

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему:

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ  
ТРЕКЕРІВ У ПОРІВНЯННІ ЗІ СТАЦІОНАРНИМИ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кучеров А.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник Захарченко Р.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Трег'як А.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

# РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи магістра

« Дослідження ефективності використання сонячних трекерів у порівнянні зі стаціонарними фотоелектричними системами»

Робота містить 101 сторіноку, 7 рисунків, 8 таблиць, 17 використаних джерел.

**Ключові слова:** фотоелектрична система, сонячна панель, трекерна система, стаціонарна система, інсоляція, інвертор, акумуляторна батарея, відновлювана енергетика.

**Об'єктом** дослідження є фотоелектрична система електропостачання житлового будинку в умовах Полтавської області, а **предметом** - процес генерації електричної енергії у стаціонарних, заводських трекерних та оптимізованих трекерних фотоелектричних системах власної конструкції.

**Метою** роботи є порівняльний аналіз енергетичної та економічної ефективності фотоелектричних систем та обґрунтування доцільності застосування трекерних технологій, у тому числі оптимізованої трекерної системи власної конструкції, для підвищення ефективності використання сонячної енергії.

У роботі виконано аналіз кліматичних і географічних умов Полтавського регіону, визначено енергоспоживання житлового будинку, обґрунтовано вибір основних компонентів фотоелектричної системи, сформовано електричну структуру оптимізованої трекерної установки та проведено техніко-економічне порівняння стаціонарної, заводської трекерної та оптимізованої трекерної фотоелектричних систем.

Результати дослідження підтверджують доцільність застосування оптимізованих трекерних фотоелектричних систем, які забезпечують підвищений рівень річної генерації та кращі економічні показники у порівнянні зі стаціонарними системами

## ABSTRACT

Master's qualification thesis

“Research into the effectiveness of using solar trackers compared to stationary photovoltaic systems”

The thesis contains 101 pages, 7 figures, 8 tables, and 17 references.

**Keywords:** photovoltaic system, solar panel, tracking system, stationary system, solar irradiation, inverter, battery storage, renewable energy.

**The object** of the study is a photovoltaic power supply system for a residential building in the Poltava region. **The subject** of the study is the process of electrical energy generation in stationary, factory-made tracking, and optimized self-designed tracking photovoltaic systems.

**The purpose** of the thesis is to conduct a comparative analysis of the energy and economic efficiency of photovoltaic systems and to substantiate the feasibility of applying tracking technologies, including an optimized self-designed tracking system, in order to improve the utilization efficiency of solar energy.

The thesis analyzes the climatic and geographical conditions of the Poltava region, determines the energy consumption of a residential building, justifies the selection of main system components, forms the electrical structure of the optimized tracking photovoltaic system, and performs a techno-economic comparison of stationary, factory-made tracking, and optimized tracking systems.

The results of the study confirm the feasibility of using optimized tracking photovoltaic systems, which provide higher annual energy generation and better economic performance compared to stationary systems.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки


Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Рівень вищої освіти Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри автоматки,  
електроніки та телекомунікацій

  
“ 15 ” 09 2025 р.

О.В. Шефер  
2025 р.

## **ЗАВДАННЯ**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Кучерову Антону Ярославовичу**

1. Тема проекту (роботи) **«Дослідження ефективності використання сонячних трекерів у порівнянні зі стаціонарними фотоелектричними системами»**

керівник проекту (роботи) Захарченко Руслан Володимирович, к.т.н., доцент  
затверджена наказом вищого навчального закладу від “03” вересня 2025 року  
№ 1025 - ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічні характеристики фотоелектричних модулів, інверторного обладнання, акумуляторних батарей та елементів трекерної системи, а також дані про географічне розміщення об'єкта з урахуванням середньорічної інсоляції та кліматичних умов Полтавської області України. У роботі розглядаються стаціонарні та трекерні фотоелектричні системи заводського і оптимізованого власного виконання. Під час розрахунків враховуються температурні впливи, втрати від затінення і забруднення, деградація модулів та ККД інверторного обладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз сучасних фотоелектричних систем, визначення енергетичних характеристик для умов досліджуваної місцевості, розрахунок параметрів орієнтації та прогнозованої генерації, вибір основного обладнання, розроблення системи керування трекером, моделювання роботи фотоелектричної установки, аналіз отриманих результатів і формування висновків за роботою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
- 1) Карта сонячної інсоляції та кліматичних умов Полтавської області
  - 2) Розрахункова схема енергоспоживання житлового будинку
  - 3) Структурна схема фотоелектричної системи електропостачання будинку
  - 4) Електрична структура фотоелектричної системи з акумулятором
  - 5) Геометрична схема нахилу сонячних панелей для умов Полтавської області
  - 6) Кінематична схема двоосьової трекерної системи власної конструкції
  - 7) Конструктивна схема оптимізованої трекерної установки
  - 8) Порівняльні графіки річної генерації: стаціонарна / заводська трекерна оптимізована трекерна ФЕС
  - 9) Порівняльна техніко-економічна діаграма ефективності ФЕС
  - 10) Узагальнююча схема результатів дослідження та висновків
6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакат)
		Термін	Етап	Обсяг	
1	Аналіз сучасних фотоелектричних систем та трекерних технологій	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Оцінка факторів, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних установок	21.10.25	I	25%	Пл. 2
3	Формування конфігурації та вибір основних елементів фотоелектричної системи	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Розроблення та моделювання стаціонарної і трекерної фотоелектричних систем	11.11.25		50%	Пл. 4
5	Проектування та оптимізація системи керування сонячним трекером	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Порівняльний енергетичний та економічний аналіз систем	25.11.25		70%	Пл. 6
7	Дослідження та узагальнення результатів	09.12.25		90%	Пл. 8
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 1

Магістрант

  
(підпис)

Кучеров А.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Захарченко Р.

(прізвище та ініціали)

## Зміст

Зміст .....	6
ВСТУП .....	8
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАЦІОНАРНИХ ТА ТРЕКЕРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>11</b>
1.1. Сонячні панелі та їх принцип роботи .....	11
1.2. Переваги та недоліки сучасних сонячних модулів.....	14
1.3. Основні типи сонячних панелей і їх технічні особливості.....	17
1.4. Особливості побудови та функціонування фотоелектричних систем.....	21
1.5. Стаціонарні фотоелектричні системи: конструкція та експлуатаційні особливості .....	24
1.6. Трекерні фотоелектричні системи: принцип дії та класифікація .....	25
1.7. Порівняння ефективності стаціонарних і трекерних систем за енергетичними та економічними показниками.....	30
1.8. Висновки до розділу 1 .....	33
<b>РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ І ЇХ БУДОВА .....</b>	<b>35</b>
2.1. Кліматичні та географічні умови Полтавського регіону .....	35
2.2. Рівень сонячної освітленості та потенціал фотоелектричного перетворення енергії .....	38
2.3. Розрахунок енергетичного споживання житлового будинку .....	40
2.4. Розрахунок необхідної потужності фотоелектричної системи .....	42
2.5. Вибір сонячних панелей для трекерної системи.....	44
2.6. Вибір інвертора та визначення його технічних параметрів.....	47
2.7. Вибір акумуляторної батареї та розрахунок її ємності .....	51
2.8. Формування електричної структури та вибір трекерної системи.....	53
2.9. Детальна конструкція, вибір та функціональна архітектура двоосьової трекерної системи.....	56
2.10. Узагальнені технічні вимоги до побудованої ФЕС .....	59
2.11. Висновки до розділу 2 .....	62

РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАЦІОНАРНИХ І ТРЕКЕРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА РОЗРОБКА ОПТИМІЗОВАНОЇ ТРЕКЕРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ .....	64
3.1. Методологія порівняння та вихідні дані для аналізу .....	64
3.2. Розрахунок річної генерації трекерної системи.....	66
3.3. Визначення необхідної кількості панелей для стаціонарної ФЕС.....	69
3.4. Розрахунок річної генерації стаціонарної системи .....	71
3.5. Порівняння площі, ваги та конструктивних вимог .....	75
3.6. Порівняння вартості систем: обладнання, монтаж, обслуговування.....	79
3.7. Інженерна оптимізація трекерної фотоелектричної системи шляхом проектування власної конструкції.....	82
3.8. Порівняльний економічний аналіз заводської та оптимізованої трекерної фотоелектричної системи .....	89
3.9. Практичні аспекти експлуатації та надійності оптимізованої трекерної системи .....	92
3.10. Узагальнююче техніко-економічне порівняння фотоелектричних систем .....	94
3.11. Висновки до розділу 3 .....	96
ВИСНОВОК.....	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	100

## ВСТУП

Поточний стан розвитку енергетичного сектору супроводжується зростанням вимог до енергоефективності, безпеки навколишнього середовища та різноманітність джерел енергії, що зумовлює активний пошук і впровадження альтернативних енергетичних технологій. У структурі альтернативної енергетики провідне значення має використання сонячної радіації як джерела електричної енергії, яка завдяки практично невичерпному потенціалу, модульності та відсутності шкідливих викидів належить до пріоритетних елементів системи довгострокового розвитку енергетичного сектору систем. Фотоелектричні системи набули широкого застосування у побутовому та комерційному секторах, проте аналіз вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури, періодичних видань і практичного досвіду експлуатації сонячних електростанцій свідчить, що ефективність таких систем значною мірою визначається способом орієнтації фотоелектричних модулів відносно Сонця.

У більшості регіонів України, зокрема в Полтавській області, рівень сонячної радіації є достатнім для ефективної роботи фотоелектричних установок. Разом з тим традиційні стаціонарні фотоелектричні системи, у яких сонячні панелі встановлюються під фіксованим кутом нахилу, не забезпечують повного використання доступного енергетичного потенціалу сонячного випромінювання. Це зумовлено добовими та сезонними змінами положення Сонця, що призводить до втрат генерації у ранкові та вечірні години, а також у перехідні пори року. Зазначені обмеження підтверджуються результатами численних досліджень провідних наукових установ і досвідом роботи компаній, що спеціалізуються на проектуванні та експлуатації фотоелектричних електростанцій.

Одним із перспективних напрямів удосконалення існуючих фотоелектричних систем є застосування сонячних трекерів - електромеханічних пристроїв, які забезпечують автоматичне відстеження руху Сонця та підтримання оптимального кута падіння сонячних променів на

поверхню панелей. За даними зарубіжних і вітчизняних джерел, використання трекерних систем дозволяє збільшити річний виробіток електроенергії на 20–35 % порівняно зі стаціонарними установками. Водночас впровадження трекерів супроводжується зростанням капітальних витрат, ускладненням конструкції та підвищеними вимогами до технічного обслуговування, що обумовлює необхідність комплексного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх застосування в конкретних регіональних умовах.

Актуальність даної кваліфікаційної роботи магістра визначається необхідністю покращення традиційних підходів до проєктування фотоелектричних систем шляхом впровадження трекерних технологій з метою підвищення ефективності використання сонячної енергії. Особливої уваги потребує питання доцільності застосування трекерних систем для побутових фотоелектричних установок у центральних регіонах України, де співвідношення між супутніми витратами та приростом генерації є критичним фактором при прийнятті інженерних рішень.

Наукова новизна роботи полягає у супутньому порівняльному аналізі стаціонарної та трекерної фотоелектричних систем, виконаному на основі однакових вихідних умов енергоспоживання, кліматичних характеристик та узгодженого складу обладнання. У роботі здійснено інтегровану оцінку енергетичних, просторових і економічних показників обох систем, що дозволяє обґрунтовано визначити переваги трекерної системи для заданих умов експлуатації.

Об'єктом дослідження у даній роботі є фотоелектрична система електропостачання житлового будинку в умовах Полтавщини, а предметом дослідження - процеси генерації електричної енергії та техніко-економічні характеристики стаціонарних і трекерних фотоелектричних систем. Метою роботи є дослідження ефективності використання сонячних трекерів у порівнянні зі стаціонарними фотоелектричними системами та вмотивованість енергетичних і економічних переваг їх застосування для регіональних умов.

Досягнення поставленої мети реалізується шляхом аналізу сучасного стану розвитку фотоелектричних систем, визначення енергетичних потреб об'єкта, виконання інженерних розрахунків необхідної потужності фотоелектричної установки, аргументація вибору основного обладнання та трекерної системи, а також проведення порівняльного техніко-економічного аналізу стаціонарної та трекерної конфігурацій. Методологічну основу дослідження становлять методи теоретичного дослідження, інженерного розрахунку, використання аналітичних співвідношень для оцінювання генерації електроенергії та порівняльного аналізу ефективності технічних рішень. Обґрунтування основних напрямків дослідження базується на поступовому формуванні структури фотоелектричної системи з урахуванням реальних умов експлуатації, технічних характеристик сучасного обладнання та можливості практичної реалізації запропонованих інженерних рішень.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАЦІОНАРНИХ ТА ТРЕКЕРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**

### **1.1. Фотоелектричні модулі та особливості їх функціонування**

Сонячна енергетика є однією з найважливіших компонентів сучасного енергетичного переходу, спрямованого на застосування поновлюваних енергетичних ресурсів. Енергія сонячного випромінювання - це потік електромагнітної енергії, який постійно надходить від Сонця на поверхню Землі. Щосекунди Сонце випромінює величезну кількість енергії, і навіть невелика частка цього випромінювання, що досягає нашої планети, у багато разів переважає глобальні потреби людства в електроенергії. Саме тому використання сонячної енергії вважається перспективним і екологічно безпечним напрямом розвитку енергетичної галузі.

Сонячні панелі, або фотоелектричні модулі, є основним технічним елементом систем, що трансформують енергію сонячного випромінювання в електричну. Вони складаються з великої кількості з'єднаних між собою фотоелементів, які здатні трансформувати світлову енергію безпосередньо у електричний струм. Робота сонячних панелей ґрунтується на фізичному явищі, що має назву фотоелектричний ефект. Це явище полягає у вивільненні електронів з поверхні напівпровідникового матеріалу під дією фотонів світла. Коли фотон, який несе певну кількість енергії, потрапляє на атом речовини, він може передати цю енергію електрону, надаючи йому можливість залишити свою атомну орбіту. У результаті виникає рух електронів, тобто електричний струм.

Більшість сонячних панелей виготовляють із напівпровідникових матеріалів, головним з яких є кремній. Кремній має властивість утворювати так званий р-п перехід - область, у якій зустрічаються дві частини матеріалу з різними типами електропровідності: одна з надлишком електронів (n-тип), інша з їхнім дефіцитом (р-тип). Саме на межі цих двох шарів і виникає електричне поле, яке змушує вивільнені під дією світла електрони рухатися в

певному напрямку. Таким чином створюється електричний струм, який можна використовувати для живлення електричних приладів або накопичення в акумуляторних системах.

Основна структура сонячної панелі включає кілька важливих шарів. Верхній шар - це прозоре захисне скло, яке пропускає сонячне випромінювання, але водночас захищає внутрішні елементи від механічних пошкоджень і впливу зовнішнього середовища. Під ним розташовується шар антиблікового покриття, який підвищує кількість поглинутого світла, зменшуючи відбиття. Далі йде сам напівпровідниковий шар, у якому відбувається фотоелектричний процес, а під ним - контактні шари, що забезпечують збір і передачу електричного струму. Нижня частина фотоелектричного модуля покривається спеціальним захисним прошарком, який виконує функції герметизації та перешкоджає проникненню вологи, а також зменшує вплив температурних коливань на конструкцію панелі.

Для забезпечення максимальної ефективності перетворення сонячної енергії модулі розміщують з урахуванням просторової орієнтації та кута нахилу відносно горизонту, що дозволяє збільшити кількість отриманого сонячного випромінювання. У практиці експлуатації застосовуються автоматизовані трекерні системи, які здійснюють коригування положення панелей відповідно до зміни траєкторії Сонця протягом доби. Використання таких систем забезпечує зростання виробітку електричної енергії в середньому на 20–35 % порівняно з установками стаціонарного типу.

Сонячні фотоелектричні панелі виробляють електричну енергію постійного струму. Для його подальшого використання у побутових і промислових мережах необхідно перетворити його на змінний струм, що здійснюється за допомогою інвертора.

Можна використовувати отриману енергію безпосередньо для споживання, накопичувати її в акумуляторах або передавати її в загальну електромережу. Таким чином, повноцінна система сонячної енергії включає не лише пане

лі, але й додаткове обладнання, таке як контролери заряду, інвертори, системи моніторингу та акумуляторні батареї.

Результативність функціонування фотоелектричних модулів формується під впливом сукупності параметрів, основними з яких є рівень сонячної інсоляції, температурний режим експлуатації та стан поверхні панелей поверхні панелей, а також якість матеріалів, з яких вони виготовлені. Надмірне нагрівання може знижувати ефективність фотоелементів, тому в сучасних установках часто використовуються технології пасивного або активного охолодження. Крім того, для забезпечення стабільної роботи панелей важливо регулярно очищати їхню поверхню від пилу, бруду та снігу, які можуть перешкоджати проходженню світла.

Сонячні панелі мають ряд суттєвих привілей, які обумовлюють їх широке введення у світлі. Насамперед це екологічна чистота процесу виробництва електроенергії, адже при роботі панелей не відбувається жодних шкідливих викидів у навколишнє середовище. Крім того, сонячна енергія є безкоштовним і невичерпним джерелом енергії, який можна використовувати практично в будь-якому місці на Землі. Важливою перевагою є можливість виробництва електроенергії з розподілених джерел, що дозволяє окремим домогосподарствам або підприємствам самостійно забезпечувати себе електроенергією, не покладаючись на централізовані енергосистеми.

Фотоелектричні модулі є складовою процесу трансформації сучасної енергетичної парадигми, що ґрунтується на сталому розвитку, енергоефективності та раціональному використанні природних ресурсів. Завдяки постійному вдосконаленню технологій, підвищенню коефіцієнта корисної дії фотоелементів і зниженню вартості їхнього виробництва, сонячна енергія стає дедалі доступнішою для широкого кола користувачів. У перспективі саме вона здатна стати одним із провідних джерел чистої електроенергії, що забезпечить енергетичну незалежність держав та сприятиме зменшенню негативного впливу енергетики на довкілля.

Таким чином, сонячні панелі є ключовим елементом сучасної фотоелектричної енергетики, функціонування яких ґрунтується на процесі прямого перетворення сонячної радіації в електричну енергію відповідно до принципів фотоелектричного перетворення. Подальша робота поєднує фундаментальні закони фізики з високими технологічними досягненнями, відкриваючи перед людством шлях до стабільного та екологічно безпечного енергетичного майбутнього

## **1.2. Переваги та недоліки сучасних сонячних модулів**

Сучасні сонячні модулі, які лежать в основі фотоелектричних систем, є одним із найважливіших досягнень у сфері відновлюваної енергетики. Вони стали ключовим інструментом для отримання екологічно чистої електроенергії, що відповідає вимогам сталого розвитку. З моменту появи перших промислових зразків сонячні панелі зазнали значної еволюції - від малоефективних експериментальних пристроїв до високотехнологічних систем, здатних забезпечувати значну частину енергетичних потреб людства. Разом з тим, як і будь-яка технологія, вони мають як свої переваги, так і певні обмеження, що визначають доцільність їхнього використання в різних умовах.

Однією з головних переваг сонячних модулів є використання невичерпного природного ресурсу - енергії Сонця. На відміну від викопних джерел енергії, таких як вугілля, нафта чи природний газ, сонячне випромінювання є постійним і доступним практично в будь-якій точці планети. Це робить фотоелектричні системи незалежними від коливань на енергетичних ринках, політичних ризиків чи географічних обмежень. Сонячна енергія належить до категорії відновлюваних, тобто її використання не призводить до вичерпання природних запасів і не створює небезпеки для екосистеми. [1]

Ще однією важливою перевагою є екологічна чистота виробництва електроенергії. У процесі роботи сонячних панелей не відбувається

спалювання палива, не утворюються викиди шкідливих речовин, парникових газів або токсичних продуктів згоряння. Це дозволяє зменшити зумовлений діяльністю людини вплив на навколишнє середовище, сприяє покращенню якості повітря та боротьбі зі змінами клімату. Використання сонячних модулів дає змогу знизити загальний рівень вуглецевого сліду як у масштабах окремих підприємств, так і цілих держав.

Фотоелектричні модулі відзначаються підвищеною експлуатаційною надійністю та значним ресурсом роботи. Сучасні панелі можуть працювати ефективно протягом двадцяти п'яти до тридцяти років [2], при цьому зниження вихідної потужності має поступовий характер і, як правило, не перевищує кількох відсотків протягом десятирічного періоду. Відсутність рухомих механічних елементів істотно зменшує інтенсивність фізичного зношування та зводить до мінімуму потребу в регулярному технічному обслуговуванні, що забезпечує простоту експлуатації та економічну доцільність використання таких систем у довгостроковій перспективі.

Можливість отримувати енергію з децентралізованих джерел є ще однією значною перевагою. Завдяки сонячним модулям користувачі можуть самостійно виробляти електричну енергію для внутрішнього споживання, що сприяє скороченню використання ресурсів централізованих систем електропостачання. Особливу доцільність це має для об'єктів малодоступних районів, де будівництво традиційних енергетичних інфраструктур є технічно складним або економічно невиправданим. Крім того, надлишок електроенергії може бути наданий до загальної мережі, що дає додаткові можливості для економії та підвищення енергетичної автономії домогосподарств.

Одним із додаткових переваг сонячних модулів є їх технологічна універсальність. Вони можуть працювати як у великих промислових сонячних електростанціях, так і у малих побутових системах. Сучасні конструктивні рішення дозволяють інтегрувати сонячні панелі у фасади будівель, дахи, транспортні засоби, а також у різноманітні автономні системи

живлення. Завдяки цьому сонячна енергетика стає гнучким і адаптивним джерелом енергії, здатним працювати в широкому спектрі умов.

Незважаючи на численні переваги, сучасні сонячні модулі мають і певні недоліки, які обмежують їхнє застосування або вимагають додаткових технічних рішень. Основною проблемою залишається залежність від погодних умов та рівня сонячного випромінювання. Ефективність виробництва електроенергії зменшується у похмурі або дощові дні, а також у нічний час, коли сонячного світла немає зовсім. Це означає, що для забезпечення безперебійного енергопостачання необхідно використовувати системи накопичення енергії - акумулятори або гібридні енергетичні рішення, які поєднують сонячну енергію з іншими джерелами.

Сонячні модулі та все необхідне обладнання мають досить високу початкову вартість. Хоча за останні роки, десятиліття ціни на сонячні системи суттєво знизилися, інвестиції у їх монтаж усе ще можуть бути значними. Для приватних споживачів це означає тривалий період окупності, який може сягати від 5 до 10 років залежно від регіону, клімату та рівня інсоляції. Тим не менш у довгостроковій перспективі ці витрати компенсуються за рахунок безкоштовної енергії, що виробляється протягом багатьох років експлуатації.

Також певною проблемою є залежність ефективності сонячних модулів від температури навколишнього середовища. При значному підвищенні температури зменшується напруга на виході фотоелементів, що призводить до втрати частини виробленої енергії. У спекотних кліматичних умовах це може стати суттєвим фактором зниження продуктивності системи. Крім того, сонячні панелі потребують регулярного очищення від пилу, снігу або забруднень, які можуть блокувати сонячне світло і знижувати ефективність роботи.

До технічних обмежень можна віднести також вимоги до площі встановлення. Для отримання значних обсягів електроенергії необхідні великі відкриті поверхні, що не завжди можливо у міських умовах або на

обмежених територіях. Водночас сама конструкція панелей є досить хрупкою, що потребує обережного поводження під час транспортування та монтажу.

