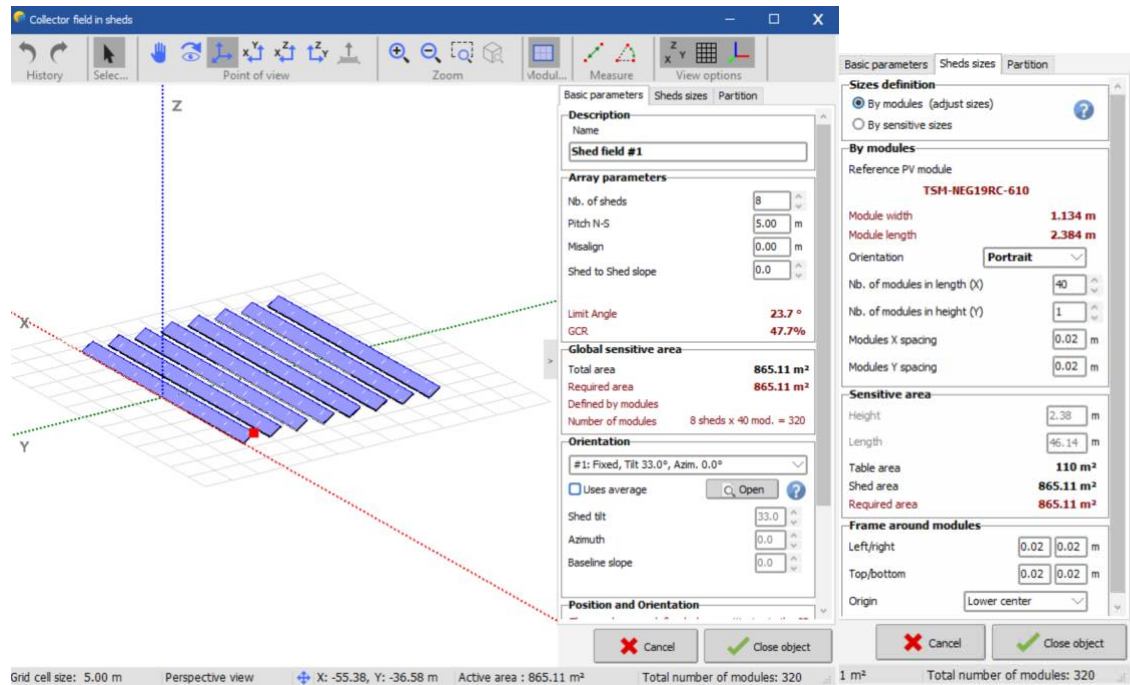


Рис. 4.7 Налаштування параметрів 3D-моделі в PVsyst.

Зберігаємо створену модель. Після завершення побудови моделі програма автоматично виконує аналіз взаємного затінення панелей, це дозволяє оцінити вплив розташування на генерацію і за потреби одразу відкоригувати параметри.

Після завершення роботи з вкладкою *Near Shadings* проект вже буде готовий для моделювання роботи запроєктованої нами сонячної електростанції.

Для цього у програмі PVsyst запускається річне моделювання генерації електроенергії кнопкою *Run simulation*. [24]

Під час моделювання програма враховує: обрану нами систему, конфігурацію панелей, сонячну інсоляцію на об'єкті, температуру навколишнього середовища, електричні та температурні втрати.

Оскільки запроєктована СЕС передбачає живлення об'єкта за допомогою сонячної енергії, для аналізу добового режиму роботи сонячної електростанції в програмному середовищі PVsyst було виконано експорт погодинних та добових значень генерації електроенергії.