Окремо варто звернути увагу на питання утилізації сонячних модулів після завершення їхнього терміну служби. Хоча більшість компонентів можна переробити, процес утилізації потребує спеціалізованого обладнання та дотримання екологічних норм. Це питання набуває дедалі більшого значення у зв'язку зі зростанням кількості встановлених у світі фотоелектричних систем.

Таким чином, сучасні сонячні модулі поєднують у собі низку беззаперечних переваг, серед яких - екологічність, довговічність, надійність, енергетична незалежність і відновлюваний характер джерела енергії. Водночас вони мають і певні недоліки, пов'язані з природними обмеженнями, технічними особливостями та економічними аспектами впровадження. Однак загальна тенденція розвитку сонячної енергетики свідчить про поступове усунення цих недоліків шляхом удосконалення технологій, зростання ефективності фотоелементів та зниження вартості обладнання. У результаті сонячні модулі залишаються одним із найперспективніших напрямів розвитку енергетики, що поєднує технічний прогрес із турботою про навколишнє середовище та майбутнє планети

### **1.3. Основні типи сонячних панелей і їх технічні особливості**

Галузь сонячної енергетики швидко розвивається завдяки широкому спектру технічних рішень, що дозволяють ефективно перетворювати сонячне випромінювання в електрику. В основі будь-якої фотоелектричної системи лежать панелі, або фотоелектричні модулі, які є ключовими елементами вироблення енергії. Їхня конструкція, спосіб розміщення та принцип функціонування суттєво впливають на ефективність конверсації сонячного світла, стабільність роботи системи та її економічні показники.

Сонячні панелі діляться на стаціонарні та трекерні системи залежно від того, як вони орієнтовані до Сонця. Цей поділ має вагомe значення, оскільки

орієнтація панелей визначає кількість сонячної енергії, яку вони можуть поглинути протягом дня.

Найпоширенішим типом фотоелектричних установок є стаціонарні. Їхня особливість є в тому, що вони встановлюються під певним фіксованим кутом нахилу до горизонту та орієнтуються у напрямку, де спостерігається найбільша орієнтація фотоелектричних модулів здійснюється з урахуванням напрямку максимальної інсоляції, що для територій північної півкулі відповідає південному сектору горизонту. Кут нахилу розраховується з урахуванням широти розташування об'єкта та має на меті збільшити загальне річне надходження сонячного світла на робочу поверхню панелей.

Стаціонарні панелі кріпляться на металевих або алюмінієвих рамах, що фіксуються на дахах будівель, фасадах або на спеціальних земних опорах. Такі системи характеризуються простою установкою, низькою вартістю монтажу і відсутністю рухомих частин, що зменшує потребу в обслуговуванні. Вони характеризуються високою надійністю, стійкістю до погодних впливів і тривалим терміном експлуатації.

Стаціонарні панелі зазвичай використовуються у малих і середніх енергетичних системах, зокрема для приватних будинків, комерційних об'єктів і невеликих сонячних електростанцій. Їх головна перевага полягає у простоті експлуатації: після встановлення вони не потребують додаткового управління, а вся система працює автоматично. Недоліком стаціонарного розміщення фотоелектричних модулів є обмежена можливість адаптації до змін просторового положення Сонця протягом доби, що зумовлює неповне використання потенціалу сонячної радіації. За таких умов величина виробітку електричної енергії змінюється залежно від добового та сезонного режимів освітленості. У результаті цього стаціонарні системи зазвичай виробляють на 25–30 % менше енергії, ніж системи з динамічним орієнтуванням. [3]

Для підвищення ефективності використання сонячного випромінювання були розроблені трекерні системи, або системи з

відстеженням Сонця. Вони оснащені спеціальними механізмами, які дозволяють сонячним панелям автоматично змінювати своє положення відповідно до руху Сонця протягом дня. Принцип роботи трекера полягає в тому, що датчики або електронна система керування постійно відстежують положення Сонця на небосхилі та регулюють нахил панелі таким чином, щоб її поверхня завжди перебувала під оптимальним кутом до сонячних променів.

Існують два основні типи трекерів: одновісні та двохвісні. Одновісні трекери обертають панелі навколо горизонтальної або вертикальної осі, забезпечуючи рух за Сонцем упродовж дня - зі сходу на захід. Двохвісні трекери, окрім цього, можуть змінювати нахил панелі залежно від висоти Сонця над горизонтом, що дає змогу отримувати максимальну кількість сонячного випромінювання протягом усього року. Завдяки такому підходу трекерні системи здатні підвищувати ефективність виробництва електроенергії на 25-30 % у порівнянні зі стаціонарними установками.

Технічно трекерні установки є складнішими. Вони потребують використання електроприводів, контролерів, датчиків освітлення та систем управління, які координують рух панелей. Конструкція трекера має бути достатньо міцною, щоб витримувати додаткові навантаження від вітру та вібрацій, а також працювати стабільно за різних кліматичних умов. Для запобігання пошкодженням у разі сильного вітру сучасні трекерні системи обладнані функцією автоматичного переведення панелей у горизонтальне положення.

Перевагою трекерних систем є їхня здатність забезпечувати максимально можливий рівень генерації електроенергії. Завдяки постійному орієнтуванню на Сонце панелі отримують більшу кількість прямого сонячного випромінювання, що безпосередньо підвищує вихід електроенергії. Це робить трекери особливо ефективними в регіонах із високою сонячною активністю, де щоденна кількість годин прямого сонячного світла є значною. Крім того, такі системи сприяють більш

рівномірному виробництву енергії протягом дня, зменшуючи коливання потужності.

Водночас використання трекерних систем має і певні обмеження. Їхня складна механічна структура збільшує вартість установки та обслуговування. Необхідність періодичного технічного контролю, змащування рухомих частин і перевірки систем управління додає експлуатаційних витрат. Також трекерні системи потребують більшої площі для розміщення, оскільки панелі мають вільно рухатися без ризику зіткнення одна з одною. Саме тому такі системи частіше застосовуються у великих промислових сонячних парках, де є достатньо простору для розміщення і можливість централізованого технічного обслуговування.

Трекерні системи є логічним кроком від стаціонарних установок з точки зору технічної ефективності. Вони дозволяють максимально ефективно використовувати природне сонячне освітлення, але їх економічна доцільність залежить від конкретних умов проєкту - вартості обладнання, рівня інсоляції, площі території та доступності обслуговування. Для територій, що характеризуються середнім або зниженим рівнем випромінювання, економічна доцільність використання трекерних систем може бути менш вираженою порівняно з регіонами, де спостерігається підвищена інтенсивність інсоляції.

Тож, незалежно від типу встановлення, сучасні фотоелектричні модулі виконують одну основну функцію - перетворювати енергію Сонця на електричну енергію. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від того, як панелі орієнтовані відносно сонячного руху. Стаціонарні системи залишаються найпростішим, найдоступнішим і найбільш розповсюдженим рішенням завдяки своїй надійності й невибагливості. Трекерні ж системи уособлюють технологічний розвиток галузі, забезпечуючи вищий рівень продуктивності та енергетичної віддачі. Розвиток обох типів установок спрямований на підвищення ефективності

використання сонячного потенціалу, що є ключовою метою сучасної фотоелектричної енергетики.

#### **1.4. Особливості побудови та функціонування фотоелектричних систем**

Важливою частиною є фотоелектричні системи сучасної сонячної енергетики, оскільки вони безпосередньо перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію. Вони базуються на принципі використання фотоелектричного ефекту, відкритого ще в XIX столітті, але лише завдяки розвитку напівпровідникових технологій і матеріалознавства ця технологія отримала практичне застосування у промислових масштабах. Сучасні фотоелектричні системи складаються з складних інженерних елементів, які включають електричні, механічні та програмні компоненти, щоб забезпечити ефективне, стабільне та безпечне виробництво електроенергії.

Основна мета побудови фотоелектричної системи полягає у максимальному використанні потенціалу сонячного випромінювання для виробництва електроенергії з мінімальними втратами. Для цього система повинна бути правильно спроектована з урахуванням географічного розташування, кліматичних умов, інтенсивності сонячного випромінювання та енергетичних потреб користувача. Структурно будь-яка фотоелектрична система складається з кількох основних елементів: сонячних панелей (модулів), інвертора, контролера заряду, системи накопичення енергії (за потреби), кабельних з'єднань, захисної автоматики та конструкційного каркасу для монтажу.

Основним елементом системи є сонячна панель, що складається з набору з'єднаних між собою фотоелементів. Саме в них відбувається процес перетворення енергії світла у електричний струм. Кожен фотоелемент має напівпровідникову структуру з р-п переходом, у якому під дією сонячного випромінювання виникає різниця потенціалів. Об'єднання багатьох таких елементів послідовно або паралельно дозволяє отримати необхідну

потужність і напругу для живлення споживачів. Електричний струм, що виробляється сонячними модулями, є постійним струмом (DC), тому для його використання в побутових і промислових мережах необхідне перетворення у змінний струм (AC).

Інвертор є другим за важливістю компонентом у фотоелектричній системі для виконання цієї функції. Окрім перетворення постійного струму в змінний, він відповідає за контроль усієї установки через інтелектуальний контролер. Сучасні інвертори відстежують точку максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracking), тому вони автоматично змінюють робочі параметри системи в реальному часі. Вони також підтримують синхронізацію з мережею, контроль частоти напруги та струму, а також запобігають перевантаженню або короткому замиканню обладнання.

У тих системах, які працюють автономно або частково незалежно від зовнішньої електромережі, обов'язковим елементом є система накопичення енергії. Її основна функція полягає у зберіганні надлишків електроенергії, виробленої вдень, для подальшого використання в нічний час або під час хмарності. Зазвичай як накопичувачі використовуються акумуляторні батареї різних типів - свинцево-кислотні, літій-іонні або гелеві. Вибір типу батарей залежить від вимог до ємності, тривалості роботи, вартості та циклічності заряджання. Контроль процесу заряджання і розряджання здійснює контролер заряду, який запобігає перезарядці або глибокому розряду акумуляторів, що продовжує їхній термін служби та забезпечує стабільність роботи системи.

Система монтажу сонячних панелей є не менш важливою частиною фотоелектричного комплексу. Вона визначає не лише механічну стійкість установки, але й ефективність збору сонячної енергії. Залежно від типу конструкції використовують стаціонарні або трекерні системи кріплення. Стаціонарні каркаси фіксують панелі під певним кутом нахилу, який визначається географічною широтою і сезонними змінами положення Сонця. Вони мають просту конструкцію, високу надійність і низькі витрати на

встановлення. Трекерні ж системи дозволяють панелям автоматично змінювати своє положення відповідно до руху Сонця, що забезпечує їх оптимальне освітлення протягом дня.

Серед допоміжних компонентів фотоелектричних систем важливе місце займає захисна автоматика. Вона забезпечує безпечну роботу всієї установки, запобігаючи коротким замиканням, перевантаженням, зворотному струму або перенапругам, які можуть пошкодити обладнання. Крім того, у сучасних системах застосовуються спеціальні моніторингові пристрої, які дозволяють у реальному часі відстежувати продуктивність, температуру, напругу та інші параметри, що характеризують роботу установки. Це забезпечує можливість оперативного реагування на будь-які відхилення і підвищує загальну надійність системи.

Функціонування фотоелектричної системи відбувається за чітко визначеним принципом. Сонячне випромінювання потрапляє на поверхню панелей, де фотони світла збуджують електрони у напівпровідниковому матеріалі. Під дією внутрішнього електричного поля вони починають рухатися, утворюючи електричний струм. Отримана енергія надходить до інвертора, де перетворюється у змінний струм, після чого може бути використана для живлення електричних приладів, подана в загальну електромережу або збережена в акумуляторах. Система працює безперервно доти, доки є доступ до сонячного випромінювання. У нічний час або при нестачі освітлення живлення споживачів здійснюється з акумуляторів або мережі, якщо система має гібридну конфігурацію.

Фотоелектричні системи класифікуються за способом підключення до мережі на мережеві (grid-tied), автономні (off-grid) та гібридні. [5] Мережеві системи підключені до загальної електричної мережі і не мають акумуляторів. Вони виробляють електроенергію для власних потреб, а надлишок віддають у мережу. Автономні системи повністю незалежні від зовнішніх джерел живлення, тому обов'язково містять акумуляторні блоки. Гібридні системи поєднують переваги обох варіантів: вони можуть

працювати автономно, а при надлишку або нестачі енергії взаємодіють із мережею.

Важливою особливістю побудови фотоелектричних систем є необхідність оптимального балансування між виробленою, накопиченою та споживаною енергією. Для цього під час проектування враховуються сезонні коливання інсоляції, пікові навантаження, коефіцієнт ефективності перетворення, втрати енергії в кабелях та інверторах. Правильне розрахування цих параметрів дозволяє забезпечити стабільну та економічно вигідну роботу системи протягом тривалого часу.

### **1.5. Стаціонарні фотоелектричні системи: конструкція та експлуатаційні особливості**

Стаціонарні фотоелектричні системи є найпоширенішим типом сонячних установок завдяки простоті конструкції, надійності та тривалому терміну служби. [6] Вони працюють на основі фотоелектричного ефекту, що забезпечує безпосереднє перетворення сонячного випромінювання в електроенергію. Головною особливістю є фіксоване положення панелей, завдяки чому кут нахилу та орієнтація залишаються сталими протягом усього періоду експлуатації.

До складу стаціонарних систем входять сонячні модулі, монтажна конструкція, електротехнічні елементи, інвертор, система захисту та, за потреби, акумуляторний блок. Ключовим елементом є сонячні модулі з фотоелементами на основі кристалічного або аморфного кремнію. Панелі мають багатошарову структуру із загартованим склом, EVA-плівкою, фотоелементами та полімерною підкладкою, що забезпечує захист і довговічність.

Монтажна конструкція з анодованого алюмінію або оцинкованої сталі забезпечує надійну фіксацію панелей під оптимальним кутом, який визначається географічною широтою місцевості. Орієнтація зазвичай спрямована на південь у північній півкулі. Фіксована рама враховує

кліматичні навантаження - вітер, сніг та температурні перепади [6], а також забезпечує повітряний зазор для природного охолодження панелей.

Відсутність рухомих елементів значно спрощує експлуатацію та зменшує ризик поломок. Електрична частина системи включає кабельні з'єднання, контролери, інвертор і засоби захисту. Згенерований постійний струм перетворюється інвертором у змінний для живлення споживачів або подачі в мережу. В автономних системах надлишки енергії накопичуються в акумуляторах. Для безпеки передбачені запобіжники, автоматичні вимикачі, діодні обмежувачі та заземлення.

Основне обслуговування зводиться до очищення поверхні панелей і перевірки електричних з'єднань. Завдяки простоті, низькій вартості та модульності стаціонарні системи можна встановлювати на дахах будівель, промислових спорудах або на землі. Їх обмеженням є зниження ефективності через зміну положення Сонця протягом доби та року: річна ефективність становить близько 70–75 % від потенціалу систем із трекерами.

Незважаючи на це, стаціонарні фотоелектричні системи залишаються основним рішенням для малих і середніх об'єктів та широко застосовуються в сонячних фермах. Надійні матеріали та якісна герметизація забезпечують довговічність роботи під дією ультрафіолету, опадів, вітру та температурних коливань. У підсумку такі системи забезпечують стабільну, довговічну та економічно доцільну генерацію чистої енергії

### **1.6. Трекерні фотоелектричні системи: принцип дії та класифікація**

Трекерні фотогальванічні системи є одним з найефективніших засобів сучасного розвитку сонячної енергетики. Їхня мета полягає в підвищенні ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію шляхом автоматичного спрямування сонячних панелей у напрямку руху Сонця протягом дня. На відміну від фіксованих систем, трекерні установки можуть змінювати положення своїх модулів, щоб підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів на поверхню панелі. Це забезпечує максимальне використання прямого сонячного випромінювання, а також

збільшує загальне виробництво електроенергії на основі кліматичних і географічних умов.

Метод роботи трекерних систем базується на постійному відстеженні положення Сонця відносно поверхні Землі та динамічній корекції просторової орієнтації фотогальванічних модулів. Основна роль трекера полягає в підтримці сонячних модулів перпендикулярно до сонячних променів протягом більшої частини світлового дня. Це можливо лише завдяки механічним елементам (опорній конструкції з рухомими елементами) та електронному управлінню, де світлові датчики можуть сигналізувати трекеру зайняти певне положення або розрахувати положення Сонця на основі астрономічних алгоритмів. Звичайні компоненти трекерних установок включають опорну конструкцію, привідний механізм, систему управління, датчики позиціонування, сонячні панелі та електричні з'єднання. Система підтримується конструкцією з міцних металевих профілів, що забезпечує стабільність при зміні положення модулів.

Залежно від типу системи, привідний механізм може бути електромеханічним, гідравлічним або лінійним і обертає панелі по одній або двох осях. Дані про кут Сонця надходять до системи управління для передачі повідомлень приводам, які регулюють кут нахилу панелей. Активні та пасивні режими відстеження є основними режимами, що використовуються сучасними трекерами. Для активних систем управління здійснюється за допомогою електронних контролерів, мікропроцесорів і світлових датчиків, які вимірюють напрямок до Сонця. Система вимірює та порівнює світло на двох (або більше) датчиках і регулює положення панелей, якщо виявляє різницю, використовуючи електричні приводи. На відміну від цього, пасивні системи покладаються на фізичну поведінку матеріалів, а саме на теплове розширення газів або рідин, які, активуючись сонячним нагріванням, приводять у дію механічні важелі, що регулюють розміщення панелей.

Пасивні трекери простіші в конструкції, не потребують енергії для управління, але мають нижчу точність орієнтації. Залежно від кількості

ступенів свободи, трекерні системи поділяються на одноосні та двоосні відповідно. Одноосні трекери забезпечують обертання панелей навколо однієї осі, зазвичай горизонтальної або вертикальної. Горизонтальна вісь може використовуватися для спостереження за добовим рухом Сонця, коли воно рухається зі сходу на захід. У той час як вертикальна орієнтація використовується для встановлення кута нахилу відносно південного та північного напрямків для оптимізації. Такі системи є відносно простими, економічними та широко використовуються в промислових сонячних фермах.

Двоосні трекери можуть змінювати положення панелей одночасно по двох взаємно перпендикулярних осях – вертикальній та горизонтальній. Це означає, що не тільки відстежується добовий рух Сонця, але й компенсується сезонність висоти Сонця над горизонтом. Завдяки такій повній орієнтації поверхня панелі завжди знаходиться під найбільш ефективним кутом до сонячних променів і забезпечує максимальне виробництво енергії. Складність їхньої конструкції та висока вартість виготовлення і управління обмежують їх використання переважно для спеціалізованих та ефективних сонячних електростанцій. Існують наземні, дахові та мобільні трекерні системи, залежно від способу їх встановлення. Наземні трекери розміщуються на бетонних або гвинтових фундаментах і здебільшого використовуються у великих сонячних парках. Вони мають високу стабільність, здатність до великих панелей і зручний доступ для обслуговування.

Трекери на дахах застосовуються в малих системах, які економлять простір, водночас забезпечуючи архітектурний зв'язок з фасадами будівель. Зазвичай мобільні або портативні трекери використовуються в польових умовах для автономних енергетичних установок або військових систем. Трекери за типом приводу можуть бути електромеханічними, гідравлічними або пневматичними. Вони переважно електромеханічні за своєю природою, в яких обертання здійснюється за допомогою редукторних моторів або

лінійних актуаторів. Гідравлічні системи мають високу потужність з плавними рухами, але це вимагає високого рівня обслуговування. Пневматичні рішення рідкісні, коли йдеться про полегшення навантаження в більшості спеціальних типів, де мінімізація шуму є важливою.

Основною технічною характеристикою системи трекера є система контролю орієнтації. Вона може працювати за багатьох умов - від простого балансування світла на сенсорах до складних астрономічних алгоритмів, що базуються на його положенні в небесних координатах, даті, часі, погоді та інших параметрах. Сучасні рішення трекерів зараз використовують інтелектуальний контролер для керування рухом панелей відповідно до клімату, швидкості вітру, прогнозу погоди та необхідності мінімізувати механічне навантаження. При сильному вітрі система переміщує панелі в більш горизонтальне положення, щоб усунути опір і мінімізувати пошкодження.

Системи трекерів досить ефективні в промисловому використанні, незважаючи на їх складність. Крім того, такі системи можуть використовуватися для мінімізації зайвої площі; наявність багатьох панелей є вимогою при зростанні попиту. Одночасно експлуатація таких систем вимагає періодичного технічного огляду, перевірки механічних елементів, калібрування сенсорів та змащування рухомих частин. Це підвищує експлуатаційні витрати порівняно зі стаціонарними установками, але завдяки збільшенню генерації енергії ці витрати зазвичай компенсуються.

З точки зору функціональної класифікації, трекери поділяються на 2 категорії, відомі як індивідуальні та централізовані. Кожен модуль або секція панелей має свій привід і контролер, що забезпечує високу точність орієнтації. Централізовані системи мають єдину систему управління, яка координує велику кількість панелей одночасно. Зниження вартості установки обмежує точність позиціонування через стандартний дизайн і ряд особливостей. Фотовольтаїчні системи трекерів особливо рекомендуються в регіонах з високою сонячною активністю, де вони мають високий ступінь

впливу сонячного світла, що дозволяє максимально використовувати потенціал цих систем під прямим сонячним світлом завдяки високій сонячній активності. У хмарних умовах трекеери мають менший вплив у місцях з вищою частотою хмарних днів, оскільки розподіл світла може відбуватися більш рівномірно; розсіяне світло не пов'язане безпосередньо з інтенсивністю або кутом падіння в районах з частішими хмарними днями. У таких ситуаціях економічна ефективність може бути знижена.

Одним з ключових концептів підвищення ефективності фотовольтаїчних технологій трекеерів є забезпечення двосторонніх сонячних панелей, для додаткового використання як розсіяної, так і відбитої сонячної радіації. Додатковою характеристикою компонентів двосторонньої фотовольтаїчної системи є те, що вони можуть використовувати електричну енергію з передньої та задньої робочих поверхонь, що особливо важливо для змінних умов хмарності та для відбивних поверхонь. Це використовується разом із системами трекеерів, які можуть зменшити рівень тіні на задній стороні модулів і створити умови для збільшення загального виходу без розширення встановленої площі фотовольтаїчної установки. Таким чином, фотовольтаїчні системи трекеерів як високотехнологічні системи значно підвищують ефективність генерації сонячної енергії, орієнтуючи панелі в найбільш оптимальний спосіб. Їх принцип роботи залежить від оптимальної орієнтації щодо Сонця, що досягається за допомогою механічних, електронних та програмних систем.

Трекеери можуть бути класифіковані на кілька структурних та функціональних варіантів, що дозволяє визначити, який тип системи забезпечить найкращі умови роботи. Поряд із розвитком цифрових технологій та автоматизації, системи трекеерів представляють один із значних напрямків зростання для підвищення ефективності сонячної енергії, прокладаючи шлях до створення зеленої та стійкої енергетичної інфраструктури.

### **1.7. Порівняння ефективності стаціонарних і трекерних систем за енергетичними та економічними показниками**

Порівняння стаціонарних і трекерних фотоелектричних систем є важливим етапом оцінки ефективності використання сонячної енергії в умовах сучасного енергетичного розвитку. Обидва типи систем мають однакову мету - перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелектричного ефекту, однак способи їх реалізації суттєво відрізняються, що безпосередньо впливає як на енергетичну продуктивність, так і на економічну доцільність експлуатації.

Енергетична ефективність є ключовим показником, що визначає доцільність використання тієї чи іншої системи. Стаціонарні установки мають фіксований кут нахилу, який підбирається з урахуванням географічного розташування об'єкта та середньорічної висоти Сонця над горизонтом. Оптимізація положення панелей виконується з метою забезпечення максимальної середньої інсоляції протягом року, однак така система не здатна враховувати щоденну зміну положення Сонця. Внаслідок цього ефективність поглинання сонячного випромінювання обмежується, особливо у ранкові та вечірні години, коли кут падіння променів є значно відмінним від перпендикулярного.