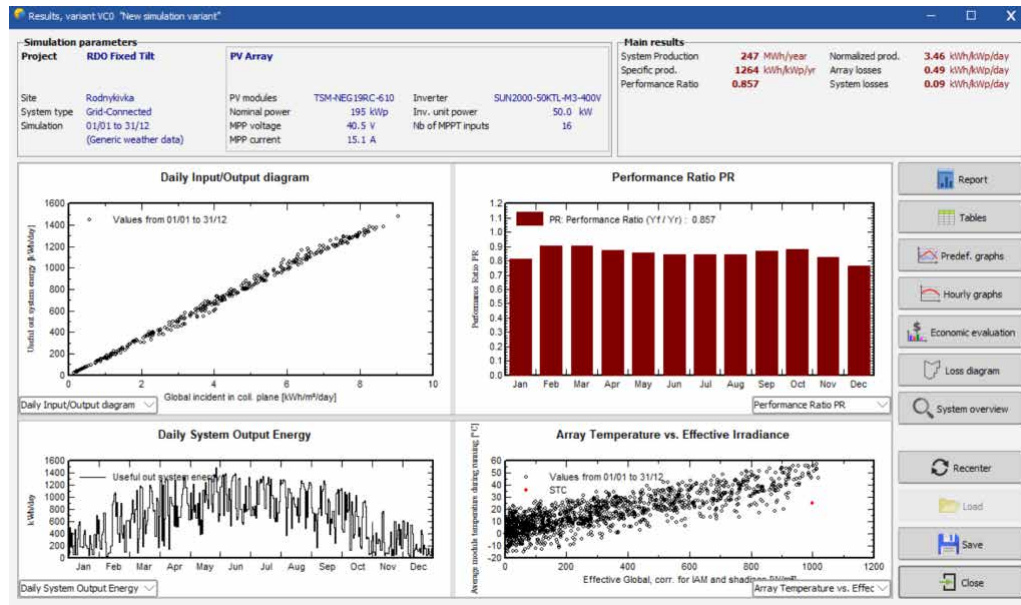


Рис. 4.8 Вікно результатів симуляції

На рис. 4.9 наведено основні результати моделювання роботи фотоелектричної системи за середньомісячними показниками генерації.

New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m²	kWh/m²	°C	kWh/m²	kWh/m²	kWh/day	kWh/day	ratio
January	29.7	17.67	-3.37	53.2	43.1	274	266	0.794
February	46.3	23.50	-2.44	71.5	64.8	455	443	0.889
March	94.4	44.48	2.79	126.1	116.7	726	707	0.891
April	133.8	60.46	9.83	154.1	142.4	891	869	0.866
May	169.2	81.25	15.87	172.1	158.2	939	916	0.845
June	189.2	76.40	18.79	185.9	171.5	1041	1016	0.840
July	188.9	85.32	21.16	188.9	173.9	1017	993	0.835
August	165.1	67.62	20.46	184.6	171.1	999	975	0.839
September	112.8	51.49	14.52	143.1	132.4	818	798	0.857
October	69.9	32.10	8.32	103.7	95.6	582	567	0.868
November	30.9	20.22	3.64	49.6	41.5	268	260	0.806
December	22.9	13.20	-1.12	43.3	33.5	211	204	0.748
Year	1253.2	573.72	9.10	1476.1	1344.8	686	669	0.847

Рис. 4.9 Показники роботи сонячної електростанції протягом року.

Аналіз отриманих результатів показує, що максимальні значення генерації припадають на літній період року, що обумовлено високим рівнем інсоляції та через високу тривалість світлового дня.

4.3 Розрахунок генерування електроенергії з використанням системи трекерів

Після виконання моделі сонячної електростанції з фіксованими фотомодулями виконаємо налаштування параметрів, для моделювання СЕС із використанням одноосьових трекерів.

У даному випадку зміни виконуються лише в вкладці вибору орієнтації фотомодулів. Інші ж параметри залишаються без змін.

Такий підхід дає можливість об'єктивно оцінити генерацію електроенергії обох систем без зміни конфігурації встановленого обладнання.

Для зміни типу орієнтації на трекерну систему у вкладці *Orientation* змінюємо з режиму *Fixed Tilt Plane* на *Tracking horizontal axis N-S*.

Для моделі трекерної системи виставляємо такі значення (див. рис. 4.10)

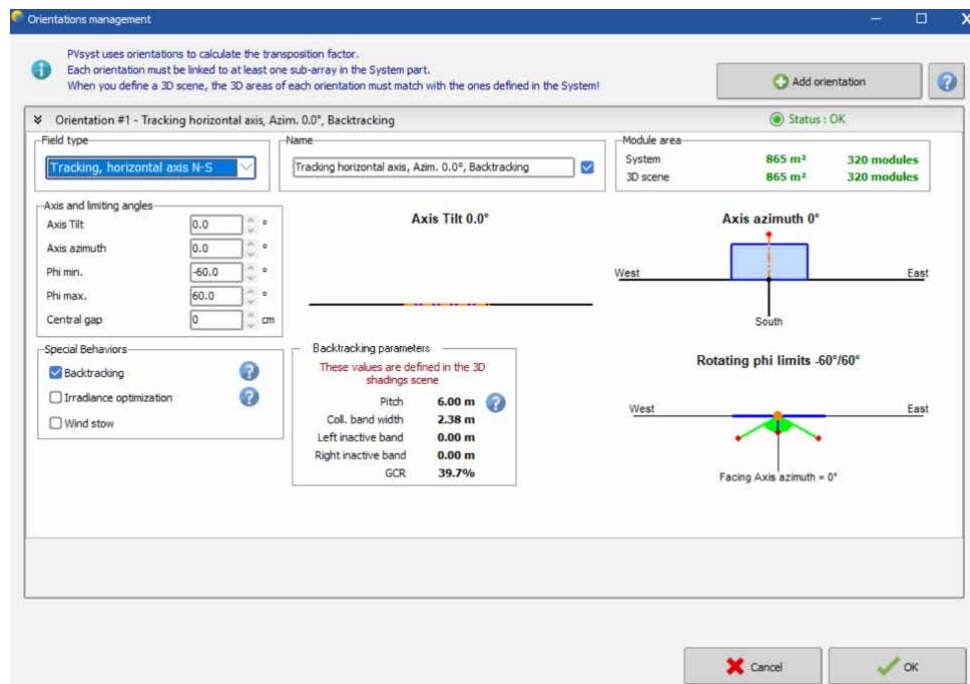


Рис. 4.10 Меню налаштування орієнтації трекерної системи

Режим Backtracking для нашої системи дозволяє трекерам автоматично змінювати кут повороту панелей в ранкові та вечірні години для мінімізації

взаємозатінення між панелями, коли Сонце низько за горизонтом і панелі можуть перекривати одна одну.