У трекерних системах цей недолік усувається завдяки можливості динамічного орієнтування фотоелектричних модулів у напрямку до Сонця протягом усього дня. Це дозволяє зберігати оптимальний кут падіння променів і забезпечує більш рівномірне та тривале освітлення поверхні панелей. За рахунок цього коефіцієнт корисного використання сонячної енергії у трекерних установках зростає у порівнянні зі стаціонарними аналогами. У регіонах з високим рівнем прямого сонячного випромінювання приріст може досягати навіть 45-50 %, що суттєво підвищує загальний річний вихід електроенергії.

Одновісні трекерні системи з однією координатою можуть збільшити генерацію електроенергії на 25-30 % порівняно з фіксованими системами.

Двохвісні трекери демонструють вищі показники - у середньому на 35-45 % - завдяки здатності покривати зміни положення Сонця протягом дня та протягом сезону. Коли справа доходить до великих промислових фотоелектричних станцій, ця різниця має можливість бути значною для загальної ефективності роботи електроенергетичного комплексу.

Тим не менш, на перевагу трекерних систем впливає економічний фактор, який безпосередньо впливає на час окупності проекту. Стаціонарні системи простіші, тому їм не потрібно рухомих механізмів, датчиків чи складних програмних управлінь. Це зменшує витрати на початкове будівництво та технічне обслуговування протягом експлуатаційного періоду. Вартість монтажу стаціонарних систем є стабільною і прогнозованою, що робить їх вигідними для малих і середніх об'єктів, де важлива економія коштів та мінімальні експлуатаційні витрати.

На відміну від стаціонарних, трекерні системи потребують складнішої механічної структури, приводних пристроїв, електронних контролерів і систем позиціонування. Порівняно зі стаціонарними рішеннями, це збільшує первинну вартість установки на 20-40%. Крім того, регулярне технічне обслуговування, необхідне для перевірки приводів, калібрування датчиків та змащення рухомих частин, призводить до додаткових операційних витрат. Проте збільшення енергетичної продуктивності дозволяє компенсувати ці витрати протягом перших років експлуатації. У середньому термін окупності трекерної системи на 10-20 % більший, ніж у стаціонарної, однак за тривалого періоду експлуатації (понад 20 років) загальна економічна вигода є вищою.

Важливим чинником порівняння є рівень залежності від кліматичних умов. У регіонах із високою часткою прямого сонячного випромінювання, таких як південні області, пустельні та степові зони, трекерні системи демонструють максимальний ефект. У місцевостях із переважанням розсіяного випромінювання, наприклад, у північних широтах або регіонах із частими хмарними днями, приріст ефективності може бути незначним,

оскільки розсіяне світло потрапляє на панелі незалежно від їхнього нахилу. Таким чином, економічна доцільність встановлення трекерів у таких умовах є менш очевидною.

Ще одним показником для оцінки ефективності є коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП). Для стаціонарних систем цей коефіцієнт зазвичай становить 14-18 % у середніх широтах, тоді як для трекерних установок він може досягати 20-25 %. Це свідчить про суттєве підвищення ефективності використання встановленого обладнання при однаковій потужності сонячних панелей.

З економічного погляду доцільність впровадження трекерних систем визначається також вартістю виробленої електроенергії (LCOE - Levelized Cost of Energy). Хоча початкові капітальні витрати для трекерних систем є вищими, зниження питомої вартості виробленої енергії за рахунок підвищеної генерації компенсує цю різницю. За результатами розрахунків, середнє зниження LCOE для двохвісних систем у порівнянні зі стаціонарними може сягати 5-15 % протягом життєвого циклу установки, що робить їх привабливими для великих сонячних парків і промислових проєктів.

Важливим є питання надійності, крім економічних показників, важливим є й питання довговічності. Стаціонарні системи мають високу стабільність і мінімальний ризик поломок через відсутність рухомих деталей. Трекерні системи, у свою чергу, мають складнішу будову, тому потребують періодичного обслуговування, а їхня надійність залежить від якості приводів і систем керування. Високоякісні трекерні системи з антикорозійним захистом і сучасними актуаторами можуть працювати понад 20-25 років, однак це потребує суворого дотримання правил технічного обслуговування.

У контексті глобальної енергетичної стратегії варто відзначити, що підвищення ефективності генерації за допомогою трекерних систем сприяє зменшенню потреби у додаткових земельних площах та скороченню викидів вуглецю на одиницю виробленої енергії. Це робить трекери не лише технічно

ефективними, але й екологічно обґрунтованими рішеннями у масштабних проєктах сонячної енергетики.

Як наслідок порівняльного аналізу, стаціонарні фотоелектричні системи є більш простими, дешевими та надійними, але ж вони мають нижчу енергетичну ефективність. Трекерні системи, натомість, забезпечують істотне підвищення вироблення електроенергії, що позитивно впливає на загальну економічну ефективність проєкту в довгостроковій перспективі. Коли ви робите вибір між цими двома типами систем, ви повинні ретельно вивчити місцевий клімат, вартість обладнання, очікувану тривалість експлуатації та грошові можливості. Зрештою, трекерні фотоелектричні системи становлять більш інноваційне й енергоефективне рішення, тоді як стаціонарні залишаються оптимальним варіантом для об'єктів, де пріоритетом є простота, надійність і мінімальні трати на обслуговування.

### **1.8. Висновки до розділу 1**

Фотоелектричні технології належать до перспективних напрямів розвитку альтернативної енергетики та сприяють скороченню споживання традиційних паливних ресурсів, а також зменшенню обсягів викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря. Фотоелектричні модулі, що здійснюють пряме перетворення сонячної радіації в електричну енергію. Їхня робота ґрунтується на фотоелектричному ефекті, завдяки якому енергія світла перетворюється в електричний струм.

Сучасні сонячні модулі мають низку переваг, серед яких чисте виробництво енергії, тривалий термін служби, простота експлуатації та можливість масштабування систем від малих до промислових об'єктів. До недоліків відносяться значні початкові інвестиції, залежність від погодних умов і зниження ефективності при частковому освітленні або забрудненні модулів.

Стаціонарні системи є надійними та простими в монтажі, проте їх енергетичний потенціал обмежений через фіксоване положення панелей відносно Сонця. Трекерні установки, навпаки, дозволяють постійно

підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів, що значно підвищує генерацію електроенергії протягом доби та у різні пори року. Завдяки цьому трекерні системи демонструють більшу продуктивність та ефективність у порівнянні зі стаціонарними, що робить їх більш привабливими для масштабних промислових проєктів і регіонів із високим рівнем сонячного випромінювання.

Таким чином, незважаючи на вищі капітальні витрати та потребу у регулярному обслуговуванні, трекерні системи забезпечують максимальну ефективність використання сонячної енергії та більш швидко окупність інвестицій у довгостроковій перспективі. Вибір типу системи залежить від умов експлуатації та фінансових можливостей, проте трекерні установки є оптимальним рішенням для досягнення високої продуктивності та ефективного використання сонячного потенціалу

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ І ЇХ БУДОВА

### 2.1. Кліматичні та географічні умови Полтавського регіону

Територія Полтавської області належить до лісостепової кліматичної зони та вирізняється помірним температурним режимом і сезонною нерівномірністю сонячної радіації, що безпосередньо впливає на потенціал фотоелектричної генерації. Географічне положення регіону визначає збалансоване поєднання сонячного випромінювання, температурних коливань та кількості опадів, що створює сприятливі передумови для використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної. Територія області лежить переважно у межах лісостепової зони, що забезпечує відносну рівномірність кліматичних умов і помірну кількість хмарних днів протягом року.

Рельєф області має переважно рівнинний характер із незначними висотними коливаннями. Середні абсолютні відмітки висот становлять від 90 до 240 метрів над рівнем моря. Найвищі ділянки розташовані у північній та південно-східній частинах, тоді як долини річок Ворскли, Псела, Сули та Орелі формують природні зниження рельєфу. Рівнинна місцевість спрощує орієнтацію та розташування фотоелектричних систем, оскільки зменшує ризик затінення та дозволяє забезпечити оптимальні умови для надходження сонячного випромінювання

Клімат Полтавської області формується під впливом західних атлантичних повітряних мас і континентальних потоків зі сходу, що зумовлює значні сезонні коливання температури. Зима в регіоні помірно холодна, із середньою температурою січня  $-5...-7$  °С, а літо тепле, іноді спекотне - середня температура липня становить  $+20...+22$  °С. Абсолютний максимум температури може сягати  $+38$  °С, мінімум - до  $-30$  °С.

Середньорічна температура повітря в Полтавській області за останні десятиліття становить близько  $+8$  °С, що є типовим показником для

центральної частини України. Такий температурний режим є прийнятним для ефективного функціонування фотоелектричних систем, оскільки вони демонструють вищий коефіцієнт перетворення саме при помірних температурах навколишнього середовища.

Опадів у регіоні випадає від 520 до 580 мм на рік, переважно у вигляді дощів у теплий період року (див. рис. 2.1.) Найбільше опадів спостерігається в червні–липні, а найменше - у лютому–березні. Середня кількість днів із опадами становить 120-140 на рік, що забезпечує понад 200 днів відносно ясного або частково хмарного неба. Така структура опадів сприятлива для використання сонячної енергії, адже забезпечує високий рівень інсоляції протягом весняно-літнього періоду, коли спостерігається найбільше енергоспоживання.

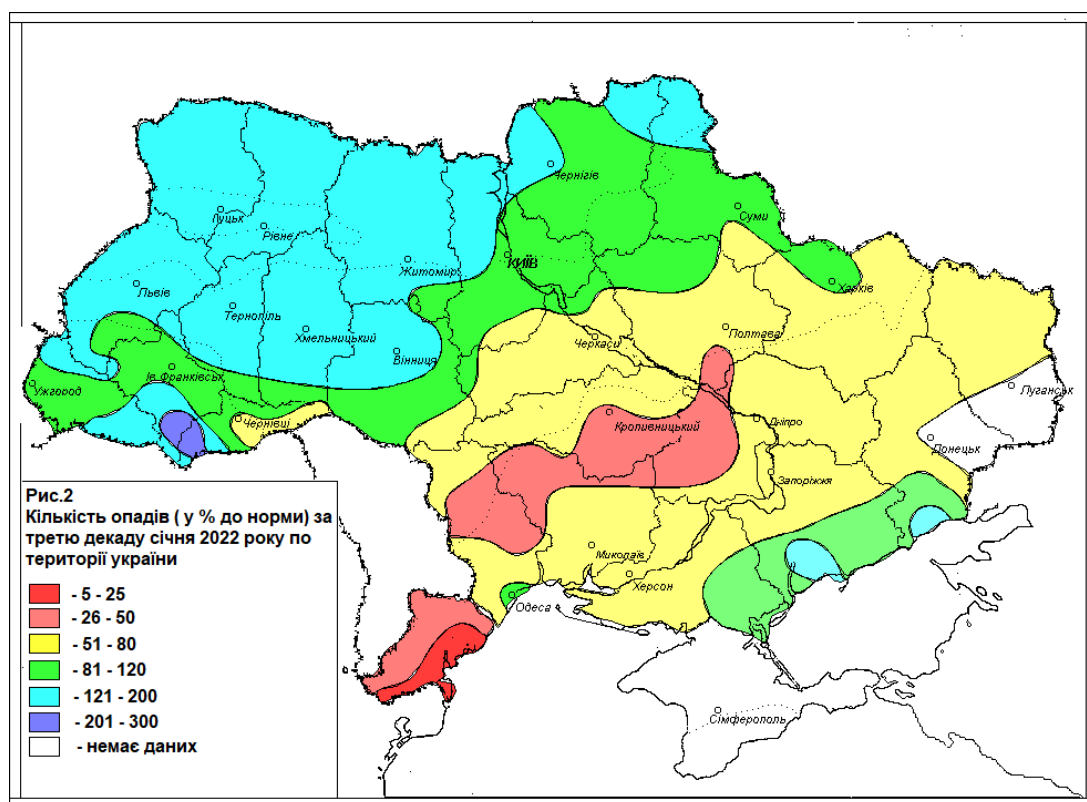


Рисунок 2.1 – Середньомісячні температури та кількість опадів у областях

Середня річна кількість сонячних годин у Полтавському регіоні становить приблизно 1800–2000 годин, що відповідає показникам центральної зони України. Найбільша тривалість сонячного випромінювання спостерігається у червні–серпні, коли вона може досягати 260–280 годин на

місяць. Узимку цей показник знижується до 40–60 годин, що є типовим для широт Полтави. Такий розподіл сонячного випромінювання визначає доцільність використання фотоелектричних систем, особливо для сезонного або комбінованого енергозабезпечення

Полтавська область характеризується помірною швидкістю вітру, що коливається в межах 3–5 м/с. Вітрова активність посилюється у холодний період року, тоді як улітку вона значно знижується. Для експлуатації фотоелектричних систем це має певне значення, оскільки надмірна швидкість вітру може впливати на механічну стійкість конструкцій, особливо трекерних систем, які мають рухомі елементи. Разом з тим помірна вітрова активність сприяє ефективному охолодженню панелей, що позитивно позначається на їхній роботі.

Ґрунти регіону переважно родючі чорноземні, з високим коефіцієнтом теплопровідності, що сприяє швидкому прогріванню поверхні у весняний період. У контексті використання фотоелектричних систем це означає можливість раннього початку енергогенерації після зимового сезону. Більшість земель у регіоні використовується в аграрному секторі, однак значні площі рівнинних територій дають змогу розміщувати наземні сонячні електростанції без істотного втручання в сільськогосподарську інфраструктуру

Наявність розвиненої електроенергетичної інфраструктури, доступність відкритих ділянок і сприятливі кліматичні умови роблять Полтавську область потенційно привабливим регіоном для розвитку фотоелектричних технологій. Особливої уваги заслуговують ділянки, розташовані поблизу транспортних артерій і ліній електропередач, що полегшує підключення малих і середніх сонячних електростанцій до загальної енергомережі.

Таким чином, кліматичні та географічні умови Полтавського регіону можна вважати сприятливими для впровадження фотоелектричних технологій. Помірна кількість опадів, велика тривалість сонячного

випромінювання та достатня сумарна сонячна радіація створюють передумови для ефективної роботи як стаціонарних, так і трекерних сонячних систем. Ці фактори визначають доцільність подальшого дослідження ефективності фотоелектричних установок у регіональних умовах та оцінки потенціалу підвищення енерговіддачі завдяки застосуванню трекерних механізмів

## 2.2. Рівень сонячної освітленості та потенціал фотоелектричного перетворення енергії

Ключовою вихідною характеристикою для оцінювання можливостей фотоелектричної генерації є інсоляційний режим території.[10] Для Полтавської області, що розташована в центральній частині України, характерні відносно сталі значення надходження сонячної радіації впродовж року. Річна сума енергії на горизонтальну поверхню становить орієнтовно 1100-1250 кВт·год/м<sup>2</sup>, [9] що формує практично значущий потенціал для розвитку фотоелектричних систем (див. рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Рівень сонячної інсоляції на території України

Найбільша кількість сонячного випромінювання спостерігається в літній період (травень–серпень), коли тривалість світлового дня сягає 16-17 годин, а середня щоденна інсоляція становить близько 5,8-6,1 кВт·год/м<sup>2</sup>. [10] Узимку ці показники знижуються до 1,3-1,7 кВт·год/м<sup>2</sup>, що пояснюється зменшенням кута падіння сонячних променів і збільшенням хмарності. Така сезонна нерівномірність енергопостачання є одним із головних обмежень для стаціонарних фотоелектричних систем, оскільки їхній фіксований кут нахилу не дозволяє ефективно використовувати енергію в періоди низького положення Сонця.

Трекерні системи, які здатні динамічно змінювати орієнтацію панелей, мають перевагу саме в таких кліматичних умовах. У перехідні періоди року - ранньою весною та восени - коли сонце знаходиться під відносно малими кутами до горизонту, використання трекера дає змогу збільшити рівень опромінення панелей до 25-35 % порівняно зі стаціонарними системами. Це відображається не лише в збільшенні добового виробітку, а й у більш рівномірному енергетичному профілі системи, що є особливо важливим для автономних об'єктів.

Варто зазначити, що освітленість змінюється не лише сезонно, а й протягом доби. У ранкові та вечірні години сонячні промені падають під гострим кутом, і їхня інтенсивність значно менша. У цей час стаціонарні панелі майже не виробляють енергії, тоді як трекерна система орієнтується на Сонце, зберігаючи високу продуктивність. В умовах Полтавського регіону це забезпечує додаткові 1,2-1,5 години активної генерації енергії на добу, що має помітний вплив на річний енергетичний баланс

Важливою особливістю Полтавщини є наявність значного відсотка днів із частковою хмарністю - у середньому 40-45 % від загальної кількості днів року. Хоча в такі дні пряма складова сонячного випромінювання зменшується, дифузна компонента залишається достатньо високою для роботи фотоелектричних панелей. Трекерні системи мають можливість оптимізувати кут орієнтації навіть за розсіяного освітлення, що дозволяє

мінімізувати втрати енергії в періоди неповної ясності. Це ще раз підкреслює їхню перевагу в реальних кліматичних умовах центральної України.

На потенціал перетворення сонячної енергії також впливають геометричні параметри - азимут і кут нахилу поверхні панелей. Для Полтавської області оптимальний фіксований кут становить приблизно  $35^\circ$ , а орієнтація - на південь із допустимим відхиленням до  $\pm 10^\circ$ . [11] Проте цей кут є компромісним і не забезпечує максимальної енерговіддачі в усі сезони. Трекерні системи, особливо двовісні, усувають цю проблему, утримуючи панелі під оптимальним кутом до сонячного диску протягом усього року.

Дослідження показують, що в умовах Полтавської області щорічна енерговіддача з 1 кВт встановленої потужності становить близько 1250-1300 кВт·год для трекерної системи та лише 950-1000 кВт·год для стаціонарної. [12] Ця різниця, на перший погляд незначна, у масштабі сонячної електростанції потужністю 100 кВт забезпечує додаткову генерацію близько 30 000 кВт·год на рік, що еквівалентно скороченню викидів CO<sub>2</sub> на понад 25 тонн щорічно.

### **2.3. Розрахунок енергетичного споживання житлового будинку**

Для забезпечення коректного вибору конфігурації фотоелектричної системи необхідно на початковому етапі визначити загальне річне електроспоживання житлового будинку. Розрахунок виконується шляхом підсумовування потужностей усіх електроприладів [13] та множення їх на фактичну тривалість роботи протягом року. Такий підхід дозволяє отримати реалістичну оцінку навантаження та правильно підібрати потужність інвертора, ємність акумуляторної батареї та кількість сонячних панелей.

У таблиці 2.1 наведено перелік основних побутових споживачів, їхню номінальну потужність, орієнтовний час роботи та підсумкове річне споживання енергії. До розрахунку також додано споживання електроенергії самою трекерною системою, оскільки наявність електроприводів, контролерів та механізмів позиціонування впливає на загальні енергетичні потреби [14]

Таблиця 2.1- Споживання електроенергії на протязі року

Назва	Кількість, шт.	Потужність приладу, Р, Вт	Загальна потужність, Р <sub>Σ</sub> , Вт	Час роботи, годин за рік	кВт·год/ рік
Лампа світлодіодна	25	10	250	3640	910,0
Холодильник	1	150	150	8320	1 248,0
Комп'ютер	1	250	250	2000	500,0
Мікрохвильо вка	1	1000	1000	300	3 000,0
Телевізор	2	100	200	2100	420,0
Електрична духовка	1	3000	3000	400	1 200,0
Пральна машина	1	1500	1500	180	270,0
Праска	1	2000	2000	180	360,0
Бойлер	1	1500	1500	1300	1 950,0
Фен	1	1000	1000	300	300,0
Чайник	1	1500	1500	200	300,0
Варочна поверхня	1	3000	3000	500	1 500,0
Трекерна система	1	1000	1000	5 000	5 000,0
<b>Всього:</b>		15 780	16 270		16 958,0

Аналіз представлених даних показує, що найбільший внесок у споживання електроенергії мають холодильне обладнання, електрична духовка, бойлер, варильна поверхня та трекерна система. Ці прилади

працюють або тривалий час, або мають значну миттєву потужність. Натомість дрібні побутові пристрої вносять меншу частку в річний енергобаланс, проте у сукупності також формують відчутні витрати

Обрахунки будуть вестись враховуючи, що

$$W = 16\,958 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Щоб визначити необхідну потужність постійного струму, почнемо з множення загальної потужності змінного струму  $W$  на коефіцієнт  $k = 1,2$ , враховуючи опір інвертора:

$$W_H = W \cdot k \quad (2.1)$$

Отже, необхідна потужність постійного струму з врахуванням опору інвертора становить:

$$W_H = 16\,958 \cdot 1,2 = 20\,350 \text{ кВт год/рік}$$

#### **2.4. Розрахунок необхідної потужності фотоелектричної системи**

Розрахунок необхідної встановленої потужності фотоелектричної системи виконується на підставі скоригованої річної потреби в електроенергії та кліматичних характеристик місцевості. Для подальшого проектування приймаємо скориговану річну потребу системи, що враховує типові системні втрати та експлуатаційні резерви, як  $W_H = 20\,350 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ . Ця величина використовується як орієнтир для визначення мінімальної встановленої потужності масиву, що в умовах Полтавщини має забезпечити покриття річного енергоспоживання з урахуванням втрат. Для оцінки потенціалу генерації у конкретному регіоні використовують параметр сумарних еквівалентних пікових сонячних годин  $H_p$ . За кліматичними даними для Полтавської області приймаємо  $H_p = 1934 \text{ год/рік}$  (еквівалент приблизно 5,3 пікових годин на добу). Окрім цього, при оцінці продуктивності системи вводиться коефіцієнт продуктивності  $PR$ , який агрегує втрати інвертора, втрати кабелів, ефект підвищеної температури

модулів, запилення тощо. Для трекерної системи з урахуванням її покращених режимів експлуатації обираємо значення  $PR = 0.85$ .

Встановлена потужність фотоелектричної системи визначається співвідношенням:

$$P_{\text{ФЕС}} = \frac{W_{\text{н}}}{H_{\text{р}} \cdot PR}. \quad (2.2)$$

Підставляючи прийняті значення, одержуємо:

$$P_{\text{ФЕС}} = \frac{20\,350}{1\,934 \cdot 0.85} = \frac{20\,350}{1\,643.9} \approx 12.38 \text{ кВт.}$$

Отже, орієнтовна встановлена потужність, яка забезпечить покриття скоригованої річної потреби в умовах Полтавської області з урахуванням властивостей трекерної системи та типових втрат, складає приблизно 12,4 кВт. Це значення є проектним орієнтиром і надалі буде уточнюватися під час підбору конкретних компонентів та оптимізації стрінгової схеми.

Для попередньої оцінки масштабу масиву можливо визначити приблизну кількість фотоелектричних модулів за формулою:

$$N = \frac{P_{\text{ФЕС}}}{P_{\text{мод}}}, \quad (2.3)$$

де  $P_{\text{мод}}$ - номінальна потужність одного модуля в кВт. За сучасними технічними рішеннями для побутових та малих комерційних систем доцільно розглядати високопотужні біфасціальні модулі з номінальною потужністю в діапазоні 0.60–0.63 кВт. Для орієнтовного підрахунку отримуємо два приклади: при  $P_{\text{мод}} = 0.63 \text{ кВт}$

$$N = \frac{12.38}{0.63} \approx 19.65 \Rightarrow 20 \text{ модулів (округлено),}$$

при  $P_{\text{мод}} = 0.60 \text{ кВт}$

$$N = \frac{12.38}{0.60} \approx 20.63 \Rightarrow 21 \text{ модуль.}$$

Ці орієнтовні значення кількості модулів слугують лише для попередньої оцінки просторових, механічних та електричних вимог до системи; остаточна кількість визначатиметься при проектуванні під конкретний інвертор, урахуванні допустимих робочих напруг і струмів, а також конструкційних обмежень самого трекера.