Наступним етапом є побудова 3D-моделі фотоелектричної станції з трекерами у вкладці *Near Shadings*.

У режимі просторового моделювання *Construction / Perspective* виконуємо побудову фотоелектричного модуля та його розміщення на ділянці, так само, як і для фіксованої системи. Проте у випадку з трекерною системою варто враховувати, що відстані між рядами як для фіксованих фотомодулів наврядчи вийде встановити, оскільки панелі постійно змінюють свій кут нахилу і можуть в процесі зміни положення затінювати сусідні ряди. Також для даної системи має значення висота встановлення фотомодулів, оскільки для вільного переміщення панелі на $\pm 60^\circ$ необхідний простір, тому висота встановлення осі над поверхнею землі прийнято на відмітці 1,8 м. Для трекерної системи приймаємо відстань між рядами 6 м.

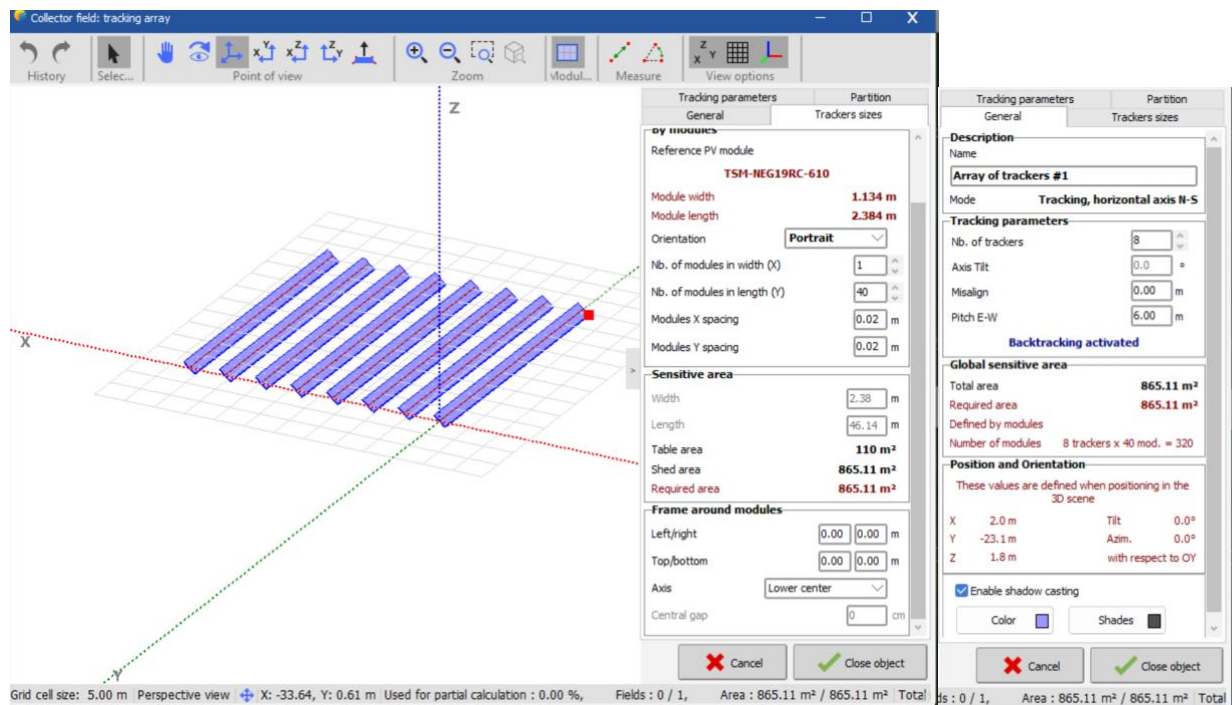


Рис. 4.11 Налаштування параметрів 3D-моделі трекерів.

Після завершення налаштування параметрів виконується запуск симуляції роботи сонячної електростанції *Run simulation*.

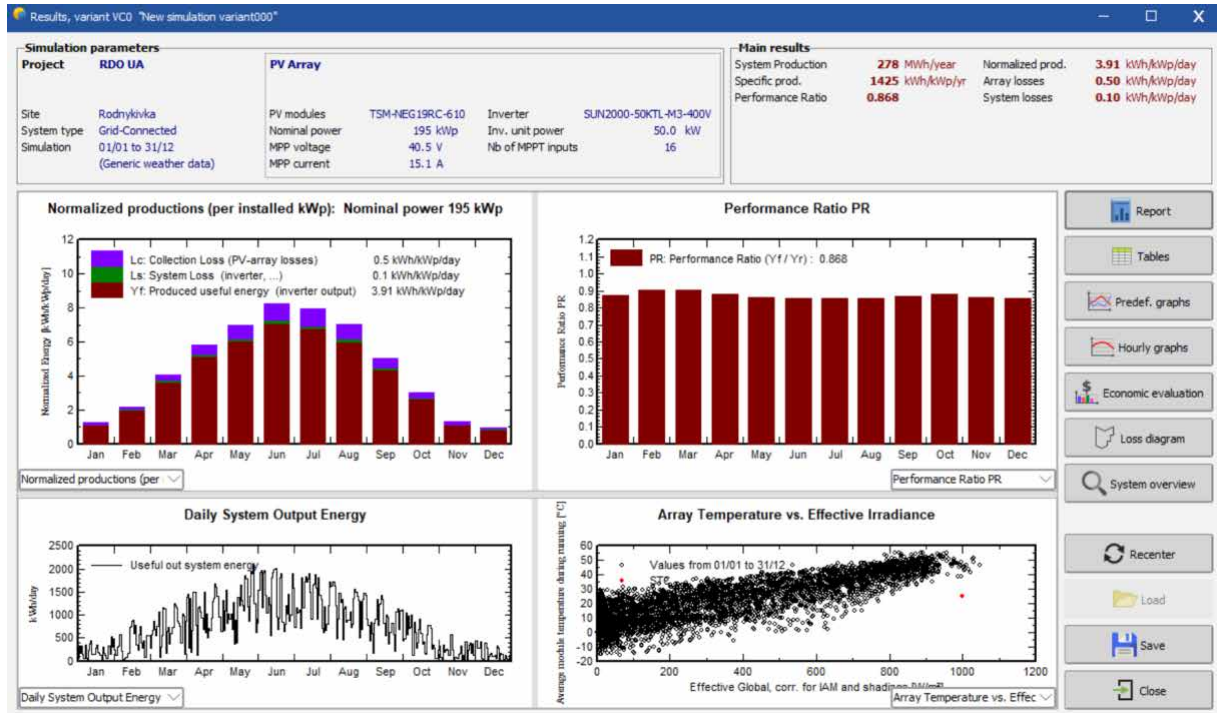


Рис. 4.12 Результати симуляції для сонячної електростанції на трекерах

Натискаємо кнопку *Report* та формуємо PDF-звіт.

На основі результатів даного звіту в наступному розділі буде виконано порівняльний аналіз ефективності роботи сонячної електростанції з фіксованим типом орієнтації фотомодулів.

4.4 Порівняльний аналіз та оцінка економічної доцільності впровадження системи трекерів

Для аналізу ефективності систем сонячних трекерів необхідно порівняти сформовані у попередніх розділах звіти з моделювання двох варіантів сонячної електростанції у програмі PVsyst:

- 1) СЕС зі стаціонарно встановленими панелями;
- 2) СЕС з одноосьовими трекерами типу HSAT.

Для об'єктивності результатів дослідження в обох системах використовувались однакові параметри системи: сонячні фотомодулі Trina Solar TSM-NE19R-610W – 320 шт; Гібридні інвертори Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-VM4 – 4 шт. географічні координати об'єкта; метеорологічні дані Meteonorm 8.2.

Відмінність між двома системами полягає в способі орієнтування фотомодулів відносно Сонця та особливостями розміщення через особливості їх роботи.

Для початку визначимо загальний приріст генерації електроенергії системами за рік:

Результати продуктивності обох систем наведено на рисунку 4.13

Main results				Main results			
System Production	278 MWh/year	Normalized prod.	3.91 kWh/kWp/day	System Production	244 MWh/year	Normalized prod.	3.43 kWh/kWp/day
Specific prod.	1425 kWh/kWp/yr	Array losses	0.50 kWh/kWp/day	Specific prod.	1251 kWh/kWp/yr	Array losses	0.53 kWh/kWp/day
Performance Ratio	0.868	System losses	0.10 kWh/kWp/day	Performance Ratio	0.847	System losses	0.09 kWh/kWp/day

a)
b)

Рис. 4.13 Основні параметри змодельованих систем.

а – трекерна система; б – система з фіксованими панелями

Згідно результатів моделювання встановлено, що система забезпечує річну генерацію електроенергії на рівні 244,72 МВт·год/рік для фіксованої системи, тоді як трекерна система має приріст на рівні 278, 24 МВт·год/рік.