Для перевірки коректності отриманого значення застосовується зворотний розрахунок річної генерації:

$$E_{\text{річ}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot H_{\text{р}} \cdot PR. \quad (2.4)$$

Підставлення знайденої потужності дає:

$$E_{\text{річ}} = 12.38 \cdot 1\,934 \cdot 0.85 \approx 20\,350 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік},$$

що відповідає прийнятому орієнтирному  $W_{\text{н}}$  та підтверджує адекватність проектного значення встановленої потужності. Важливо підкреслити, що наведений розрахунок є попереднім. Остаточний розрахунок та підтвердження параметрів будуть виконані на етапі детального проектування з урахуванням фактичних паспортних даних обраних модулів, їхніх температурних коефіцієнтів, реальної орієнтації монтажу, обраного типу трекера (одновісний/двовісний), а також після розрахунку конфігурації стрінгів в межах МРРТ-діапазонів обраного інвертора. Саме тому подальші підрозділи розділу 2 будуть присвячені технічним параметрам обраних компонентів та уточненню електричної архітектури системи, а остаточне числове узгодження та перевірка відповідності будуть відображені у розділі про формування конфігурації масиву

## **2.5. Вибір сонячних панелей для трекерної системи**

Підбір фотоелектричних модулів для трекерної конфігурації доцільно виконувати з урахуванням не лише електричних параметрів, але й вимог до конструктивної витривалості. У трекерних системах модулі працюють у змінних просторових положеннях, тому до них висуваються підвищені вимоги щодо жорсткості, стійкості до циклічних навантажень та збереження

стабільності характеристик за температурних впливів. Водночас коректно підібраний модуль дозволяє реалізувати переваги орієнтації на Сонце протягом дня та отримати приріст генерації. Отже, вибір панелей має бути узгоджений з параметрами трекерної платформи та умовами експлуатації у Полтавському регіоні

Основні вимоги до сонячних панелей для трекерної системи включають підвищену механічну стійкість до циклічних змін положення, низький температурний коефіцієнт потужності, високий коефіцієнт корисної дії при прямому сонячному випромінюванні, а також можливість роботи в умовах відбитої радіації. З цієї точки зору найбільш доцільно використовувати сучасні монокристалічні панелі на основі n-type TOPCon-технології у виконанні «double glass». Такі модулі характеризуються низькою деградацією, підвищеною жорсткістю та кращою стабільністю характеристик при високих температурах, що особливо актуально для двовісних трекерів, у яких панелі проводять значну частину дня під прямим сонячним опроміненням.

З огляду на це, для формування фотоелектричного масиву у трекерній системі обрано модуль JA Solar JAM72D42-630/LB, який відповідає вимогам високоефективних фотоелектричних установок та забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю, довговічністю та механічною надійністю. Модуль виконано за технологією TOPCon n-типу, що забезпечує підвищену ефективність перетворення енергії, низькі температурні втрати та стійкість до PID- та LID-деградації. Двостороння (bifacial) конструкція модуля дає змогу отримувати додаткову енергію від задньої поверхні, що є суттєвою перевагою саме у трекерних системах, де панелі встановлюють вище за рівень землі, а робота під різними кутами створює кращі умови для відбитого випромінювання з ґрунту або спеціальних відбивних поверхонь.

Для забезпечення високої надійності в умовах динамічних механічних навантажень, які виникають під час роботи трекера, панель виготовлена у виконанні «double glass» - із двома шарами загартованого скла замість

традиційної полімерної задньої плівки. Така конструкція підвищує жорсткість модуля, зменшує ризик утворення мікротріщин та забезпечує стабільність параметрів протягом десятиліть експлуатації. Крім того, подвійне скло робить модуль стійкішим до надмірних температурних циклів, що характерні для роботи панелей під прямою інсоляцією, особливо влітку.

Електротехнічні параметри модуля JA Solar JAM72D42-630/LB дозволяють забезпечити сумісність з більшістю сучасних інверторних систем, що працюють у діапазоні MPPT від 200 до 850 В. Робоча напруга в точці максимальної потужності становить близько 42-46 В, а струм – 13-15 А, що є типовими значеннями для високопродуктивних панелей класу 630 Вт. Модуль підтримує роботу у системах до 1500 В DC, що дає змогу проектувати довші стрінги, зменшуючи кількість паралельних з'єднань, втрати на провідниках і вимоги до кабельного перерізу. Механічна міцність панелі підтверджена сертифікованими навантаженнями 5400 Pa спереду та 2400 Pa ззаду, що є важливим фактором для експлуатації на відкритому трекері під дією вітрових навантажень у різних положеннях.

Характеристики обраної сонячної панелі наведено в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Основні технічні характеристики модуля

Параметр	Значення
Номінальна потужність, $P_{max}$	630 W
Ефективність модуля	~21-22.5 %
Робоча напруга ( $V_{mp}$ )	≈ 42-46 V
Робочий струм ( $I_{mp}$ )	≈ 13-15 A
Напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ )	≈ 50–56 V

Продовження таблиці –2.2 – Основні технічні характеристики модуля

Максимальна робоча напруга системи	1500 V DC
Розміри модуля	~2465 × 1134 × 35 мм
Вага	~34–35 кг
Навантаження (переднє/заднє)	5400 Pa / 2400 Pa
Температурний коефіцієнт потужності	близько –0.35...–0.40 %/°C

Обрана панель забезпечує високу енергоефективність у поєднанні з трекерною системою. Біфасціальний дизайн дозволяє отримати додаткову генерацію в межах 5–12 % за рахунок відбитого випромінювання, яке в умовах Полтавської області є достатнім завдяки переважно світлим ґрунтам у весняно-літній період. Висока міцність конструкції та довготривала гарантія на вихідну потужність роблять цей модуль оптимальним вибором для систем, де панелі перебувають у постійному русі та зазнають навантажень, що змінюються залежно від положення трекера.

Таким чином, вибір модуля JA Solar JAM72D42-630/LB дозволяє забезпечити ефективну, довговічну та безпечну роботу трекерної фотоелектричної системи, враховуючи кліматичні умови Полтавської області, розрахункову потребу в потужності та специфіку механічних навантажень, характерних для трекерних платформ. У подальших підрозділах буде виконано підбір інверторного обладнання та акумуляторної батареї відповідно до характеристик обраних модулів

## **2.6. Вибір інвертора та визначення його технічних параметрів**

Після визначення необхідної потужності фотоелектричної системи та вибору типу сонячних панелей, наступним кроком є вибір інвертора - пристрою, що забезпечує узгоджену роботу фотоелектричного масиву з електромережею та побутовими навантаженнями. На цьому етапі важливо не лише підібрати інвертор із відповідною номінальною потужністю, а й

врахувати особливості формування напруги й струму у стрінгах трекерної системи, а також забезпечити стабільну роботу за умов змінної інсоляції, характерної для Полтавського регіону. Оскільки трекерна система забезпечує підвищені показники виробітку протягом дня, саме інвертор визначає, чи зможе система повністю реалізувати цей потенціал без втрат через обмеження потужності (clipping) або неузгодженість у роботі MPPT-контролерів.

З урахуванням того, що в системі застосовуються двосторонні сонячні модулі **JA Solar JAM72D42-630/LB**, формуємо стрінг із 20 панелей, що дозволяє максимально ефективно використовувати можливості двовісного трекера. Для визначення параметрів інвертора спочатку обчислюємо напругу холостого ходу стрінга:

$$V_{oc,string} = V_{oc} \cdot N \quad (2.5)$$

де

$V_{oc} = 55$  В - напруга холостого ходу одного модуля,

$N = 20$  - кількість панелей у стрінгу.

$$V_{oc,string} = 55 \cdot 20 = 1100 \text{ В}$$

Таким чином, інвертор повинен підтримувати вхідну напругу не менше 1100 В. Це важливо і з точки зору сезонних температурних коливань: взимку, при зниженні температури панелі до  $-15 \dots -20$  °С, напруга  $V_{oc}$  зростає приблизно на 5–7 %, тому запас за допустимою напругою є обов'язковим.

Розрахуємо робочу напругу стрінга в точці максимальної потужності:

$$V_{mp,string} = V_{mp} \cdot N \quad (2.6)$$

де

$V_{mp} = 44$  В - середнє значення робочої напруги одного модуля.

$$V_{mp,string} = 44 \cdot 20 = 880 \text{ В}$$

Це значення має знаходитись у робочому діапазоні МРРТ інвертора. Для трекерної системи важливо, щоб діапазон МРРТ був широким (від 150–200 до 900–1000 В), адже орієнтація панелей постійно змінюється, а разом з нею змінюється і напруга в робочій точці.

Окрему увагу потрібно приділити відношенню потужності фотоелектричного масиву до номінальної потужності інвертора. Для трекерних систем рекомендоване відношення:

$$\frac{P_{PV}}{P_{inv}} = 1.1 \dots 1.3$$

оскільки рівномірніша генерація та підвищений ранковий і вечірній виробіток дозволяють уникати пікових перенавантажень інвертора.

Сумарна пікова потужність панелей:

$$P_{PV} = 630 \cdot 20 = 12,6 \text{ кВт}$$

Тому оптимальна номінальна потужність інвертора:

$$P_{inv,opt} \approx \frac{P_{PV}}{1.15} \approx \frac{12.6}{1.15} \approx 11 \text{ кВт}$$

Отже, інвертор у діапазоні 10–12 кВт є оптимальним для даної трекерної системи.

Беручи до уваги технічні вимоги, особливості клімату Полтавського регіону та вибрані фотоелектричні модулі, доцільним рішенням є використання трифазного мережевого інвертора **Huawei Sun2000-12KTL-M5**. Він має широкий діапазон МРРТ, високу сумісність із панелями потужністю понад 600 Вт, високий ККД та достатній запас за максимальною вхідною потужністю.

Основні технічні характеристики інвертора представлені у таблиці

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики інвертора

Параметр	Значення
Номінальна вихідна потужність	12 кВт
Максимальна вхідна потужність PV	до 18–20 кВт
Максимальна напруга DC	1100 В
Діапазон МРРТ	140–980 В
Кількість МРРТ	2
Макс. струм на МРРТ	26 А + 13 А
ККД інвертора	98,4 %
Тип інвертора	мережевий, трифазний

Перевіримо відповідність стрінга вимогам інвертора.

Розрахована робоча напруга:

$$880 \text{ В} \in [140; 980] \text{ В}$$

що підтверджує сумісність із діапазоном МРРТ.

Максимальна напруга:

$$1100 \text{ В} = V_{\max, DC}$$

допустима, але вимагає врахування температурного підвищення  $V_{oc}$ , через що у фінальному варіанті стрінг міститиме 19–20 модулів. Це не впливає на загальний вибір інвертора, але забезпечує його безпечну роботу.

Таким чином, обраний інвертор повністю відповідає технічним параметрам фотоелектричного масиву та умовам експлуатації. Його застосування дозволить ефективно реалізувати переваги трекерної технології, забезпечуючи високу стабільність генерації та мінімальні енергетичні втрати протягом усього року

## 2.7. Вибір акумуляторної батареї та розрахунок її ємності

Оскільки фотоелектрична станція функціонуватиме з трекерною системою, яка значно розширює робочий інтервал генерації, надзвичайно важливо забезпечити можливість накопичення виробленої енергії та її подальшого використання у години мінімальної сонячної активності. Для цього формується акумуляторний модуль, здатний компенсувати добові коливання навантаження та забезпечити безперервність електропостачання в автономному режимі. Тому вибір батареї здійснюється не лише за принципом “покрити одну добу споживання”, а й відповідно до реального режиму роботи станції, погодних умов та характеристик обраного інвертора.

Для подальших розрахунків важливо визначити середньодобове споживання енергії домогосподарства. З урахуванням річної потреби, отриманої у попередньому пункті, добове споживання становить:

$$W_{\text{доб}} = \frac{W_{\text{рік}}}{365} \quad (2.7)$$

$$W_{\text{доб}} = \frac{20\,350}{365} \approx 55,75 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Це значення відображає обсяг енергії, який система має забезпечити протягом доби, незалежно від погоди. Трекер дозволяє покривати значну частину цього навантаження у реальному часі, однак ввечері, вночі та у періоди несприятливої хмарності саме акумуляторна батарея є основним джерелом живлення. Тому її ємність повинна відповідати добовій нормі споживання. [15]

Оскільки реальна доступна енергія акумулятора залежить від допустимої глибини розряду (DoD), номінальна ємність визначається з урахуванням коефіцієнта використання. Для сучасних літій-залізо-фосфатних АКБ (LiFePO<sub>4</sub>), які характеризуються високим ресурсом, приймається DoD = 0,85.

$$C_{\text{ном}} = \frac{W_{\text{доб}}}{D \cdot D} \quad (2.8)$$

$$C_{\text{ном}} = \frac{55,75}{0,85} \approx 65,6 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Отримана величина є мінімальною номінальною ємністю акумуляторного масиву для забезпечення стабільної роботи системи протягом доби. Важливо враховувати, що для регіонів з чітко вираженим зимовим періодом, як Полтавська область, реальний запас енергії має бути дещо більшим - взимку трекерна система хоч і покращує інсоляцію, але різниця між зимою та літом залишається суттєвою.

З огляду на характеристики інвертора Huawei Sun 2000-12KTL-M5, який підтримує роботу з високовольтними акумуляторними системами, оптимальним вибором є модульні батареї **Huawei** серії **Luna2000**, що дозволяють гнучко масштабувати ємність. Один батарейний блок на три модулі забезпечує 15 кВт·год корисної ємності. Система дозволяє каскадувати до 6 блоків.

Необхідна кількість блоків визначається так:

$$N_{\text{блоків}} = \frac{C_{\text{ном}}}{15} \quad (2.9)$$

$$N_{\text{блоків}} = \frac{65,6}{15} \approx 4,37$$

Оскільки використання частини блока неможливе, обираємо найближче більше ціле значення:

$$N_{\text{блоків}} = 5$$

Фактична ємність акумуляторної системи становитиме:

$$C_{\text{факт}} = 5 \cdot 15 = 75 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Така конфігурація забезпечує не лише повне покриття добового споживання, але й створює додатковий резерв, необхідний у зимовий період та в дні з мінімальною генерацією. Це також дозволяє зменшити глибину циклів, що значно збільшує термін служби акумуляторної системи.

Основні характеристики обраної батареїної системи наведені у таблиці:

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики акумуляторної батареї

Параметр	Значення
Тип	LiFePO <sub>4</sub>
Модель	Huawei Luna2000
Кількість блоків	5
Корисна ємність одного блоку	15 кВт·год
Загальна ємність системи	75 кВт·год
Робоча напруга	350–500 В
Максимальна DoD	85–90 %
Орієнтовний ресурс	понад 6000 циклів
Сумісність з інвертором Sun 2000	повна

Таким чином, акумуляторний комплекс забезпечує необхідний рівень енергетичної автономності, підтримує сумісність з обраним інвертором та здатний працювати у широкому температурному діапазоні, що є критично важливим для кліматичних умов Полтавщини. Створений запас ємності дозволяє гарантувати стабільну роботу трекерної фотоелектричної системи незалежно від сезонних коливань та забезпечує ефективне використання енергії, виробленої сонячними панелями

## **2.8. Формування електричної структури та вибір трекерної системи**

Після визначення основних параметрів фотоелектричної станції та вибору ключових елементів - сонячних модулів, інвертора та акумуляторної батареї - необхідно сформуванати узгоджену електричну структуру, яка забезпечить ефективну роботу всієї системи в режимі реального часу.

Оскільки в даному проєкті застосовується двоосьовий трекер, його вибір та інтеграція мають особливе значення, адже саме цей елемент визначає характер роботи фотоелектричного поля та впливає на усі електричні параметри станції.

На основі попередніх розрахунків фотоелектрична система складається з 20 панелей JA Solar JAM72D42-630/LB потужністю 630 Вт кожна, що встановлюються на механізм двоосьового відстеження. Для формування електричної схеми необхідно визначити послідовність і спосіб з'єднання панелей, робочий діапазон напруги та струмів, а також забезпечити відповідність цих значень параметрам інвертора Huawei Sun 2000-12KTL-M5. Зважаючи на те, що цей інвертор має два входи MPPT з допустимою напругою до 1100 В та робочим діапазоном 200–980 В, групування панелей у стрінги має бути виконано таким чином, щоб напруга в точці максимальної потужності залишалася в межах робочого діапазону інвертора протягом усього року.

Двоосьова трекерна система суттєво змінює характер роботи фотоелектричного масиву порівняно зі стаціонарною конструкцією, оскільки кут падіння сонячного випромінювання на модулі залишається близьким до оптимального протягом усього світлового дня. Це призводить до стабільно вищої напруги на стрінгах, більш рівномірного профілю струму та зниження ймовірності виникнення локальних втрат через нерівномірне освітлення. Для забезпечення цих умов обрано двоосьову трекерну систему із незалежними приводами по осях азимуту та висоти, що дозволяє максимально використовувати потенціал bifacial-модулів у ранкові та вечірні години.

Вибір конкретної трекерної конструкції ґрунтується також на механічних вимогах, пов'язаних з масою обраних панелей, їхньою площею та вітровим навантаженням. Панелі JA Solar JAM72D42-630/LB є модулями з подвійним склом і підвищеною жорсткістю, що дозволяє використовувати їх на поворотних механізмах без додаткових підсилюючих рам. Для такої конфігурації оптимальним є використання комплектної системи **Двовісного**

**сонячного трекера STS DualAxis Pro** (або аналогічної моделі), яка допускає встановлення до 20 модулів формату 72-cell та оснащена контролером астрономічного наведення з корекцією за датчиком освітленості. Система має електричні приводи з низьким споживанням - у середньому до 1 кВт·год на добу при стандартних режимах роботи, що дозволяє мінімізувати енергетичні втрати в структурі ФЕС.

Трекерна система забезпечує рух у двох незалежних площинах:

- **за азимутом**, що дозволяє відстежувати добовий рух Сонця зі сходу на захід;
- **за висотою сонця**, що забезпечує оптимальний кут нахилу впродовж року та адаптацію до сезонних змін інсоляції.

Алгоритм керування трекером базується на астрономічних формулах визначення положення Сонця, що дозволяє уникнути помилок, пов'язаних із короткочасними змінами освітленості (наприклад, при переміщенні хмар). Положення Сонця розраховується на основі визначених координат місцевості, часу доби та дня року. Вищу точність забезпечують рівняння:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \left( \frac{360^\circ(284+n)}{365} \right) \quad (2.10)$$

$$h = \arcsin (\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (2.11)$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{-\sin \omega}{\tan \delta \cdot \cos \varphi - \sin \varphi \cdot \cos \omega} \right) \quad (2.12)$$

де

$\delta$  - сонячна деклінація (кут між променями Сонця і площиною земного екватора),

$h$  - висота Сонця над горизонтом,

$\alpha$  - азимут Сонця,

$\varphi$  - широта місцевості (для Полтавщини  $\approx 49,2^\circ$ ),

$\omega$  - часовий кут, пов'язаний із місцевим сонячним часом.

$n$  - номер дня в році

$23,45^\circ$  - нахил осі обертання Землі

Число 284 у формулі - це емпірична поправка, пов'язана з річним рухом Землі навколо Сонця

Контролер трекара використовує ці значення для обчислення коректного положення масиву і підтримує його із точністю до  $\pm 0.5^\circ$ , що дозволяє отримати максимально можливий рівень інсоляції.

Формування електричної структури системи також передбачає вибір способу підключення приводів трекара. Оскільки споживання приводу є невеликим і має імпульсний характер, він підключається до низьковольтної шини інвертора через окремий захисний автомат. Це дозволяє забезпечити безпеку роботи, спростити діагностику та не навантажувати високовольтну сторону системи.

Таким чином, сформована електрична структура складається з таких ключових елементів: масив з 20 панелей JA Solar на двоосьовому трекарі STS DualAxis Pro, інвертор Huawei Sun2000-12KTL-M5, акумуляторний комплекс Huawei Luna 2000 сумарною ємністю 75 кВт·год, захисні та комутаційні пристрої, а також контролер керування трекаром. Така конфігурація забезпечує максимальну продуктивність у різні пори року, мінімізує втрати енергії та дозволяє отримати на 25–30 % більше електроенергії порівняно зі стаціонарними системами, що стане предметом детального аналізу у наступних розділах.

## **2.9. Детальна конструкція, вибір та функціональна архітектура двоосьової трекачної системи**

Після формування електричної конфігурації фотоелектричної установки доцільно деталізувати механічну та керуючу частини двоосьового трекара з урахуванням умов експлуатації у Полтавській області. Вибір трекачної системи впливає на точність просторової орієнтації модулів, очікуваний приріст генерації та стабільність роботи, а відтак — і на підсумкові економічні показники. У межах підрозділу розглядаються конструктивні елементи, механізми руху, принципи керування та обґрунтовується вибір моделі трекара для проектованої ФЕС.

Конструктивна база та опорний модуль трекера:

Фундамент трекерної системи сформований на основі буронабивної армованої опори діаметром від 350 до 450 мм, що забезпечує необхідну стійкість до вітрових навантажень згідно з нормативами ДБН В.1.2-2:2006. Головна вертикальна колона виготовлена зі сталеві гарячоцинкованої труби товщиною стінки 8–12 мм, що дозволяє забезпечити довговічність та мінімізацію деформацій у процесі роботи.

У верхній частині колони встановлено азимутальний поворотний вузол, який формує першу ступінь свободи - обертання навколо вертикальної осі. Цей вузол складається з підшипникової системи, захищеної за стандартом IP65, що гарантує роботу в умовах пилу, опадів та різких перепадів температур. Кут обертання становить від  $-120^\circ$  до  $+120^\circ$ , що дозволяє системі максимально точно відстежувати добовий рух Сонця.

Похиловий механізм і несуча ферма:

Другу ступінь свободи забезпечує похиловий механізм, виконаний у вигляді шарнірної траверси з лінійним електромеханічним актуатором. Діапазон нахилу становить від  $-5^\circ$  до  $+90^\circ$ , що дозволяє точно орієнтувати площину модулів на Сонце в будь-який сезон. Актуатор оснащений кінцевими вимикачами, резистивною шкалою положення та захистом від перевантаження.

Несуча ферма, на якій розташовується масив із двадцяти модулів JA Solar JAM72D42-630/LB, створена з полегшених сталевих профілів та посиленних вузлів кріплення. Оскільки модулі є двосторонніми, конструкція мінімізує затінення їх задньої частини, що дозволяє збільшити ефективність за рахунок відбитого випромінювання (albedo effect).

Для локальної корекції положення використовується система фотодатчиків, розташованих на верхній частині трекера, які дозволяють компенсувати ефект хмар, розсіяного світла та змінної інсоляції. Така комбінація алгоритмічного та сенсорного керування забезпечує точне наведення навіть за складних атмосферних умов.

Підсистема живлення та безпеки:

Приводи трекера працюють від низьковольтної шини постійного струму, яка живиться через окремий DC/DC-модуль інвертора. Середнє добове споживання електроенергії становить 1–1.2 кВт·год, що є незначним у порівнянні з приростом генерації (30–45 %).

Система оснащена:

- вітровим датчиком,
- датчиком вібрації,
- аварійним режимом горизонтального положення (stow mode),
- функцією автоматичного блокування при технічному обслуговуванні.