Розрахуємо на основі цих даних відносний приріст генерації у відсотках

$$\Delta E = \frac{278,24 - 244,72}{247,72} \times 100\% = 13,53 \%$$

Таким чином система трекерів забезпечує збільшення приріст генерації електроенергії за рік до 33,52 МВт·год/рік у порівнянні з статичною системою, яка має аналогічну встановлену потужність.

Але для проектного об'єкта важливими будуть дані параметру E_Grid, який характеризує середньодобову генерацію потужності, яка може бути передана в електричну мережу для кожного місяця.

Дані середньодобової генерації наведено на табл.

Таблиця 4.1

Середньодобові показники генерації

Місяць	Трекери	Фіксовані панелі
Січень	216	266
Лютий	384	443
Березень	710	707
Квітень	1005	869
Травень	1178	916
Червень	1381	1016
Липень	1321	993
Серпень	1175	975
Вересень	854	798
Жовтень	520	567
Листопад	218	260
Грудень	163	204

На основі табличних даних створимо лінійний графік для кожної системи на рисунку 4.14

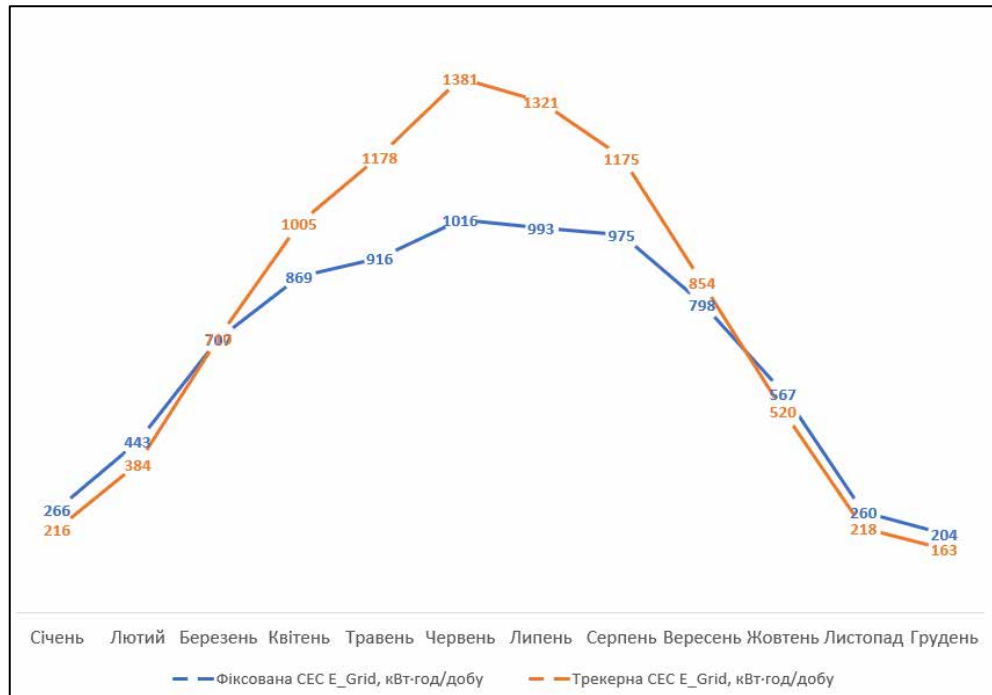


Рис. 4.14 Графік приросту генерації електроенергії трекерною системою

Аналіз даного графіку демонструє високий приріст генерації у весняно-літній період року. Максимальні значення генерації спостерігаються в червні та липні і перевищують майже на 30% у порівнянні з фіксованими системами.

В зимовий період очевидно зменшується через дві причини: короткі світлові дні, Сонце має малу висоту над горизонтом, та висока кількість хмарних днів, ці проблеми актуальні для обох варіантів систем.

Проте у трекерній системі особливо в період з жовтень по лютий місяці генерація нижче ніж в фіксованій системі і їхня ефективність низька. Це пояснюється тим, що для приросту генерації за допомогою трекера конструкція виконана таким чином, що вона відстежує рух Сонця в напрямку від Сходу на Захід. Тому на Південь направлена лише вісь трекерів і фактично запроектоване поле сонячних трекерів розвернуто на 90° у порівнянні з статичною системою

На рисунку 4.15 зображена просторова модель з сонячними трекерами та траєкторією руху Сонця.