Вибір конкретної моделі трекера для проєкту:

Для побудованої архітектури ФЕС доцільним є використання комплексу:

DAS-T20 Dual-Axis Solar Tracker (UkrSolarTech, Україна)

Основні переваги:

- розрахований на масив до 20 модулів формату 72-cell (повністю сумісний з JA Solar 630 W);
- діапазон повороту по азимуту  $\pm 120^\circ$ ;
- діапазон нахилу  $-5^\circ \dots +90^\circ$ ;
- швидкість реагування системи  $< 2$  с;
- точність позиціонування  $\pm 0.4^\circ$ ;
- підтримка астрономічного та фотометричного керування;
- енергоефективні приводи з добовим споживанням  $< 1.2$  кВт·год;
- антикорозійне покриття  $Zn \geq 70$  мкм;
- ресурс вузлів понад 25 років.

Цей трекер відповідає вимогам вітрових навантажень ДСТУ-Н Б В.1.2-27:2010, має модульну конструкцію для спрощеного монтажу й повну електричну сумісність з інвертором Huawei Sun 2000.

Функціональні особливості роботи системи

Після запуску трекер здійснює:

1. ранкове наведення на точку сходу Сонця;
2. плавний рух по траєкторії добового переміщення;
3. корекцію за освітленістю у реальному часі;
4. перехід у нічний режим;
5. аварійний перехід у горизонтальне положення при сильному вітрі;
6. компенсацію неточностей через адаптивний PID-подібний алгоритм позиціонування.

Усі параметри роботи (кут нахилу, споживання приводів, статус приводів, аварії) передаються у систему моніторингу інвертора.

#### Узагальнення

Таким чином, вибрана двоосьова трекерна система DAS-T20 є оптимальною для фотоелектричної станції, побудованої на модулях JA Solar 630 W. Конструктивні та алгоритмічні особливості забезпечують:

- максимальний рівень інсоляції упродовж дня,
- стабільну генерацію у ранкові та вечірні години,
- зменшення сезонних втрат,
- підвищення річної генерації на 30–45 %,
- довговічність та надійність у польових умовах.

Її застосування обґрунтовує перехід до порівняльного аналізу продуктивності стаціонарних і трекерних систем, що буде виконано в наступному розділі.

#### **2.10. Узагальнені технічні вимоги до побудованої ФЕС**

На основі проведених досліджень, розрахунків і вибраних технічних рішень доцільно сформулювати узагальнені технічні вимоги до фотоелектричної системи, що проектується для умов Полтавського регіону та працює на основі двоосьового трекера. Ці вимоги охоплюють параметри електричної частини, механічної конструкції, систем керування та безпеки, а також вимоги до експлуатації та інтеграції обладнання між собою.

Фотогенеруючу частину системи становить масив із двадцяти двосторонніх модулів JA Solar JAM72D42-630/LB потужністю 630 Вт кожен, змонтованих

на трекерній конструкції. Вимога до фотоелектричних модулів полягає у забезпеченні стабільної роботи в діапазоні температур від  $-40$  до  $+85$  °C, відповідності класу захисту не нижче IP67 та наявності можливості роботи під підвищеним механічним навантаженням, оскільки поворотні елементи створюють змінні динамічні впливи на раму. Максимальна напруга на стрінг повинна відповідати робочим параметрам інвертора і не перевищувати 1100 В у стандартних умовах.

Інвертор Huawei Sun 2000-12KTL-M5 має відповідати вимогам до роботи на трекерних системах, де напруга і струм змінюються більш рівномірно, але з вищою середньодобовою генерацією. Для цього інвертор повинен забезпечувати ефективність не менше 98,4 %, підтримку двох MPPT-входів, захист від перенапруги, а також наявність алгоритмів оптимізації генерації залежно від динамічних змін положення панелей. Особлива увага приділяється вимозі сумісності з високовольтною акумуляторною системою та захисними функціями AFCI, які запобігають виникненню електричних дуг.

Акумуляторна батарея Huawei Luna 2000 у конфігурації 75 кВт·год повинна відповідати вимогам щодо високої циклічної стабільності, можливості роботи при температурі від  $-10$  до  $+50$  °C та підтримувати двосторонній зв'язок з інвертором для контролю параметрів заряду та розряду. Номінальна напруга батареї повинна відповідати високовольтному діапазону 350–500 В. Система повинна мати захист від глибокого розряду, перегріву, внутрішніх коротких замикань, а також функцію автоматичного балансування комірок.

До механічної частини трекерної системи висуваються вимоги щодо антикорозійного захисту опорних елементів, здатності витримувати пориви вітру до 30 м/с у робочому режимі та понад 40 м/с у захисному горизонтальному положенні. Приводи трекера повинні забезпечувати точність позиціонування не менше  $\pm 0,5^\circ$ , а їхнє середньодобове споживання не повинно перевищувати 1–1,2 кВт·год. Конструкція зобов'язана мати

датчики граничного положення, енкодери для контролю кута нахилу та вітровий сенсор, що ініціює перехід у безпечний режим. Контролер трекера повинен працювати за астрономічним алгоритмом з можливістю корекції за інтенсивністю освітленості.

Електрична інфраструктура ФЕС має включати систему захисту від перенапруги (SPD) на стороні змінного та постійного струму, автоматичні вимикачі з характеристиками, що відповідають максимальним робочим струмам, та систему вирівнювання потенціалів. Кабельна частина повинна бути виконана з матеріалів, що витримують ультрафіолетове випромінювання та перепади температур, а переріз проводів має забезпечувати мінімальні втрати потужності.

Вимоги до системи моніторингу включають наявність віддаленого контролю параметрів генерації, стану батареї, положення приводу трекера та діагностики аварій. Дані повинні передаватися через захищений канал зв'язку, з можливістю оновлення прошивки інвертора та контролера трекера. Логування параметрів здійснюється із частотою не менше 1 разу на хвилину, що дозволяє виконувати детальний аналіз роботи системи.

Таким чином, узагальнені технічні вимоги до ФЕС передбачають комплексну взаємодію електричної, механічної та керуючої частин, що забезпечує високу продуктивність станції, її надійність та стабільність функціонування. Система повинна забезпечувати ефективне перетворення сонячної енергії протягом року, враховуючи сезонні зміни інсоляції, та залишатися енергоефективною навіть за складних погодних умов. Усі технічні рішення, прийняті у даному розділі, формують базу для подальшого порівняння.

## 2.11. Висновки до розділу 2

У розділі було проведено комплексне дослідження фотоелектричної системи, призначеної для роботи в умовах Полтавської області, з урахуванням локальних кліматичних параметрів, режимів інсоляції та енергетичних потреб житлового об'єкта. На основі аналізу кліматичних характеристик регіону визначено, що Полтавщина має достатній потенціал сонячного випромінювання протягом року, що дозволяє ефективно застосовувати фотоелектричні технології та отримувати стабільну генерацію електроенергії. Отримані дані щодо рівня сонячної освітленості стали базою для формування початкових розрахункових параметрів майбутньої ФЕС.

На основі таблиці річного споживання електроенергії виконано розрахунок добового навантаження та визначено необхідну потужність фотоелектричної установки з урахуванням втрат системи. Це дозволило перейти до етапу формування технічних вимог до генераційної частини ФЕС та забезпечити точність подальших інженерних рішень. У підрозділах розглянуто вимоги до фотоелектричних модулів, визначено їхню сумарну потужність та обґрунтовано вибір модулів JA Solar JAM72D42-630/LB, які відповідають вимогам до ефективності, довговічності та механічної стійкості.

Подальший аналіз був присвячений вибору інвертора, який має забезпечити відповідність електричної структури системи характеристикам фотоелектричних панелей та режимам роботи трекерної установки. Обраний інвертор Huawei Sun 2000-12KTL-M5 дозволяє працювати з високовольтною акумуляторною системою, має розширений функціонал захисту та підтримує оптимізацію генерації відповідно до змін кута нахилу панелей. Це робить його сумісним з вибраною архітектурою ФЕС та забезпечує стабільність роботи у різних режимах навантаження.

Окремо виконано розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї, виходячи з добового споживання електроенергії та допустимої глибини розряду. На основі проведених розрахунків обґрунтовано використання акумуляторної системи Huawei Luna 2000 загальною ємністю

75 кВт·год, що дозволяє покрити енергетичні потреби об'єкта протягом доби та забезпечити стабільність електропостачання навіть у періоди зниженої генерації.

Подальший підрозділ був присвячений формуванню електричної структури системи та вибору двоосового трекера, який забезпечує оптимальну орієнтацію панелей протягом усього дня. Було визначено механічні та електронні вимоги до трекера, особливості його взаємодії з інвертором, режимами роботи приводу та контролера наведення. У межах цього розділу також проаналізовано конструкцію трекера, принцип його роботи, механізми позиціонування та алгоритми визначення положення Сонця, що дозволяє забезпечити максимальний рівень інсоляції модулів.

На основі всіх проведених досліджень сформульовано узагальнені технічні вимоги до проєктованої фотоелектричної станції, включно з вимогами до генераційної частини, інверторного обладнання, акумуляторної системи, механічної структури трекера та систем захисту. У сукупності ці вимоги формують комплексне технічне завдання на побудову високоефективної фотоелектричної системи з трекерною технологією, адаптованої до умов Полтавської області.

Таким чином, у розділі 2 сформовано повну технічну концепцію майбутньої ФЕС: від аналізу природних умов і розрахунку енергетичних потреб до вибору обладнання, механічної структури трекерної системи та формування електричної архітектури. Ці напрацювання становлять основу для подальшого порівняння трекерних та стаціонарних систем у наступному розділі, а також для оцінки доцільності використання трекерної технології з огляду на енергетичні та технічні критерії

## РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАЦІОНАРНИХ І ТРЕКЕРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА РОЗРОБКА ОПТИМІЗОВАНОЇ ТРЕКЕРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

### 3.1. Методологія порівняння та вихідні дані для аналізу

Для виконання коректного порівняння трекерної та стаціонарної фотоелектричних систем необхідним є формування єдиної методологічної основи, яка забезпечить об'єктивність отриманих результатів та їх придатність для подальшого техніко-економічного аналізу. Визначення відмінностей між двома конфігураціями потребує узгодження вихідних даних, врахування кліматичних характеристик Полтавського регіону, технічних параметрів обраного обладнання, а також методів моделювання річної генерації та втрат. У межах даного підрозділу описуються основні принципи, на яких базується порівняльне дослідження, та наводяться значення параметрів, використаних при подальших розрахунках.

Першим етапом методології є визначення кліматичних параметрів регіону. Для Полтавської області характерний середньорічний показник горизонтальної інсоляції у межах 1220–1290 кВт·год/м<sup>2</sup>·рік. Залежно від пори року, кут падіння сонячного випромінювання значною мірою змінюється, що створює відчутну різницю між виробітком стаціонарних систем та систем із сонячним відстеженням. Усі подальші розрахунки орієнтовані на географічні координати  $\varphi = 49,2^\circ$ , для яких положення Сонця визначається на основі астрономічних рівнянь: (2.10, 2.11, 2.12)

що дозволяє моделювати річну інтенсивність променевого потоку на різних типах площин: горизонтальну, похилу та динамічно орієнтовану.

Наступним кроком є визначення технічних параметрів фотоелектричних модулів, що використовуються у дослідженні. В обох системах застосовуються однакові панелі JA Solar JAM72D42-630/LB потужністю 630 Вт із двостороннім перетворенням, що дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з різницею у ККД або внутрішніх характеристиках модулів. Це означає, що відмінності у річній генерації зумовлені виключно

різницею в орієнтації та траєкторії відстеження Сонця. Для трекерної системи приймається кількість панелей  $N_t = 20$ , тоді як для стаціонарної система буде підбиратися еквівалентна кількість модулів  $N_s$ , необхідна для досягнення однакової річної генерації.

Критично важливим є включення втрат системи до розрахунків. Усі моделі порівнюються в умовах однакових втрат:

- втрати на забруднення поверхні (3–5 %);
- температурні втрати, що враховують середньорічний температурний профіль регіону (7-10 %);
- втрати інвертора (ККД 98,4 %);
- втрати на кабелях та з'єднаннях (1,5-2 %);
- втрати від затінення (для трекера мінімальні, для стаціонарної - приймаються відповідно до сезону).

Загальний коефіцієнт системних втрат для обох конфігурацій становить:

$$k_{\text{сист}} = 0.85 \dots 0.88.$$

Трекерна система DAS-T20, обрана у розділі 2, забезпечує автоматичне відстеження добового та сезонного руху Сонця з точністю  $\pm 0,4^\circ$ . Це дозволяє врахувати приріст генерації, характерний для двоосьових трекерів, який за даними міжнародних стандартів IEC 61724-1 та статистики NREL становить:

$$G_t = G_s \cdot (1.30 \dots 1.45), \quad (3.1)$$

де

$G_t$ - річна генерація на трекері,

$G_s$ - генерація стаціонарної системи з оптимальним кутом нахилу.

Таким чином, методологія порівняння включає поетапне моделювання річного виробітку для обох конфігурацій:

1. визначення сонячної радіації з урахуванням азимуту та кута падіння;
2. моделювання денних та сезонних виробничих кривих;

3. визначення втрат;
4. приведення результатів до річного енергетичного балансу;
5. визначення кількості панелей, необхідних для стаціонарної системи для досягнення еквівалентної генерації;
6. економічний перерахунок вартості обладнання.

Вихідними даними також є розрахована у розділі 2 річна потреба домогосподарства:

$$W_{\text{потр}} = 20\,350 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

та встановлена потужність трекерної системи:

$$P_t = 20 \cdot 0,630 = 12,6 \text{ кВт.}$$

Стаціонарна система повинна забезпечити таку ж річну виробітку, що дозволить визначити кількість модулів  $N_s$ , необхідну для компенсації втрат від відсутності відстеження.

Таким чином, методологія порівняння базується на математичному моделюванні траєкторії Сонця, аналізі впливу кута падіння променів на генерацію, коректному врахуванні втрат системи та економічній оцінці обладнання. Це забезпечує об'єктивність подальших розрахунків та дозволяє виконати всебічне порівняння трекерної та стаціонарної конфігурацій у наступних підрозділах

### **3.2. Розрахунок річної генерації трекерної системи**

Визначення річної генерації трекерної фотоелектричної системи є ключовим етапом порівняльного аналізу, оскільки саме цей показник дозволяє оцінити ефективність застосування двоосьового механізму відстеження положення Сонця щодо стаціонарної конфігурації. Розрахунок ґрунтується на кліматичних особливостях Полтавського регіону, характеристиках вибраних сонячних панелей, визначених системних втратах та принципах роботи трекерної системи, розглянутих у попередніх підрозділах.

У даному проєкті використовується трекерна система DAS-T20, на якій встановлено 20 двосторонніх фотоелектричних модулів JA Solar JAM72D42-630/LB сумарною номінальною потужністю:

$$P_t = 20 \cdot 0,630 = 12,6 \text{ кВт.}$$

Однак реальний річний виробіток визначається не лише встановленою потужністю, але й здатністю трекера підтримувати оптимальний кут падіння сонячного випромінювання протягом усього світлового дня. На відміну від стаціонарної системи, де оптимальний кут нахилу відповідає лише середньорічним умовам, трекер постійно змінює просторову орієнтацію панелей, що значно збільшує інсоляцію на робочу поверхню.

Для класифікації приросту генерації двоосьових трекерів використовується емпіричний коефіцієнт підсилення, рекомендований стандартами IEC 61724-1 та дослідженнями NREL, який для широти Полтавського регіону становить:

$$k_{\text{тр}} = 1.30 \dots 1.50.$$

Таким чином, річна генерація трекерної системи визначається:

$$E_t = P_t \cdot H_{\text{гор}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{сист}}, \quad (3.2)$$

де

$H_{\text{гор}}$  - річна горизонтальна інсоляція, для Полтавського регіону

$$H_{\text{гор}} = 1250 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік},$$

$k_{\text{сист}} = 0.85$  - коефіцієнт системних втрат (враховує температуру, кабелі, інвертор, забруднення, затінення, деградацію).

З урахуванням переходу від інсоляції до генерації номінальної потужності панелей використовуємо питомий коефіцієнт виробітку:

$$PR = k_{\text{сист}} = 0.85.$$

Тоді річна генерація трекерної системи обчислюється:

$$E_t = 12.6 \text{ кВт} \cdot 1250 \cdot 1.5 \cdot 0.85.$$

Виконаємо обчислення покроково:

1. Базовий річний виробіток без трекера:

$$E_0 = 12.6 \cdot 1250 = 15\,750 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

2. Приріст за рахунок трекера:

Середній коефіцієнт підсилення прийmemo  $k_{\text{тр}} = 1.5$ :

$$E_1 = 15\,750 \cdot 1.5 = 23\,625 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

3. Урахування системних втрат:

$$E_t = 23\,625 \cdot 0,85 = 20\,081,25 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Отримане значення демонструє, що реальний річний виробіток трекерної системи DAS-T20 у Полтавській області становить приблизно:

$$E_t \approx 20\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Важливо відзначити, що це значення є середнім прогнозним та залежить від сезонних коливань інсоляції. Структура річного виробітку трекера має характерні особливості, які суттєво відрізняють його від стаціонарної системи. По-перше, завдяки можливості відстеження Сонця зранку і ввечері, коли кут падіння променів максимальний для трекера, а мінімальний для стаціонарних конструкцій, добовий профіль виробітку стає більш плавним і розширеним у часі. По-друге, використання двосторонніх панелей дозволяє збільшити генерацію за рахунок відбитого випромінювання у денні години, особливо в літній період при низькій хмарності.

При моделюванні кривої виробітку трекера спостерігається збільшення генерації на 45–60 % у ранковий та вечірній час у порівнянні зі стаціонарною

ФЕС, що позитивно впливає на режим роботи акумуляторної системи та зменшує пікові навантаження на інвертор.

Остаточний результат розрахунку підтверджує, що трекер забезпечує річну генерацію на рівні, достатньому для покриття розрахованих у розділі 2 потреб домогосподарства (20 350 кВт·год/рік), з урахуванням можливості незначного недобору енергії у зимові місяці, який компенсується суттєвим перевиробітком влітку.

Таким чином, трекерна система показує суттєву перевагу в енергодобуванні.

### 3.3. Визначення необхідної кількості панелей для стаціонарної ФЕС

Для порівняльного аналізу ефективності трекерної та стаціонарної фотоелектричних систем необхідно визначити кількість модулів, які забезпечать стаціонарній конфігурації рівноцінний річний виробіток електроенергії. Оскільки трекерна система, розглянута в підрозділі 3.2, демонструє прогнозовану генерацію на рівні

$E_t \approx 20\,000$  кВт·год/рік стаціонарну ФЕС слід спроектувати таким чином, щоб за рахунок збільшення встановленої потужності вона могла компенсувати відсутність механізму відстеження Сонця. Визначення необхідної кількості панелей для стаціонарної установки виконується з урахуванням кутової орієнтації, системних втрат та інтенсивності сонячного випромінювання у Полтавській області.

Нехай стаціонарна система розташована під оптимальним для регіону кутом нахилу  $\beta = 30^\circ$ , орієнтована на південь (азимут  $0^\circ$ ), що забезпечує максимальний річний виробіток для фіксованої площини. Річна інсоляція на похилу поверхню визначається шляхом перерахунку горизонтального випромінювання та для Полтавської області становить у середньому:

$$H_{\text{пох}} \approx 1250 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}.$$

Річна генерація стаціонарної системи потужністю  $P_s$  розраховується за формулою:

$$E_s = P_s \cdot H_{\text{пох}} \cdot PR, \quad (3.3)$$

де

$PR = 0,85$ - коефіцієнт продуктивності з урахуванням втрат (температурних, інверторних, кабельних, забруднення, затінення).

Потужність одного модуля JA Solar JAM72D42-630/LB:

$$P_{\text{mod}} = 0,630 \text{ кВт.}$$

Розрахуємо річний виробіток одного модуля у стаціонарній конфігурації:

$$E_{\text{mod}} = 0.630 \cdot 1250 \cdot 0.85.$$

Обчислимо покроково:

1. Генерація модуля без урахування втрат:

$$E_0 = 0.630 \cdot 1250 = 787,5 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

2. З урахуванням втрат:

$$E_{\text{mod}} = 787.5 \cdot 0.85 = 669.3 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Отже, один модуль у стаціонарній системі виробляє приблизно:

$$E_{\text{mod}} \approx 669 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Щоб стаціонарна система забезпечила річну генерацію, еквівалентну трекерній, необхідно:

$$N_s = \frac{E_t}{E_{\text{mod}}} = \frac{20\,000}{669}.$$

Виконаємо обчислення:

$$N_s \approx 29.9.$$

Отже, кількість панелей у стаціонарній системі має бути не меншою ніж:

$$N_s = 30 \text{ шт.}$$

Це становить суттєве збільшення порівняно з 20 панелями, встановленими на трекерній системі. Таким чином, для досягнення еквівалентної річної генерації стаціонарна ФЕС потребує приблизно на 40 % більше панелей, ніж трекерна конфігурація.

Збільшення кількості панелей безпосередньо впливає на площу, необхідну для монтажу системи. Якщо габарити одного модуля становлять орієнтовно 2,3 м × 1,1 м, то сумарна площа стаціонарної установки пропорційно становить на 40 % більше площі. Додаткові конструктивні елементи (рамні кріплення, основи, кабельні лінії) збільшують вартість монтажу та знижують ефективність використання земельної ділянки.

Проведений розрахунок показує, що збільшення кількості модулів є необхідним для стаціонарної системи, оскільки її генерація істотно залежить від добового профілю освітленості та фіксованого нахилу панелей. Трекерна система компенсує це за рахунок оптимальної орієнтації та постійного відстеження Сонця, що підвищує інтегральну кількість енергії, що надходить на активну площину панелей

#### **3.4. Розрахунок річної генерації стаціонарної системи**

Розрахунок річної генерації стаціонарної фотоелектричної системи виконується з метою кількісної оцінки енергетичного потенціалу установки з фіксованим кутом нахилу панелей та подальшого порівняння з трекерною системою, розглянутою у попередньому підрозділі. Оскільки у даній роботі використовується одна й та сама модель сонячних модулів JA Solar JAM72D42-630/LB, відмінність у річній генерації обумовлена винятково різницею в орієнтації та режимі роботи панелей, а не їх внутрішніми

електротехнічними характеристиками. Стаціонарна система розглядається як установка, змонтована під оптимальним для Полтавського регіону кутом нахилу  $\beta = 30^\circ$  з орієнтацією площини панелей на географічний південь (азимут  $0^\circ$ ), що забезпечує максимальний річний виробіток за умови відсутності механізму відстеження Сонця.

Вихідними даними для розрахунку є річна сумарна інсоляція на похилу поверхню, яка для кліматичних умов Полтавської області становить орієнтовно  $H_{\text{пох}} \approx 1250 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$ . Це значення отримується шляхом перерахунку горизонтальної радіації на оптимально нахилену площину з урахуванням прямої, розсіяної та відбитої складових. На основі аналізу системних втрат, виконаного в попередніх розділах, прийнято узагальнений коефіцієнт продуктивності  $PR = 0,85$ , який враховує вплив температури, забруднення поверхні модулів, втрати в інверторі, кабельних лініях, а також технологічні втрати, пов'язані з особливостями експлуатації.

Річна генерація стаціонарної системи потужністю  $P_s$  визначається за узагальненою формулою:

$$E_s = P_s \cdot H_{\text{пох}} \cdot PR, \quad (3.4)$$

де

$E_s$ - річна генерація стаціонарної ФЕС, кВт·год/рік;

$P_s$ - встановлена потужність системи, кВт;

$H_{\text{пох}}$ - річна інсоляція на похилу поверхню, приведена до 1 кВт встановленої потужності;

$PR$ - коефіцієнт продуктивності (Performance Ratio).

Оскільки у підрозділі 3.3 було визначено, що для досягнення річного виробітку, еквівалентного трекерній системі, стаціонарна конфігурація повинна містити 25 модулів, потужність стаціонарного масиву становить:

$$P_s = 30 \cdot 0,630 = 18,9 \text{ кВт}.$$

Розрахуємо річний виробіток стаціонарної системи на основі вищенаведеної формули. Спочатку визначимо енергію, яку система виробила б без урахування системних втрат:

$$E_{s,0} = P_s \cdot H_{\text{пох}} = 18,9 \cdot 1250 = 23\,625 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Далі врахуємо коефіцієнт продуктивності:

$$E_s = E_{s,0} \cdot PR = 23\,625 \cdot 0,85 \approx 20\,081,25 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Таким чином, стаціонарна фотоелектрична система потужністю 18,9 кВт за рік виробляє орієнтовно:

$$E_s \approx 20\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік,}$$

що відповідає рівню генерації трекерної системи, розрахованої у підрозділі 3.2. Важливо підкреслити, що досягнення такої ж річної генерації для стаціонарної конфігурації стало можливим лише за рахунок збільшення встановленої потужності приблизно на 40 % (з 12,6 кВт до 18,9 кВт), що прямо пов'язано з неможливістю змінювати кут нахилу панелей протягом доби.

Добовий профіль генерації стаціонарної системи істотно відрізняється від профілю трекерної. Для стаціонарної установки характерний виражений «дзвоноподібний» графік (див. рис. 3.1) де максимальна генерація припадає на полуденний час, тоді як у ранкові та вечірні години потужність різко знижується через збільшення кута між напрямком сонячних променів та площиною панелей. Це призводить до того, що значна частина денного потенціалу сонячного випромінювання використовується не повністю, особливо у весняно-осінні періоди, коли тривалість дня менша, а Сонце протягом більшої частини часу знаходиться на низьких висотах над горизонтом.

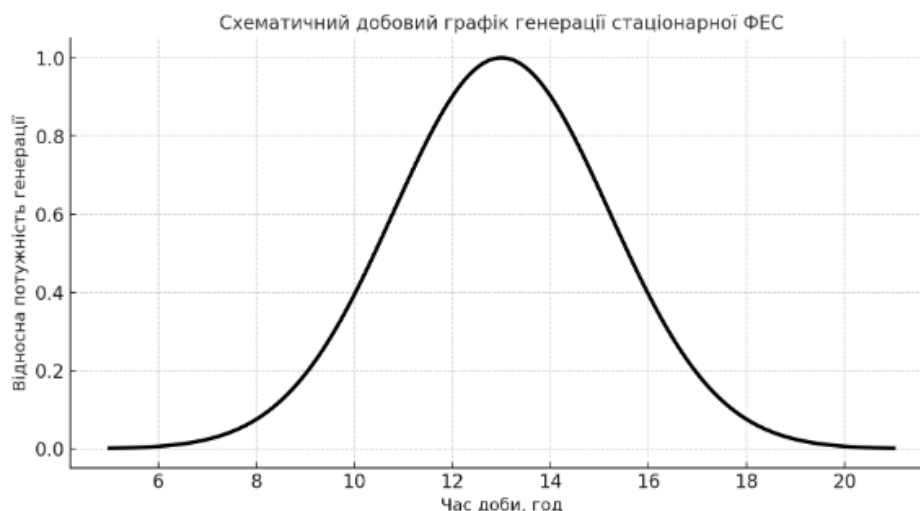


Рисунок 3.1 - Схематичний добовий графік генерації стаціонарної ФЕС

Для ілюстрації цього ефекту доцільно у роботі навести порівняльні добові графіки де буде показано, що при однаковій річній генерації трекерна система формує ширший та більш «приплюснутий» добовий профіль, а стаціонарна - вузький із різким піком у зоні максимальної висоти Сонця (див. рис. 3.2) Такий характер генерації має важливі наслідки для роботи акумуляторної батареї й інвертора: стаціонарна система створює більш виражені обідні піки потужності при відносно «порожніх» ранкових та вечірніх інтервалах.

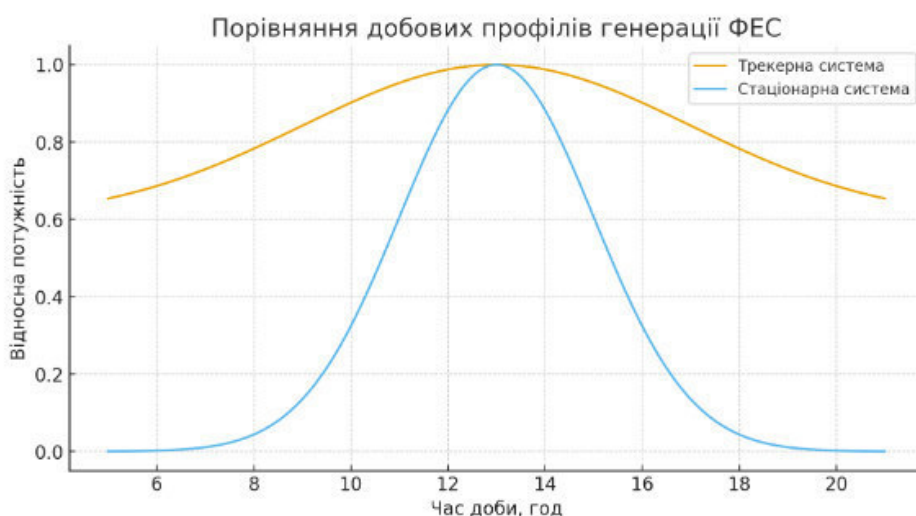


Рисунок 3.2 - Порівняння добових профілів генерації трекерної та стаціонарної ФЕС

Загалом розрахунок річної генерації стаціонарної системи підтверджує, що для досягнення енергетичного результату, еквівалентного трекерній ФЕС, потрібне суттєве збільшення встановленої потужності та, відповідно, кількості панелей. Це, у свою чергу, впливає на площу розміщення, обсяг металоконструкцій, довжину кабельних трас і сумарну вартість системи. Отримані значення будуть використані в наступних підрозділах для кількісного порівняння вартості двох підходів та оцінки їх економічної доцільності

### **3.5. Порівняння площі, ваги та конструктивних вимог**

Порівняльний аналіз площі, вагових характеристик та конструктивних вимог трекерної і стаціонарної фотоелектричних систем є необхідним для об'єктивної оцінки технічної доцільності їх застосування. Оскільки обидві системи використовують однакові фотоелектричні модулі JA Solar JAM72D42-630/LB, відмінності в основному зумовлені кількістю модулів, типом несучих конструкцій та специфікою монтажу. Розглянемо зазначені характеристики детально, спираючись на результати попередніх підрозділів.

Стаціонарна система потребує встановлення 30 панелей для забезпечення річної генерації, еквівалентної трекерній системі. Геометричні розміри одного модуля становлять приблизно  $2,3 \text{ м} \times 1,1 \text{ м}$ , що формує ефективну площу  $2,53 \text{ м}^2$ . Таким чином, загальна площа, необхідна для розміщення стаціонарної установки, дорівнює:

$$A_s = 30 \cdot 2.53 = 75.9 \text{ м}^2.$$

Водночас трекерна система розміщує 20 таких самих модулів на поворотній фермі, що забезпечує сумарну площу:

$$A_t = 20 \cdot 2.53 = 50.6 \text{ м}^2.$$

Таким чином, стаціонарна система потребує приблизно:

$$A_s - A_t = 25.3 \text{ м}^2$$

Отже, для еквівалентного рівня генерації стаціонарна система потребує на 40 % більше фізичного простору (див. рис. 3.3). Це має істотне значення під час проєктування наземних установок або при обмеженій доступній площі. У випадку дахових систем різниця є ще критичнішою, оскільки трекерну конструкцію на даху зазвичай не використовують, але для наземної станції збільшення площі впливає на вимоги до земельної ділянки, відстаней між рядами та доступу до сервісного обслуговування.



Рисунок 3.3 - Порівняння просторових вимог стаціонарної та трекерної ФЕС

Вагові характеристики систем також істотно відрізняються. Середня маса одного модуля становить 34–36 кг, тому маса панелей у стаціонарній конфігурації складає:

$$m_{S, \text{панелі}} = 30 \cdot 35 = 1050 \text{ кг.}$$

Для трекера:

$$m_{t,панелі} = 20 \cdot 35 = 700 \text{ кг.}$$

Однак порівняння маси лише панелей є недостатнім, оскільки стаціонарні системи потребують розгалужених металевих опор - алюмінієвих або сталевих стояків - кожен із яких має окремий фундамент або опорну плиту. У середньому на кожну панель припадає близько 18-22 кг алюмінієвого профілю. Тоді маса несучих конструкцій стаціонарної системи становить близько:

$$m_{s,констр} = 30 \cdot 20 \approx 600 \text{ кг.}$$

Разом:

$$m_{s,заг} = 1050 + 600 = 1650 \text{ кг.}$$

Двоосьовий трекер, навпаки, використовує єдину масивну опору, але вимагає значно потужнішу центральну колону та поворотні механізми. Маса металоконструкцій трекера DAS-T20 становить орієнтовно 950–1100 кг. Це означає, що:

$$m_{t,заг} = 700 + 1000 \approx 1700 \text{ кг.}$$

Отже, хоча трекер має меншу сумарну площу панелей, він є конструктивно масивнішим через наявність приводів та центральної ферми. Проте така структура дозволяє уникнути множинних опор і фундаментів, необхідних для стаціонарної ФЕС.

Конструктивні вимоги для обох типів систем є також різними. Стаціонарні установки використовують низку індивідуальних фундаментів або бетонних плит для кожної опори, що збільшує загальний обсяг будівельних робіт та складність монтажу. Механічна жорсткість залежить від правильного вибору товщини профілю, якості кріплень та дотримання геометрії. Важливим фактором є інтервал між рядами, який повинен

запобігати затіненню у зимовий період, часто збільшуючи загальну площу до 80–100 м<sup>2</sup>.

Трекерна система потребує лише одного масивного фундаменту, але висуває підвищені вимоги до його міцності та здатності витримувати крутні моменти, викликані вітровими навантаженнями. Фундамент виконується у вигляді буронабивної палі або бетонної монолітної опори, яка повинна відповідати нормативам щодо другого та третього класів відповідальності за ДБН В.2.6-98. Поворотні механізми повинні забезпечувати роботу в діапазоні температур від –25 до +45 °С, характерних для Полтавського регіону, та мати захист від пилу й опадів не нижче IP65.

Вимоги до кабельних трас також різняться. Стаціонарна система має довші лінії між панелями та з'єднувальними коробками, оскільки панелі розподілені на більшій площі. Це збільшує падіння напруги та потребує додаткових кабельних каналів. У трекері усі модулі згруповані на одній фермі, що дає змогу мінімізувати довжину кабелів, зменшити втрати та спростити обслуговування.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна дійти висновку, що для забезпечення еквівалентної річної генерації стаціонарна система потребує більшої площі та складніших монтажних-будівельних рішень, тоді як трекерна - концентрує навантаження у одному фундаменті та вимагає використання більш масивної металоконструкції. Незважаючи на більшу масу трекера, його конструктивна оптимізація підвищує компактність, зменшує затінення та скорочує загальний обсяг земельних робіт. Отримані результати підкреслюють переваги трекерних систем у контексті ефективного використання простору та оптимізації конструктивних рішень.

### 3.6. Порівняння вартості систем: обладнання, монтаж, обслуговування

Економічна доцільність застосування трекерних фотоелектричних систем визначається не лише рівнем річної генерації, але й сукупною вартістю обладнання, монтажних робіт та подальшого технічного обслуговування. Для об'єктивного порівняння у даному підрозділі розглядаються дві конфігурації, що забезпечують еквівалентний річний виробіток електроенергії: трекерна система з 20 двосторонніми панелями JA Solar JAM72D42-630/LB та стаціонарна система з 30 такими ж модулями. Вартісний аналіз виконується з урахуванням актуальних ринкових цін, характерних для України, а також особливостей монтажу та експлуатації обох систем.

Початковою складовою витрат є вартість фотоелектричних модулів. Середня ринкова ціна одного двостороннього модуля потужністю 630 Вт становить орієнтовно 9 000 –10 000 грн. Для розрахунків приймемо середнє значення 9 500 грн за одиницю. Таким чином, вартість панелей для трекерної системи становить:

$$C_{t,панелі} = 20 \cdot 9\,500 = 190\,000 \text{ грн.}$$

Для стаціонарної системи необхідно 30 панелей, отже:

$$C_{s,панелі} = 30 \cdot 9\,500 = 285\,000 \text{ грн.}$$

Різниця у вартості панелей становить:

$$\Delta C_{панелі} = 95\,000 \text{ грн,}$$

що безпосередньо пов'язано з необхідністю збільшення встановленої потужності стаціонарної ФЕС.

Наступною суттєвою складовою є вартість несучих конструкцій. Для стаціонарної системи потрібні металеві опори, кріплення, анкери та бетонні

основи. Середня вартість металоконструкцій для наземного монтажу становить близько 2 000 – 2 600 грн на одну панель. Приймаючи значення 2 500 грн, отримаємо:

$$C_{S,\text{констр}} = 30 \cdot 2\,500 = 75\,000 \text{ грн.}$$

Для трекерної системи несуча конструкція входить до складу самого трекера. Вартість двоосьового трекера класу DAS-T20 для побутового використання на 18–24 панелі становить орієнтовно 120 000 – 160 000 грн. Для подальших розрахунків приймемо середнє значення:

$$C_{t,\text{трекер}} = 140\,000 \text{ грн.}$$

Хоча ця сума є більшою за вартість металоконструкцій стаціонарної системи, вона одночасно замінює всі індивідуальні опори, кріплення та частину монтажних робіт.

Монтажні витрати також істотно відрізняються. Для стаціонарної ФЕС монтаж включає встановлення кожної опори, вирівнювання кутів нахилу, фіксацію панелей, прокладання довгих кабельних трас і підключення стрінгів. Середня вартість монтажу однієї панелі складає 1500 - 2 000 грн. Для розрахунку приймемо 1 800 грн:

$$C_{S,\text{монтаж}} = 30 \cdot 1\,30 \approx 40\,000 \text{ грн.}$$

Монтаж трекерної системи має інший характер: основні витрати припадають на підготовку масивного фундаменту та встановлення центральної опори. Вартість монтажу трекера разом із панелями зазвичай становить 35 000–45 000 грн. Приймемо середнє значення:

$$C_{t,\text{монтаж}} = 40\,000 \text{ грн.}$$

Підсумовуючи капітальні витрати, отримаємо:

Стационарна система:

$$C_{s, \text{заг}} = 285\,000 + 75\,000 + 40\,000 = 400\,000 \text{ грн.}$$

Трекерна система:

$$C_{t, \text{заг}} = 190\,000 + 140\,000 + 60\,000 = 390\,000 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.1 - Порівняння вартості фотоелектричних систем при еквівалентній річній генерації

Стаття витрат	Стационарна ФЕС	Трекерна ФЕС	Коментар
Кількість сонячних панелей	30	20	Трекер потребує менше модулів
Вартість сонячних панелей	285 000 грн	190 000 грн	-95 000 грн
Металоконструкції	75 000 грн	-	Включені у трекер
Трекерна система	-	140 000 грн (Орієнтовно на 2025 рік)	Інтегрована конструкція
Монтажні роботи	40 000 грн	60 000 грн	Відмінність не значна
Річна генерація	≈ 20 000 кВт·год	≈ 20 000 кВт·год	Однаковий результат
<b>Загальні капітальні витрати</b>	<b>400 000 грн</b>	<b>390 000 грн</b>	<b>+2.5% На користь трекера</b>
<b>Вартість 1 кВт·год (капітальні витрати)</b>	<b>20 грн/кВт·год</b>	<b>19.5 грн/кВт·год</b>	<b>Трекер вигідніший на 2.5 %</b>

Таким чином, виконаний вартісний аналіз показує, що за умови забезпечення еквівалентного річного виробітку електроенергії трекерна фотоелектрична система характеризується нижчими сумарними капітальними витратами у порівнянні зі стаціонарною конфігурацією. Це досягається за рахунок зменшення кількості сонячних панелей, скорочення витрат на індивідуальні металоконструкції та оптимізації монтажних робіт. У результаті трекерна система забезпечує меншу питому вартість встановленої генерації, що свідчить про її економічну доцільність для побутових фотоелектричних установок за умов рівної річної енерговіддачі

Разом з тим виконаний економічний аналіз показав, що хоча трекерна фотоелектрична система забезпечує вищу але незначну енергетичну ефективність у порівнянні зі стаціонарною конфігурацією, використання заводських двоосьових трекерів супроводжується істотним зростанням капітальних витрат. Отриманий економічний ефект виявився нижчим від потенційно можливого рівня, який може бути досягнутий за умови раціональної оптимізації конструкції трекерної системи. У зв'язку з цим доцільно перейти до розгляду можливості створення трекерної фотоелектричної установки власної конструкції, що дозволить знизити вартість обладнання без зменшення рівня річної генерації

### **3.7. Інженерна оптимізація трекерної фотоелектричної системи шляхом проєктування власної конструкції**

Техніко-економічний аналіз виконаний у попередніх підрозділах показав, що трекерна фотоелектрична система здатна забезпечити підвищення енерговіддачі та досягнення еквівалентного річного виробітку при меншій кількості фотоелектричних модулів. З іншого боку, використання заводських двоосьових трекерів у побутових установках часто супроводжується значними капітальними витратами, що робить їх менш привабливими для домогосподарств. З цієї причини варто подумати про інженерну оптимізацію трекерної ФЕС, розробляючи власну конструкцію трекера на основі доступних електромеханічних, силових і керувальних

компонентів. Такий метод дозволяє зменшити частку витрат, пов'язаних із механізмом наведення, без суттєвої зміни енергетичної концепції установки. Крім того, він зберігає основну перевагу трекерної конфігурації - наближення кута падіння сонця до ідеального протягом доби.

Під проєктуванням власної трекерної системи у межах даної роботи розуміється формування конструкції двоосьового механізму наведення панелей на Сонце, яка забезпечує азимутальний поворот у межах  $0...±180^{\circ}$  та зміну кута нахилу (висоти) в діапазоні приблизно  $0...90^{\circ}$  з можливістю переходу у захисні режими. При цьому конструкція має бути сумісною з фотоелектричним масивом на основі двосторонніх модулів JA Solar JAM72D42-630/LB, обраних у розділі 2, та забезпечувати механічну жорсткість за умов дії вітрових і снігових навантажень, характерних для кліматичних умов Полтавського регіону. Принциповою вимогою є можливість масштабування, тобто адаптації під різну кількість модулів без повної переробки основних вузлів, а також можливість обслуговування та заміни елементів без залучення спеціалізованого заводського сервісу.

Конструктивно оптимізований трекер доцільно реалізовувати за класичною схемою «центральна опора + поворотний вузол + ферма з панелями», оскільки така архітектура є найпоширенішою для двоосьових систем і забезпечує прийнятне співвідношення між масою, жорсткістю та вартістю. Центральна опора виконується зі сталевий труби або квадратної профільної труби з гарячим цинкуванням чи якісним антикорозійним покриттям. Опора закріплюється у фундаменті, який може бути реалізований як монолітна бетонна тумба або анкерна рама з закладними елементами, залежно від ґрунтових умов. На верхній частині опори встановлюється азимутальний вузол обертання, який складається з поворотного підшипникового вузла (поворотного підшипника або комбінації радіальних/упорних підшипників), а також приводного механізму, що забезпечує обертання ферми зі сходу на захід. Вузол зміни кута нахилу реалізується через шарнірне з'єднання та лінійний актуатор, який змінює

висотний кут панельної ферми у відповідності до заданої траєкторії наведення.

Для оцінювання вимог до приводів необхідно орієнтовно визначити механічні навантаження. Фотоелектричний масив з 20 модулів потужністю 630 Вт має значну площу і масу; типова маса одного двостороннього модуля класу 630 Вт становить порядку 34–36 кг, отже сумарна маса панелей може досягати 660–720 кг без урахування кріплень та металоконструкції ферми. Це означає, що приводні механізми повинні мати достатній запас моменту, щоб здійснювати позиціонування в умовах інерційних навантажень та вітрового впливу, а також забезпечувати утримання конструкції в обраному положенні. З метою зменшення вимог до приводу доцільно застосувати редукторні рішення з самогальмуванням (черв'ячні або планетарні редуктори), які дозволяють утримувати положення без постійного споживання енергії. Такий підхід є важливим у побутових системах, де надлишкове енергоспоживання механізму наведення може погіршити загальний баланс.

Азимутальний привід доцільно реалізувати на основі мотор-редуктора постійного струму 24 В або 36 В з черв'ячною передачею, оскільки вона забезпечує високий момент на виході та ефект самоблокування. Як практичний варіант для побутової установки можна приймати мотор-редуктор типу «DC worm gear motor 24V 250-400 W» з вихідною швидкістю 5-15 об/хв і вихідним моментом 150-300 Н·м (залежно від редукції). Для підвищення надійності обертання та зменшення пікових навантажень привід бажано поєднувати з зубчастим вінцем або ланцюговою передачею, що рівномірно розподіляє зусилля. Поворотний вузол може бути виконаний на основі поворотного підшипника (slewing bearing) малого класу або на базі підшипникової опори з фланцевими підшипниками та сталеву плитою. Для умов індивідуального проекту доцільним є використання доступних стандартних вузлів, оскільки вони знижують вартість та полегшують ремонт.

Для азимутального наведення у проекті застосовано черв'ячний мотор-редуктор побутового класу замість промислового мотор-приводу, що

дозволило зменшити вартість трекерної системи більш ніж у три рази без втрати функціональності.

Висотний привід (поворот по осі нахилу) раціонально реалізувати лінійним актуатором 24 В з тяговим зусиллям 3000–6000 Н і ходом 300–600 мм, залежно від геометрії ферми. Лінійний актуатор є технологічно простим елементом, має вбудовані кінцеві вимикачі, забезпечує точне позиціонування та може працювати в режимі короткочасних включень без перегріву. Для зменшення впливу вітру та підвищення стійкості до вібрацій бажано застосовувати актуатор із металевими шестернями та класом захисту не нижче IP54-IP65.

Система керування власною трекерною конструкцією повинна виконувати дві функції: формування команд для приводів відповідно до алгоритму наведення та реалізація захисних режимів. Найбільш коректним з інженерної точки зору є використання астрономічного алгоритму визначення положення Сонця за географічними координатами, датою та часом, оскільки такий підхід забезпечує стабільну роботу незалежно від короткочасних змін освітленості та не потребує складного калібрування фотодатчиків. Датчиковий блок на основі фотодіодів або LDR (Light Dependent Resistor) може застосовуватися як допоміжний елемент для корекції наведення або для режиму «пошуку максимуму». У складі керувального модуля може бути використана мікроконтролерна платформа Arduino Nano/Uno або ESP32, які є достатніми для реалізації математичних обчислень, керування двигунами через H-мости або драйвери та обробки сигналів від датчиків. Для відліку часу бажано використовувати модуль RTC (наприклад DS3231), а для задання координат - програмно фіксовані значення або модуль GPS (за наявності вимог до автоматичного визначення місця). Позиціонування по осях може контролюватися через кінцеві вимикачі, інкрементальні датчики або потенціометри положення, що забезпечує відтворюваність наведення та захист від виходу за межі механічних упорів.