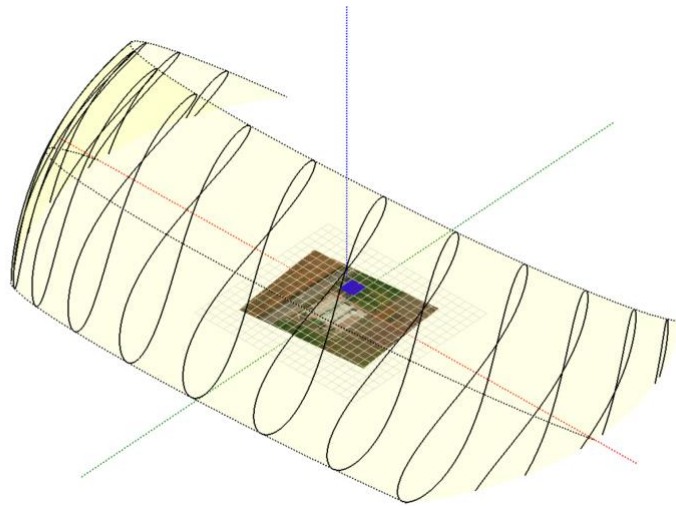


Рис. 4.15 Діаграма руху Сонця на 3-D моделі з об'єктом проектування.

На основі аналізу порівняння трекерних та фіксованих систем можна зробити висновок, що одновісна система є технічно обґрунтованим рішенням. Оскільки вона дає стабільне зростання продуктивності СЕС протягом року та в цілому підвищує її ефективність без збільшення кількості та потужності панелей.

Проте за ефективність трекера потрібні вищі капіталовкладення для додаткового обладнання при будівництві тому для цього потрібна оцінка економічної доцільності використання трекерних систем

- 1) Приводи поворотних механізмів;
- 2) Контролери для позиціонування панелей;
- 3) Посилені металеві конструкції;
- 4) Додаткова кабельна продукція та джерела живлення для приводів та контролерів;
- 5) Потреба в обслуговуванні механічних вузлів.

Проте впровадження СЕС на трекерах компенсує ці додаткові на систему позицінування, оскільки система дозволяє отримувати вищі показники генерації

електроенергії без необхідності збільшення кількості фотомодулів, виділення більшої площі під встановлення та відсутності потреби в збільшенні кількості інверторів.

Таким чином одноосьові трекерні системи є технічно та економічно доцільні для сонячних електростанцій, які працюють для підприємств з високим рівнем споживання електроенергії вдень, саме в години коли сонячна активність найвища.

Також одноосьові трекерні системи придатні для використання в межах центральної України, а витрати на їх встановлення окупується протягом декількох років роботи, а отримані результати підтверджують, що застосування одноосьових трекерів є перспективним напрямком для підвищення ефективності роботи фотоелектричних систем.

Висновки до розділу 4

В четвертому розділі магістерської роботи виконано моделювання роботи сонячної електростанції у програмному комплексі PVsyst 8.0 для двох варіантів: стаціонарної системи; системи з одноосьовими трекерами.

В ході дослідження в PVsyst створено 3D-моделі сонячних електростанцій, які дозволили провести аналіз взаємного затінення фотомодулів, визначено параметри фотомодулів та виконано річний розрахунок генерації електроенергії

Встановлено, що використання одноосьових трекерів забезпечує збільшення генерації електроенергії в порівнянні із статичними системами.

Встановлено, що використання трекерних систем дозволяє підвищити ефективність використання сонячної інсоляції та збільшити виробіток електроенергії приблизно на 13,5 % з урахуванням додаткових вкладень.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі була досягнута мета підвищення ефективності генерування сонячною електростанцією шляхом аналізу та проектування одноосьових трекерних систем для автоматичного відстеження положення Сонця.

Основні результати роботи:

Розділ 1. Досліджено стан та тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні та світі, визначено основні проблеми, які впливають на роботу сонячних електростанцій. Встановлено, що одним із способів підвищення генерації є використання трекерних систем дозволяє підвищити ефективність використання сонячної інсоляції без зміни кількості фотомодулів.

Розділ 2. Проведено аналіз конструкцій та принципів роботи сонячних трекерів. Розглянуто одноосьові та двоосьові системи позиціонування, їх конструктивні особливості, методи керування та алгоритми роботи. Встановлено, що одноосьові трекери є найбільш збалансованим рішенням для промислових та комерційних СЕС, оскільки забезпечують значний приріст генерації при помірному ускладненні конструкції та прийнятних витратах на обслуговування.

Розділ 3. Виконана робота з проектування сонячної електростанції з одноосьовими трекерними системами. Розглянуто об'єкт електропостачання та досліджено сонячний потенціал для проектування СЕС. Також в даному розділі розглянуто вибір пристроїв позиціонування сонячних панелей на основі вертикального поворотного двигуна VH7 та алгоритму автоматичного керування на базі контролера CST1000W.

Розроблено майданчик фотоелектричних модулів потужністю 195,2 кВт на базі фотомодулів Trina Solar TSM-NE19R-610W та інверторів типу Deye SUN-50KSG01HP3. Запропоновано додаткове встановлення системи накопичення ємністю 204,8 кВт·год

Розділ 4. Виконано моделювання роботи сонячної електростанції у програмі PVsyst 8.0 для двох варіантів: стаціонарної та з одноосьовими трекерами.