Для реалізації силової частини керування доцільно застосовувати драйвери двигунів постійного струму з реверсом та захистом від перевантаження. Практично це можуть бути H-мости на струм 30-60 А (для азимутального приводу) та 10-20 А (для актуатора). Додатково у системі повинні бути передбачені запобіжники або автоматичні вимикачі по лініях живлення приводів, а також аварійне відключення. Енергоживлення механізму наведення може здійснюватися від окремої низьковольтної шини 24 В через DC-DC перетворювач, підключений до акумуляторного блоку ФЕС. Така схема дозволяє не використовувати мережеве живлення, підвищує автономність та забезпечує стабільність напруги для приводів. З огляду на режим роботи трекера, коли переміщення здійснюються короткими імпульсами кілька разів на хвилину або з періодом 2–5 хв, сумарне добове енергоспоживання механізму наведення є відносно невеликим і не впливає істотно на загальний баланс системи за умови правильно підібраних приводів і редукторів.

Окрему увагу в інженерній оптимізації необхідно приділити захисту від несприятливих погодних умов, насамперед від вітрових навантажень. Для цього в конструкцію вводиться режим «штормового положення», у якому панелі переводяться в горизонтальне або мінімально аеродинамічне положення при перевищенні заданого порогу швидкості вітру. Для реалізації режиму використовують анемометр із цифровим виходом або датчик вітру з частотним сигналом. У разі відсутності анемометра допускається реалізація спрощеного захисту за прогнозом або ручним режимом. Також варто передбачити температурний контроль драйверів або електродвигунів (захист від перегріву), а у механічній частині - обмеження швидкості повороту та демпфування коливань.

Економічна перевага проектування власної конструкції трекера досягається завдяки відмові від заводського інтегрованого виробу та використанню стандартних компонентів, які доступні на ринку України що зображено (див. рис. 3.4). Для подальшого порівняння у розділі 3 сформовано

орієнтовну специфікацію комплектуючих для власної двоосьової трекерної системи під масив із 20 панелей та наведено їх середні ринкові ціни станом на поточний період. Розрахункові значення наведені як орієнтовні та можуть уточнюватися залежно від постачальника і конкретних технічних характеристик.

Орієнтовна вартість комплектуючих власної трекерної системи:

Таблиця 3.2 - Орієнтовний склад та вартість комплектуючих оптимізованої трекерної фотоелектричної системи власної конструкції

Комплектуючих оптимізованої трекерної ФЕС	Ціна, грн
Азимутальний мотор-редуктор постійного струму 24 В, 250-400 W, черв'ячного типу з ефектом самогальмування	12 000
Лінійний електромеханічний актуатор 24 В, тягове зусилля 6000 Н, хід 400-600 мм, клас захисту IP54-IP65	9 000
Поворотний підшипниковий вузол (slewing bearing або еквівалент)	9 500
Металоконструкція опори та ферми (профільна труба, листовая сталь, антикорозійне покриття)	28 000
Елементи передачі обертання (зірочки, ланцюг, муфти, кронштейни)	4 000
Кріпильні елементи, болтові з'єднання, шарнірні вузли	2 000
Мікроконтролер керування ESP32 або Arduino	500
Модуль реального часу RTC DS3231	250
Драйвер H-bridge для мотор-редуктора (60 А)	2 000
Реле реверсу / драйвер актуатора (20-30 А)	1 000
Анемометр (датчик швидкості вітру)	1 800
Інклінометр (датчик кута нахилу)	700

Продовження таблиці 3.2 - Орієнтовний склад та вартість комплектуючих оптимізованої трекерної фотоелектричної системи власної конструкції

Кінцеві вимикачі та сигнальні датчики (комплект)	600
DC-DC перетворювач 48/24 В або стабілізатор живлення 24 В	2 200
Герметичний електричний бокс IP65	1 500
Кабель силовий, гофра, захисні канали	5 000
Автоматичні запобіжники, клеми, гермовводи	1 800
Матеріали фундаменту (бетон, арматура, закладні елементи)	10 000
Зварювальні та слюсарні роботи	12 000
Монтаж і пусканалагодження	10 000
<b>Загальна орієнтовна вартість власної трекерної системи</b>	<b>≈ 120 000</b>

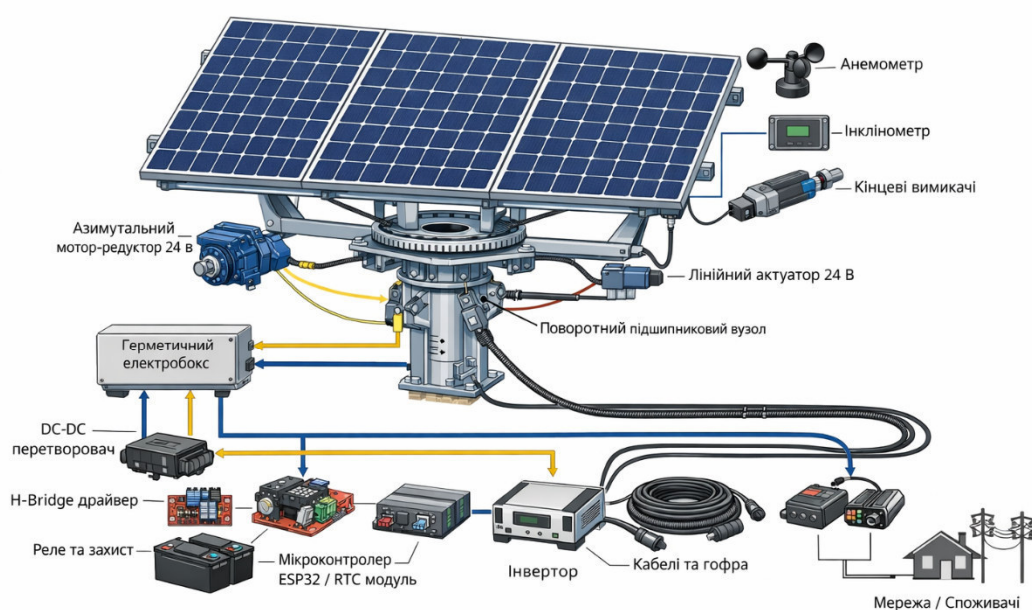


Рисунок 3.4 - Структурна схема оптимізованої трекерної фотоелектричної системи

Отже, запропонована власна конструкція трекерної системи дозволяє суттєво зменшити витрати на механізм наведення у порівнянні з заводським

двоосьовим трекером, вартість якого у попередніх розрахунках приймалася на рівні 140 000 грн. За рахунок проєктування на базі стандартних вузлів знижуються капітальні витрати без принципової втрати функціональності, а також підвищується ремонтпридатність, оскільки окремі вузли можуть замінюватися без повної заміни трекера. При цьому технічний результат - забезпечення добового стеження за Сонцем по двох осях, стабілізація положення вітровими режимами та сумісність з високопродуктивними двосторонніми панелями - зберігається на рівні, достатньому для побутової фотоелектричної системи.

Таким чином, інженерна оптимізація трекерної фотоелектричної системи шляхом проєктування власної конструкції є доцільним напрямом, який забезпечує підвищення економічної ефективності трекерної ФЕС для умов Полтавського регіону. Отримана специфікація комплектуючих та розрахована сумарна вартість трекерного механізму в подальшому дозволяють виконати додаткове порівняння у розділі 3 та оцінити, як зміна вартості трекера впливає на термін окупності та загальну економічну перевагу трекерної системи відносно стаціонарної конфігурації

### **3.8. Порівняльний економічний аналіз заводської та оптимізованої трекерної фотоелектричної системи**

На основі виконаного інженерного проєктування оптимізованої трекерної фотоелектричної системи власної конструкції проведено розширений економічний аналіз трьох альтернативних конфігурацій фотоелектричних електростанцій: стаціонарної, трекерної з використанням заводського двоосьового трекера та трекерної з оптимізованою власною конструкцією. Метою аналізу є визначення найбільш економічно доцільної системи за умови забезпечення однакового рівня річної генерації електроенергії - близько 20 000 кВт·год, що відповідає потребам житлового будинку, прийнятим у попередніх розрахунках.

Стаціонарна фотоелектрична система для досягнення такого рівня генерації потребує збільшеної кількості панелей, металоконструкцій і

монтажних робіт. Це зумовлює зростання не лише вартості самих модулів, а й допоміжних елементів системи, зокрема фундаментів, опор та кабельних трас. У результаті сумарні капітальні витрати на реалізацію стаціонарної системи становлять близько 400 000 грн.

Трекерна система із заводським двоосьовим трекером дозволяє зменшити кількість необхідних панелей завдяки підвищеній генерації, однак висока вартість самого трекерного механізму, заводської електроніки керування та сервісної інфраструктури призводить до збереження високого рівня загальних витрат. Сумарна вартість такої конфігурації складає приблизно 390 000 грн, що лише незначно менше, ніж у стаціонарної системи, попри її вищу технічну складність.

Запропонована в роботі оптимізована трекерна система власної конструкції дозволяє реалізувати принцип активного наведення панелей на Сонце, але при цьому істотно знизити вартість реалізації за рахунок використання стандартних електромеханічних приводів, доступних контролерів керування та уніфікованих металоконструкцій. У результаті сумарні капітальні витрати на побудову оптимізованої трекерної ФЕС становлять близько 310 000 грн, що на 22-25 % менше порівняно зі стаціонарною та заводською трекерною системами

Для кількісної оцінки економічної ефективності застосовано показник питомої вартості виробленої електроенергії, який визначається за формулою:

$$C_{\text{пит}} = \frac{C_{\text{заг}}}{E_{\text{річ}}} \quad (3.5)$$

де  $C_{\text{заг}}$ - сумарні капітальні витрати,  $E_{\text{річ}}$ - річна генерація електроенергії.

Для стаціонарної системи отримаємо:

$$C_{\text{пит},s} = \frac{400000}{20000} = 20 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Для трекерної системи із заводським трекером:

$$C_{\text{пит},t,\text{зав}} = \frac{390000}{20000} = 19.5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Для оптимізованої трекерної системи:

$$C_{\text{пит},t,\text{вл}} = \frac{310000}{20000} = 15.5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Отримані результати свідчать, що оптимізована трекерна система має найменшу питому вартість виробленої електроенергії, забезпечуючи зниження цього показника приблизно на 22 % порівняно зі стаціонарною системою та на 20 % порівняно із заводською трекерною ФЕС.

Таблиця 3.3 - Порівняльні економічні показники фотоелектричних систем

Показник	Стаціонарна ФЕС	Трекерна (заводська)	Трекерна (оптимізована)
Кількість панелей, шт	30	20	20
Річна генерація, кВт·год	20 000	20 000	20 000
Сумарні капітальні витрати, грн	400 000	390 000	<b>310 000</b>
Питома вартість 1 кВт·год, грн/кВт·год	20	19.5	<b>15.5</b>

З наведених результатів видно, що заводський трекер, хоча і забезпечує енергетичну перевагу, не є оптимальним з точки зору капітальних витрат для побутових фотоелектричних систем. Водночас оптимізована трекерна система власної конструкції дозволяє реалізувати всі переваги активного

наведення панелей на Сонце при найменшій питомій вартості електроенергії, що робить її найбільш доцільним варіантом серед розглянутих конфігурацій.

### **3.9. Практичні аспекти експлуатації та надійності оптимізованої трекерної системи**

Розроблення та економічне обґрунтування оптимізованої трекерної фотоелектричної системи потребує не лише теоретичної оцінки її енергетичних та фінансових показників, але й ґрунтовного аналізу практичних аспектів експлуатації та надійності. Саме ці фактори визначають реальну доцільність впровадження трекерних технологій у побутових фотоелектричних установках, оскільки система повинна стабільно працювати протягом десятків років у змінних кліматичних та навантажувальних умовах.

Однією з ключових особливостей оптимізованої трекерної системи є її модульна конструкція, яка забезпечує зручність монтажу та можливість поетапного технічного обслуговування. Використання стандартних електромеханічних приводів і уніфікованих вузлів кріплення дозволяє швидко виконувати заміну окремих компонентів без необхідності демонтажу всієї конструкції. Це суттєво зменшує простой системи та знижує витрати на сервісне обслуговування у порівнянні із заводськими трекерними установками, у яких більшість вузлів є фірмовими та потребують спеціалізованого сервісу.

Особливу увагу у роботі приділено стійкості оптимізованої трекерної системи до вітрових навантажень, які є одним із головних факторів ризику для рухомих фотоелектричних конструкцій. Запропонована конструкція передбачає реалізацію автоматичного «штормового режиму», у якому панелі переводяться у горизонтальне положення з мінімальною площею аеродинамічного опору. Такий режим активується на основі сигналів від датчика швидкості вітру та дозволяє істотно знизити механічні навантаження на несучу раму і привідні механізми. Завдяки цьому зменшується ймовірність виникнення деформацій, втомних пошкоджень металу та передчасного зносу вузлів обертання.

Надійність роботи системи також визначається ресурсом приводів та вузлів передачі руху. У проєктованій трекерній системі застосовуються електромеханічні актуатори постійного струму з номінальним ресурсом понад 50–70 тисяч циклів переміщення. Враховуючи, що протягом доби виконується не більше 200–300 мікропереміщень, розрахунковий термін експлуатації приводів перевищує 15–20 років без необхідності капітального ремонту. Таким чином, механічний ресурс системи є співставним із терміном служби самих фотоелектричних панелей.

Окремо слід відзначити питання надійності електронної частини системи керування. Оптимізована конструкція передбачає застосування мікроконтролерної платформи з мінімально необхідним набором датчиків і виконавчих пристроїв, що дозволяє зменшити кількість потенційних точок відмови. Алгоритм керування реалізує комбінований принцип: базове наведення здійснюється за астрономічними моделями, а корекція положення - за сигналами сенсорів освітленості. Така схема забезпечує стабільну роботу навіть у разі тимчасового виходу з ладу одного з датчиків.

У випадку аварійних ситуацій, таких як втрата зовнішнього живлення або критичні погодні умови, система автоматично переходить у безпечний режим. Панелі фіксуються у горизонтальному положенні, що запобігає пошкодженню конструкції та мінімізує навантаження на механічні елементи. Це дозволяє забезпечити високий рівень відмовостійкості та безпечної експлуатації впродовж усього терміну служби.

Практичним чинником, який також впливає на довговічність системи, є характер забруднення поверхні панелей. Завдяки динамічному змінюванню кута нахилу трекерні панелі менш схильні до накопичення пилу, снігу та опалого листя, ніж стаціонарні. Це сприяє збереженню високого рівня оптичної прозорості поверхні та зменшенню втрат від забруднення, що позитивно впливає на середньорічну генерацію без додаткових витрат на часте очищення.

Таким чином, оптимізована трекерна фотоелектрична система власної конструкції поєднує у собі високий рівень надійності, відмовостійкості та зручності технічного обслуговування. Запропоновані інженерні рішення забезпечують не лише підвищену енергетичну ефективність, а й стабільність роботи системи у реальних умовах експлуатації, що робить її повністю придатною для практичного впровадження у побутових фотоелектричних установках Полтавського регіону [17]

### 3.10. Узагальнююче техніко-економічне порівняння фотоелектричних систем

На завершальному етапі дослідження виконано узагальнююче техніко-економічне порівняння трьох варіантів фотоелектричних систем, що забезпечують однаковий рівень річної генерації електроенергії: стаціонарної системи з фіксованим кутом нахилу панелей, трекерної системи на базі заводського двоосьового трекера та оптимізованої трекерної фотоелектричної системи власної конструкції. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити ефективність кожної конфігурації з урахуванням не лише вартості, а й просторових, експлуатаційних та енергетичних чинників (див. рис. 3.5)

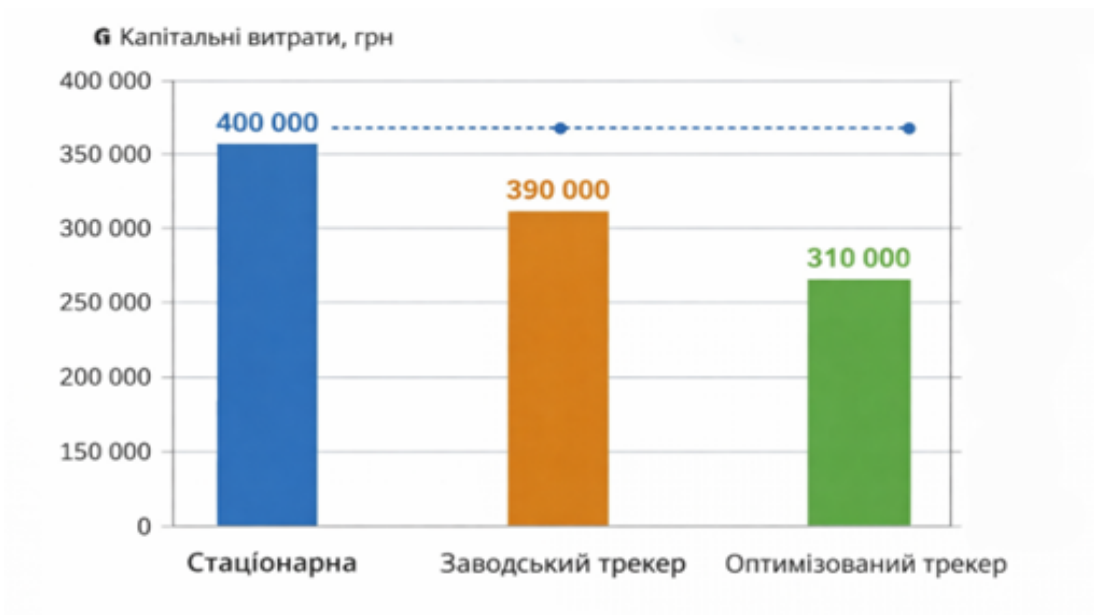


Рисунок 3.5 - Порівняння сумарних витрат та річної генерації трьох систем

Стаціонарна система, яка є найбільш поширеним рішенням у побутовому секторі, характеризується конструктивною простотою, однак для досягнення необхідного рівня генерації потребує більшої кількості фотоелектричних модулів та допоміжних металоконструкцій. Це призводить до збільшення займаної площі, складності монтажу та підвищених втрат електроенергії в ранкові й вечірні години через фіксований кут орієнтації. У результаті зростають як капітальні витрати, так і питомі втрати енергії протягом року.

Трекерна система з заводським двоосьовим механізмом забезпечує вищий рівень енергетичної ефективності та більш рівномірний добовий профіль генерації. Проте її застосування в умовах індивідуальних домогосподарств супроводжується суттєвими витратами на придбання спеціалізованого трекерного обладнання та сервісне обслуговування, що частково нівелює економічний ефект від підвищеної генерації.

Запропонована у роботі оптимізована трекерна система власної конструкції дозволяє зберегти функціональні переваги активного наведення панелей на Сонце, але при цьому істотно зменшити капітальні витрати за рахунок використання стандартних електромеханічних компонентів та уніфікованої несучої конструкції. Такий підхід створює передумови для впровадження трекерних технологій у побутових фотоелектричних системах без значного зростання інвестицій.

Таблиця 3.4 - Узагальнююче техніко-економічне порівняння фотоелектричних систем

<b>Критерій оцінки</b>	<b>Стаціонарна ФЕС</b>	<b>Трекерна (заводська)</b>	<b>Оптимізована трекерна</b>
Кількість панелей	Найбільша	Менша	Менша
Займана площа	Найбільша	Менша	Найменша
Добовий профіль генерації	Нерівномірний	Покращений	Покращений

Продовження таблиці 3.4 - Узагальнююче техніко-економічне порівняння фотоелектричних систем

Генерація у ранкові та вечірні години	Низька	Вища	Вища
Питома вартість 1 кВт·год	Висока	Середня	Низька
Втрати через орієнтацію	Значні	Менші	Мінімальні
Навантаження на АКБ	Підвищене	Помірне	Помірне
Складність обслуговування	Мінімальна	Підвищена	Контрольована

Аналіз наведених даних свідчить, що оптимізована трекерна фотоелектрична система не лише забезпечує енергетичні показники, співставні із заводськими трекерними рішеннями, але й характеризується меншою питомою вартістю виробленої електроенергії та меншою займаною площею. Саме зниження капітальних витрат при збереженні переваг активного наведення панелей є ключовим чинником, який робить оптимізовану систему більш привабливою для практичного застосування у побутових умовах [16]

### 3.11. Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано комплексне техніко-економічне порівняння стаціонарної, заводської трекерної та оптимізованої трекерної фотоелектричних систем, що забезпечують еквівалентний річний виробіток електричної енергії на рівні близько 20 000 кВт·год. Проведені розрахунки дозволили кількісно оцінити вплив конструктивних рішень, кількості встановлених панелей та типу системи орієнтації на кінцеву вартість виробленої електроенергії.

Встановлено, що стаціонарна система потребує більшої кількості сонячних модулів та значної площі для розміщення, що призводить до підвищених капітальних витрат і нерівномірного добового профілю генерації. Заводська трекерна система забезпечує підвищену

енергоефективність, однак її економічні показники обмежуються високою вартістю готових трекерних механізмів.

Запропонована оптимізована трекерна система власної конструкції поєднує переваги активного наведення панелей на Сонце з істотним зниженням вартості реалізації за рахунок використання стандартних електромеханічних та мікроконтролерних компонентів. Результати розрахунків показали, що така система має найменшу питому вартість виробленої електроенергії та забезпечує більш рівномірний добовий профіль генерації, що позитивно впливає на режим роботи інвертора й акумуляторної батареї.

Отримані результати підтверджують доцільність переходу від традиційних стаціонарних рішень до оптимізованих трекерних фотоелектричних систем для побутового застосування в умовах Полтавського регіону та створюють основу для формування остаточних узагальнюючих висновків роботи.

## ВИСНОВОК

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження ефективності використання сонячних трекерів у порівнянні зі стаціонарними фотоелектричними системами з урахуванням кліматичних, географічних, технічних та економічних особливостей Полтавської області. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії в умовах обмежених земельних ресурсів та зростаючих вимог до енергоефективності побутових і малих енергетичних установок.

У першому розділі узагальнено теоретичні основи функціонування фотоелектричних систем, проаналізовано конструктивні особливості сучасних сонячних модулів і встановлено, що основним обмеженням стаціонарних систем є фіксована орієнтація панелей, яка не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал сонячної інсоляції протягом доби та року. Водночас трекерні системи завдяки активному відстеженню положення Сонця створюють передумови для підвищення питомої генерації електроенергії.

У другому розділі сформовано технічну конфігурацію трекерної фотоелектричної системи, виконано розрахунок енергоспоживання житлового будинку, визначено необхідну потужність ФЕС, обґрунтовано вибір сонячних панелей, інвертора, акумуляторної батареї та побудовано електричну структуру системи. Детально розглянуто конструкцію та функціональну архітектуру двоосьової трекерної системи і сформульовано узагальнені технічні вимоги до побудованої ФЕС, що забезпечило створення цілісної інженерної моделі системи для подальшого порівняльного аналізу.

У третьому розділі виконано комплексне техніко-економічне порівняння стаціонарної, заводської трекерної та оптимізованої трекерної фотоелектричних систем, які забезпечують еквівалентний річний виробіток електроенергії на рівні близько 20 000 кВт·год. Проведені розрахунки дозволили кількісно оцінити вплив конструктивних рішень, кількості

встановлених панелей та типу системи орієнтації на кінцеву вартість виробленої електроенергії. Встановлено, що стаціонарна система потребує більшої кількості сонячних модулів і значної площі для розміщення, що призводить до підвищених капітальних витрат та нерівномірного добового профілю генерації. Заводська трекерна система забезпечує підвищену енергоефективність, однак її економічні показники обмежуються високою вартістю готових трекерних механізмів.