В ході дослідження в PVsyst створено 3D-моделі сонячних електростанцій, які дозволили провести аналіз взаємного затінення фотомодулів, визначено параметри фотомодулів та виконано річний розрахунок генерації електроенергії

За результатами моделювання встановлено, що використання одноосьових трекерів у кліматичних умовах центральної частини України забезпечує збільшення генерації електроенергії приблизно на 12-15 % в порівнянні із статичними системами. Також визначено основні втрати систем та виконано оцінку економічної доцільності впровадження систем стеження.

Таким чином, поставлена мета магістерської роботи, яка полягала у дослідженні впливу трекерних систем на ефективність роботи сонячної електростанції, була повністю досягнута. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування сучасних фотоелектричних станцій із системами автоматичного позиціонування фотомодулів для підвищення їх енергетичної ефективності.

Пропозиції:

1) Для підвищення ефективності роботи СЕС в межах території України доцільно використовувати одноосьові трекерні системи.

2) З метою підвищення стабільності електропостачання рекомендується інтеграція систем накопичення енергії (BESS), які дозволяють компенсувати нерівномірність генерації сонячної електростанції.

3) Рекомендовано використання нового покоління фотомодулів на базі технологій TOPCon, HJT, які мають покращені температурні характеристики та нижчий рівень деградації, та двохсторонні Bifacial для додаткової генерації від відбитого світла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. European Business Association. Світові тенденції та зміни на ринку сонячної енергетики 2025–2029 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eba.com.ua/svitovi-tendentsiyi-ta-zminy-na-rynku-sonyachnoyi-energetyky-2025-2029-roky/> (дата звернення: 25.04.2025).
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Capacity Statistics 2026 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Renewable Capacity Statistics 2026](#) (дата звернення: 15.05.2026).
3. Барило А.А., Бенменні М., Будько В.І. та ін. Відновлювані джерела енергії: монографія / за ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 380 с.
4. Відновлювані джерела енергії: видання третє, оновлене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2025. 512 с.
5. Шевченко С.С. Відновлювана енергетика: Навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 320 с.
6. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
7. Системи накопичення електричної енергії. Підручник / І.О. Сінчук, С.М. Бойко; під ред. доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука. – Кривий Ріг, 2020. – 219 с.
8. Tongwei Solar. TOPCon Technology: The Future of High-Efficiency Solar Modules [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.tongwei.cn/blog/266.html> (дата звернення: 22.04.2026).
9. SINOVOLTAICS. Alt-azimuth Dual Axis Tracker [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/alt-azimuth-dual-axis-tracker/> (дата звернення: 26.04.2025).

10. SOLARsk. Трекер для сонячних панелей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solarssk.com/uk/tracker/> (дата звернення: 22.04.2026).
11. Technology and engineering journal of research. Basic Development of Solar Tracking Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Basic Development of Solar Tracking Systems](#) (дата звернення: 20.04.2026).
12. Шутько, Ю.С. Електронна система керування трекером автономної сонячної електростанції [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра; спец.: 171 - електронні системи / Ю.С. Шутько; наук. керівник А.С. Опанасюк. - Суми: СумДУ, 2018 - 82 с.
13. Трекер для сонячних електростанцій [Електронний ресурс]. Режим доступу: [Трекер для сонячних електростанцій](#)
14. Automatic solar tracking system [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://rccit.edu.in/pdf/aeie_projects_2019_GR2.pdf
15. A Hybrid Dual-Axis Solar Tracking System: Combining Light-Sensing and Time-Based GPS for Optimal Energy Efficiency [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/387760093_A_Hybrid_Dual-Axis_Solar_Tracking_System_Combining_Light-Sensing_and_Time-Based_GPS_for_Optimal_Energy_Efficiency (дата звернення: 22.05.2026).
16. Comparative Analysis of Single-Axis and Dual-Axis Solar Tracking Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Comparative Analysis of Single-Axis and Dual-Axis Solar Tracking Systems](#) (дата звернення: 10.05.2026).
17. Sadeghi R, Parenti M, Memme S, Fossa M, Morchio S. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. Energies. 2025; 18(10):2553. <https://doi.org/10.3390/en18102553>
18. Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position – Режим доступу: [Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position](#) (дата звернення: 18.04.2026).

19. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Форт, 2017.
20. ДСТУ 8635:2016 Геліоенергетика. Площадки для фотоелектричних станцій. Приєднання станцій до електроенергетичної системи.
21. ДСТУ ISO 9488:2010 Енергія сонячна. Словник термінів (ISO 9488:1999, IDT)
22. Проектування об'єктів альтернативної енергетики: курс лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О. М. Мороз, О. О. Мірошник / - Електрон. дані. – Х.: ДБТУ, 2023. – 117 с.
23. Електрообладнання сонячних електростанцій: практикум / Я. В. Бацала, І. І. Яремак – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. – 56 с.
24. Петренко А. В., Віюк Д. В. Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з дисципліни «Відновлювані джерела електричної енергії» (Розділ 1 «Сонячна енергетика»). – Київ : НУБіП України, 2022. – 79 с.
25. PVsyst Photovoltaic software [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pvsyst.com/>
26. PVsyst 8.1 Grid Connected Systems – User's manual <https://www.pvsyst.com/pdf/pdf-tutorials/pvsyst-8.1/pvsyst-tutorial-v8-1-grid-connected-en.pdf>
27. Сонячна панель Trina Solar TSM-NE19R-610WTrina TSM-610M NE19R VertexN 610Вт: [Електронний ресурс]: [datasheet] / Режим доступу: <https://www.sig.energy/wp-content/uploads/2024/06/trina-ne19r-600-630-n-type-f30-2025-datasheet-ua.pdf>
28. Сонячні електростанції на трекерах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://setech.in.ua/sonachni-elektrostantsiyi-na-trekerah/> (дата звернення: 19.04.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

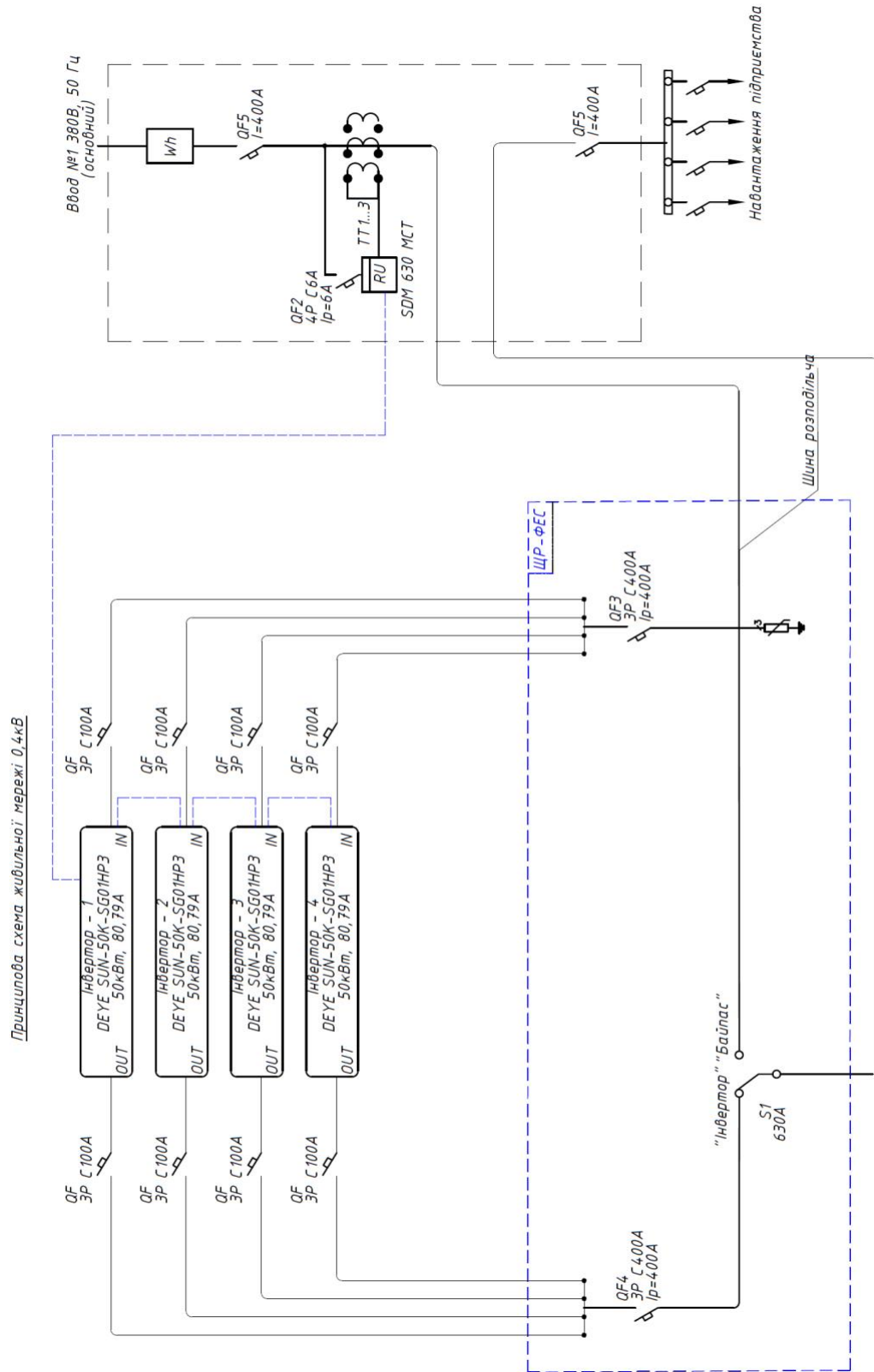


Схема зовнішнього підключення гібридного інвертора №1