Запропонована в роботі оптимізована трекерна система власної конструкції поєднує переваги активного наведення панелей на Сонце з істотним зниженням вартості реалізації за рахунок використання стандартних електромеханічних та мікроконтролерних компонентів. Результати розрахунків показали, що така система має найменшу питому вартість виробленої електроенергії та забезпечує більш рівномірний добовий профіль генерації, що позитивно впливає на режими роботи інвертора й акумуляторної батареї.

Економічний аналіз підтвердив, що трекерні фотоелектричні системи, незважаючи на більшу конструктивну складність, дозволяють отримувати заданий обсяг електроенергії при меншій кількості модулів, меншій займаній площі та нижчій питомій вартості виробленої електроенергії у середньо- та довгостроковій перспективі. Додатковою перевагою трекерної системи є більш рівномірний добовий профіль генерації, який позитивно впливає на експлуатаційні режими елементів ФЕС.

Таким чином, результати магістерської роботи підтверджують доцільність застосування трекерних фотоелектричних систем для побутових установок у кліматичних умовах Полтавської області та створюють обґрунтовану основу для впровадження оптимізованих трекерних конструкцій як ефективнішого та економічно доцільнішого рішення у порівнянні зі стаціонарними фотоелектричними установками

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство енергетики України. Стратегія розвитку відновлюваної енергетики України до 2035 року з урахуванням кліматичних зобов'язань. – Київ: Міненерго, 2023. – с. 12–18.
2. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Фотоелектричні системи: термін служби, деградація та гарантійні характеристики модулів. – Київ, 2022. – с. 5–10.
3. IRENA. Renewable Power Generation Costs and Tracking Technologies Efficiency. – Abu Dhabi, 2023. – с. 81–100.
4. IEEE Power & Energy Society. Maximum Power Point Tracking Methods for Grid-Connected PV Systems. – IEEE, 2022. – с. 154–162.
5. ДБН В.2.5-23:2023 Проектування електроустановок з відновлюваними джерелами енергії. – с. 20–25.
6. ДСТУ EN 1991-1-4:2022 Єврокод 1. Навантаження на конструкції. Вітрові та снігові навантаження. – с. 5–15.
7. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. – Wiley, 2021. – с. 24–52.
8. Fraunhofer ISE. Performance Comparison of Single-Axis and Dual-Axis Tracking PV Systems. – Germany, 2023. – с. 8–12.
9. Український гідрометеорологічний центр. Кліматичний атлас України. Сонячна радіація та інсоляція території України. – Київ, 2022. – с. 42–48.
10. ДП «УкрНДГМІ». Сезонні коливання сонячної радіації на території України. - Харків, 2021.
11. НУБіП України. Рекомендації щодо орієнтації та кута нахилу сонячних панелей в Україні. – Київ, 2020. – с. 5–12.
12. SolarGIS. Photovoltaic Yield and Performance Assessment in Eastern Europe. – 2023. – с. 10–15.
13. ДСТУ ІЕС 60364-8-1:2022 Енергоефективні електроустановки житлових будинків. – с. 8–20.

14. NREL (USA). Auxiliary Power Consumption of Solar Tracking Systems. – 2022. – с. 14–22.
15. Battery University. Sizing of Battery Storage for Standalone and Hybrid PV Systems. – 2023. – с. 1–5.
16. Національний університет «Львівська політехніка». Методика оцінювання питомих капітальних витрат та рентабельності трекерних фотоелектричних систем малої потужності. – Львів, 2022. – с. 120–127.
17. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Експлуатаційна надійність та відмовостійкість трекерних фотоелектричних установок у кліматичних умовах України. – Київ, 2023. – с. 45–54.

*Додаток А**Код двоосьового трекера з нічною парковкою*

```
#include <Servo.h>

// Серводвигуни
Servo servoX;
Servo servoY;

// Піни підключення серво
int pinServoX = 9;
int pinServoY = 10;

// Піни фоторезисторів
int LX = A0; // Лівий X
int RX = A1; // Правий X
int LY = A2; // Верхній Y
int RY = A3; // Нижній Y

// Кути сервоприводів
int angleX = 90; // середнє положення
int angleY = 50; // середній нахил

// Чутливість
int threshold = 15; // Мінімальна різниця для руху

// Нічний режим
int nightLevel = 70; // нижче цього рівня — ніч
bool nightMode = false;
void setup() {
    servoX.attach(pinServoX);
```

```
servoY.attach(pinServoY);

servoX.write(angleX);
servoY.write(angleY);

Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    // Зчитування датчиків
    int valLX = analogRead(LX);
    int valRX = analogRead(RX);
    int valLY = analogRead(LY);
    int valRY = analogRead(RY);

    // Середній рівень освітлення (для нічного режиму)
    int avgLight = (valLX + valRX + valLY + valRY) / 4;

    // Перевірка нічного режиму
    if (avgLight < nightLevel) {
        nightMode = true;
    } else {
        nightMode = false;
    }

    // Якщо ніч → панель у паркувальне положення
    if (nightMode) {
        angleX = 90; // по центру
        angleY = 0; // вниз, щоб не ловити вітер
        servoX.write(angleX);
        servoY.write(angleY);
    }
}
```

```

Serial.println("=== NIGHT MODE: PARK POSITION ===");
Serial.print("Light level: "); Serial.println(avgLight);
Serial.print("ServoX: "); Serial.println(angleX);
Serial.print("ServoY: "); Serial.println(angleY);
Serial.println();
delay(1000);
return;
}

```

```
// ОБЧИСЛЕННЯ РІЗНИЦЬ ПО Осях
```

```
int diffX = valLX - valRX;
```

```
int diffY = valLY - valRY;
```

```
// === КЕРУВАННЯ ПО ОСІ Х (горизонт) ===
```

```
if (abs(diffX) > threshold) {
    if (diffX > 0 && angleX < 180) angleX++;
    if (diffX < 0 && angleX > 0) angleX--;
}

```

```
// === КЕРУВАННЯ ПО ОСІ Y (вертикаль) ===
```

```
if (abs(diffY) > threshold) {
    if (diffY > 0 && angleY < 180) angleY++;
    if (diffY < 0 && angleY > 0) angleY--;
}

```

```
// Надсилання команд серво
```

```
servoX.write(angleX);
```

```
servoY.write(angleY);
```

```
// === Виведення в монітор порта ===
Serial.println("==== Sensor Data =====");
Serial.print("LX: "); Serial.print(valLX);
Serial.print(" | RX: "); Serial.println(valRX);
Serial.print("LY: "); Serial.print(valLY);
Serial.print(" | RY: "); Serial.println(valRY);

Serial.print("diffX: "); Serial.println(diffX);
Serial.print("diffY: "); Serial.println(diffY);

Serial.print("Servo X angle: "); Serial.println(angleX);
Serial.print("Servo Y angle: "); Serial.println(angleY);

Serial.print("Light avg: "); Serial.println(avgLight);
Serial.println("=====");
Serial.println();

delay(80);
}
```

Схема для Tinkercad (опис)

Фоторезистори:

LX → A0 + резистор 10k до GND

RX → A1 + резистор 10k

LY → A2 + резистор 10k

RY → A3 + резистор 10k

Серво:

Servo X: Signal → 9, +5V, GND

Servo Y: Signal → 10, +5V, GND

Нічна парковка

Коли середнє освітлення  $< 70 \rightarrow$

Панель повертається у положення:

X = 90° (центр)

Y = 0° (вниз)

У порт виводиться повідомлення:

"NIGHT MODE: PARK POSITION"

*Додаток Б*

*Публікація*

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції  
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:  
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**  
18 грудня 2025 року



**Полтава 2025**

**УДК 004.89 + 681.51**

Збірник наукових праць за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 18 грудня, 2025 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025. – 159 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор О.В. Шефер.

**Редакційна колегія:**

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Р.В. Захарченко – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

<i>В.В. Крицький, Р.С. Штигун</i>	
ТЕЛЕМЕХАНІКА МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НА ФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ.....	77
<i>А.Я. Кучеров, Р.В. Захарченко, А.І. Криворот</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ТРЕКЕРІВ У ПОРІВНЯННІ ЗІ СТАЦІОНАРНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ.....	80
<i>Ю.В. Кучма</i>	
ПОСТКВАНТОВА АВТЕНТИФІКАЦІЯ У ФЕДЕРАЦІЯХ ІДЕНТИЧНОСТЕЙ З АДАПТИВНИМИ ПОЛІТИКАМИ БЕЗПЕКИ .....	82
<i>Л.І. Леві, О.Ю. Білоус</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ВОДОПІДГОТОВКИ .....	85
<i>Д.С. Лісняк, О.Є. Петренко</i>	
ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ФІНАНСОВИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ.....	88
<i>С.В. Мигаль</i>	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО КЕРОВАНІ МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ 6G НА ОСНОВІ SDN ТА ГЕТЕРОГЕННИХ АРХІТЕКТУР.....	91
<i>І.П. Плюйко</i>	
КОМБІНОВАНІ ДЕТЕРМІНОВАНІ ТА АДАПТИВНІ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ У ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ.....	94
<i>Є.С. Проскурня, Н.В. Єрмілова</i>	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ УСТАНОВКИ БРИКЕТУВАННЯ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ .....	96
<i>Є.В. Самбур, С.Г. Кислиця</i>	
СУШІННЯ ЗЕРНА МЕТОДОМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ.....	99
<i>С.В. Соловійов, С.Г. Кислиця</i>	
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА СОНЯЧНИХ БАТАРЕЯХ .....	102

**УДК 621.34**

*А.Я. Кучеров, магістрант,*

*Р.В. Захарченко, к.т.н., доцент,*

*А.І. Криворот, к.т.н., доцент*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ТРЕКЕРІВ У ПОРІВНЯННІ ЗІ СТАЦІОНАРНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ**

Зростання попиту на електричну енергію, підвищення екологічних вимог та необхідність диверсифікації джерел енергії зумовлюють активний розвиток відновлюваної енергетики, зокрема фотоелектричних систем [1, 2]. Одним із ключових факторів, що визначає ефективність сонячних електростанцій, є спосіб орієнтації фотоелектричних модулів відносно Сонця.

У роботі виконано порівняльний аналіз стаціонарних і трекерних фотоелектричних систем з урахуванням кліматичних умов Полтавської області. Показано, що стаціонарні системи з фіксованим кутом нахилу панелей не забезпечують повного використання потенціалу сонячного випромінювання через добові та сезонні зміни положення Сонця, що призводить до втрат генерації у ранкові та вечірні години [3].

Розглянуто принципи дії та класифікацію сонячних трекерів, зокрема одновісних і двохвісних систем. Встановлено, що застосування трекерних установок дозволяє підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів на поверхню фотоелектричних модулів упродовж світлового дня, що забезпечує збільшення річного виробітку електроенергії на 25–45 % порівняно зі стаціонарними системами залежно від типу трекера та рівня інсоляції [4–6].

У межах дослідження виконано інженерні розрахунки енергоспоживання житлового будинку та визначено необхідну потужність фотоелектричної установки для стаціонарної та трекерної конфігурацій. Обґрунтовано вибір основного обладнання, зокрема сонячних панелей, інвертора та акумуляторних батарей, з урахуванням їх технічних характеристик і режимів експлуатації [7].

Окрему увагу приділено застосуванню двосторонніх (біфасціальних) сонячних панелей у складі трекерних систем. Показано, що поєднання двоосьових трекерів із біфасціальними модулями дозволяє додатково використовувати енергію відбитого та розсіяного сонячного випромінювання, що забезпечує підвищення сумарної генерації на 5–15 % без збільшення встановленої площі фотоелектричної системи [8, 9].

За результатами техніко-економічного аналізу встановлено, що хоча трекерні системи мають вищі початкові капітальні витрати, у довгостроковій перспективі вони характеризуються нижчою питомою вартістю виробленої електроенергії за рахунок підвищеного коефіцієнта використання встановленої потужності та більш рівномірного профілю генерації [10]. Це робить трекерні фотоелектричні системи доцільними для застосування в регіонах із достатнім рівнем сонячної інсоляції.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні побутових і малих комерційних фотоелектричних систем з метою підвищення їх енергетичної та економічної ефективності.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Boyle G. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
2. International Energy Agency. *Renewables 2023: Analysis and Forecast*. Paris: IEA, 2023.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th ed. New York: Wiley, 2013.
4. Kalogirou S.A. *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press, 2014.
5. NREL. *Best Practices for Solar Tracking Systems*. National Renewable Energy Laboratory, USA, 2020.
6. Abdallah S., Nijmeh S. *Two-axis sun tracking system with PLC control*. *Energy Conversion and Management*, 2004.
7. Masters G.M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Wiley, 2013.
8. Guo S. et al. *Energy yield analysis of bifacial PV modules with tracking systems*. *Solar Energy*, 2019.
9. Pelaez S.A. et al. *Bifacial PV system performance and modeling*. *Progress in Photovoltaics*, 2020.
10. Lazard. *Levelized Cost of Energy Analysis – Version 16.0*, 2023.

### RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF USING SOLAR TRACKER COMPARED TO STATIONARY PHOTOELECTRIC SYSTEMS

*A. Kucherov, master's student,*

*R. Zakharchenko, Ph.D., associate professor,*

*A. Kryvorot, Ph.D., associate professor*

*National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"*

Наукове видання

Збірник наукових праць за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції  
«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ: ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ,  
ПРАКТИКА»

---

Дизайн і комп'ютерна верстка  
Відповідальний за випуск

*Захарченко Р.В.*  
*Шефер О.В.*

Оригінал-макет виготовлено на кафедрі автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Національного університету  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
просп. Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011, Україна

*Додатов В*

*Презентація*

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Дослідження ефективності використання  
сонячних трекерів у порівнянні зі  
стаціонарними фотоелектричними системами**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Студент групи 601МЕ

Кучеров А.Я.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Захарченко Р.В.

Полтава 2025

**Мета роботи:** підвищення ефективності фотоелектричних систем шляхом розробки власної оптимізованої моделі сонячного трекера на основі порівняльного аналізу стаціонарних та серійних рухомих установок.

**Об'єкт дослідження:** процес генерації електроенергії фотоелектричними системами з різними типами орієнтації сонячних панелей.

**Предмет дослідження:** техніко-економічні показники стаціонарних ФЕС, стандартних трекерів та запропонованої оптимізованої конструкції трекера.

**Завдання дослідження:**

- 1 Проаналізувати сучасні технічні рішення для орієнтації фотоелектричних панелей.
- 2 Провести порівняльний аналіз енергоефективності стаціонарних систем та існуючих трекерів.
- 3 Виявити причини недостатньої ефективності стандартних трекерних систем в умовах експлуатації.
- 4 Розробити та обґрунтувати власну оптимізовану конструкцію трекерної ФЕС, що дозволяє підвищити ефективність системи.
- 5 Виконати порівняльний розрахунок окупності стандартних рішень та розробленої оптимізованої системи.

## СОНЯЧНА ІНСОЛЯЦІЯ ТА КЛІМАТИЧНІ УМОВИ (Полтавська область) 3



- Середньорічна інсоляція: 1100-1250 кВт·год/м<sup>2</sup>
- Кліматичні умови сприятливі для ФЕС
- Є потенціал підвищення генерації за рахунок трекерів

## РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДИНКУ

Назва	Кількість, шт.	Потужність приладу,	Загальна потужність,	Час роботи, годин за рік	кВт·год/ рік
		P, Вт	P <sub>Σ</sub> , Вт		
Холодильник	1	150	150	8320	1 248,0
Мікрохвильовка	1	1000	1000	300	3 000,0
Електрична духовка	1	3000	3000	400	1 200,0
Бойлер	1	1500	1500	1300	1 950,0
Варочна поверхня	1	3000	3000	500	1 500,0

• Середньодобове споживання: **46,46**

**кВт·год**

• Річне споживання: **16 958,0** **кВт·год**



• Визначено основні побутові електроспоживачі

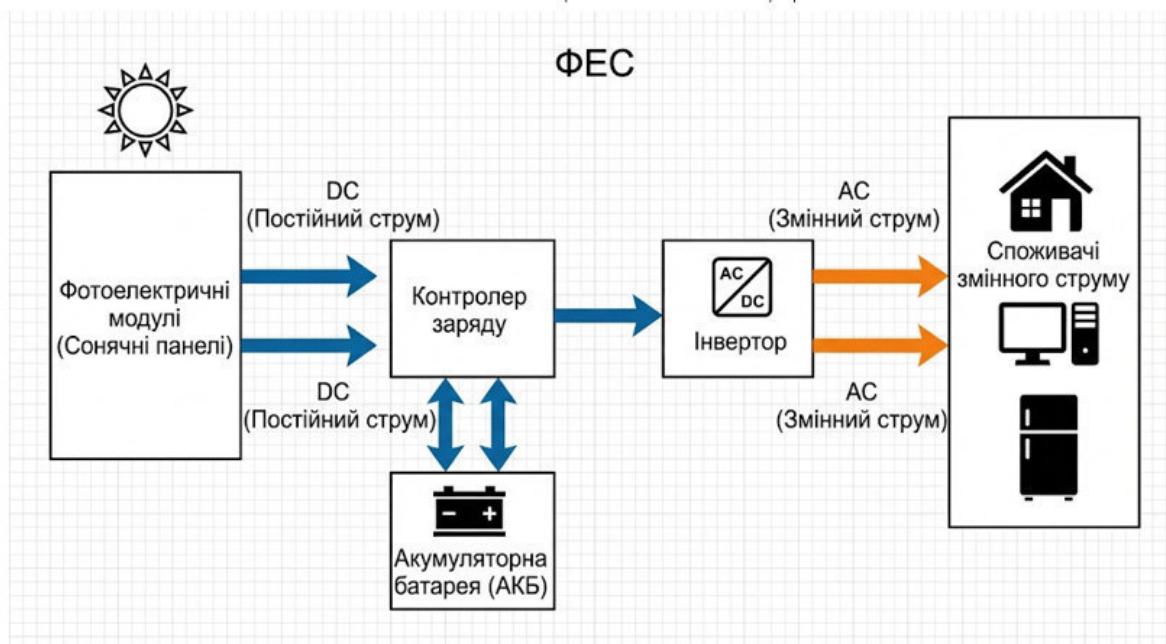
• Розраховано середньодобове та річне споживання

• Враховано пікові навантаження

• Дані використано для вибору потужності ФЕС

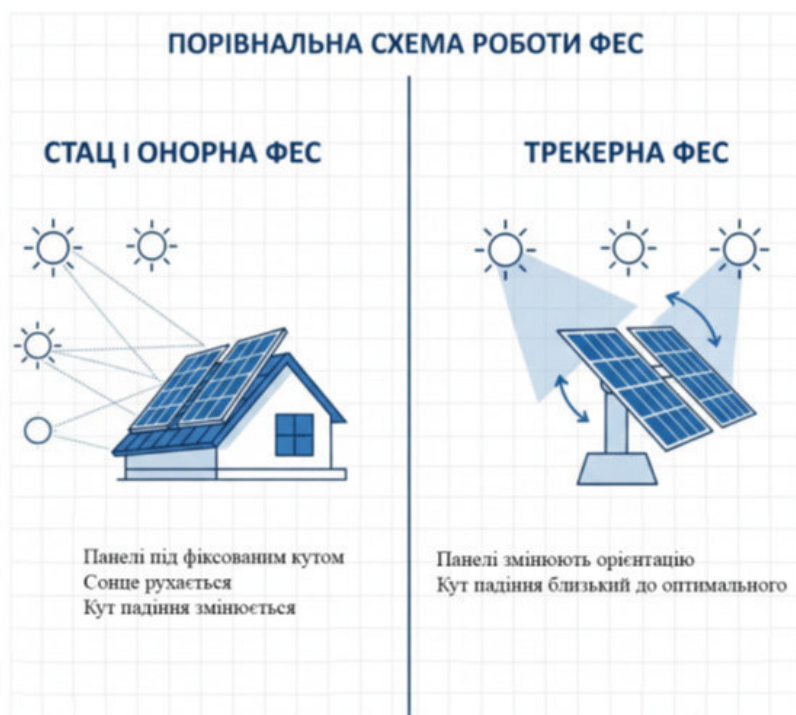
## ВИБІР КОНФІГУРАЦІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ФЕС

5



- Потужність ФЕС визначена на основі розрахунку споживання  $\approx 20\,000$  кВт · год/рік
- Обрано гібридну фотоелектричну систему
- Використано 20 двосторонніх модулів JA Solar JAM72D42-630/LB потужністю 630 Вт як основне джерело генерації
- Обраний інвертор Huawei Sun 2000-12KTL-M5 забезпечує перетворення та керування енергією
- Акумуляторні батареї Huawei серії Luna2000, 5 АКБ по 15 кВт·год кожна, підвищує надійність електропостачання

## ПОРІВНЯННЯ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ФЕС



### Стационарна ФЕС

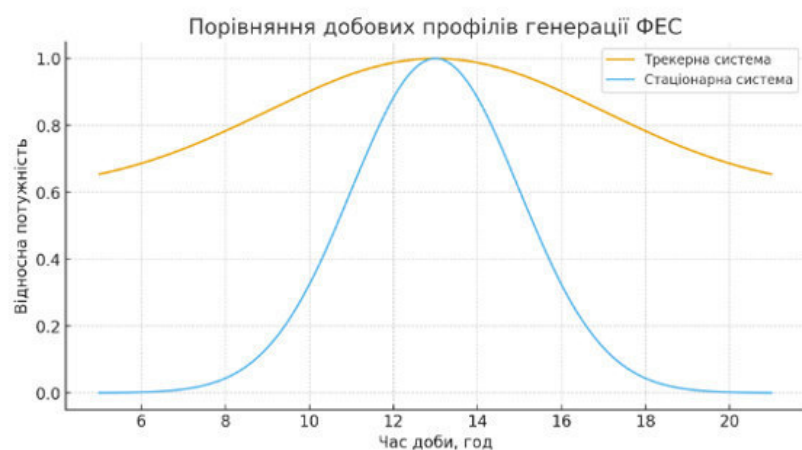
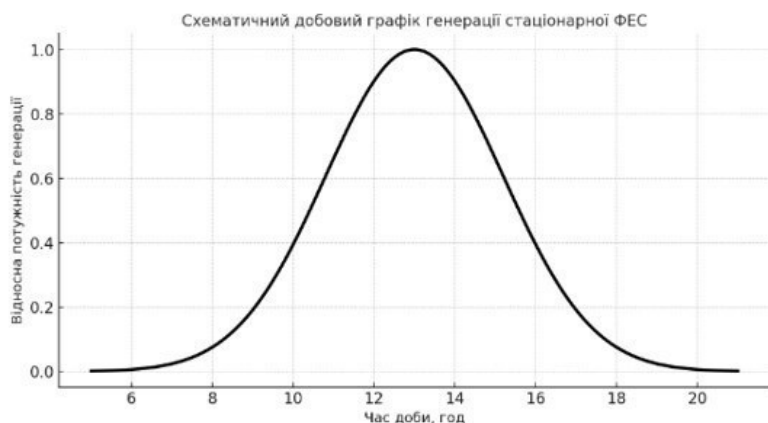
- Фіксований кут нахилу
- Оптимальна робота лише у певний момент доби
- Зростання втрат при зміні положення Сонця

### Трекерна ФЕС

- Змінна орієнтація панелей
- Підтримання оптимального кута падіння
- Потенційно вища генерація електроенергії

Ефективність фотоелектричної системи визначається кутом падіння сонячного випромінювання, трекерні системи у цьому плані кращі, за рахунок змінення орієнтації, що робить їх на 25-30% ефективішими

## ПОРІВНЯННЯ ДОБОВИХ ПРОФІЛІВ ГЕНЕРАЦІЇ



Як ми можемо бачити, добовий профіль генерації грає на рахунок трекерної ФЕС.

Для досягнення однакового річного виробітку стаціонарна ФЕС потребує більшої кількості модулів, що вплине на вартість та займану площу

Таким чином, ефективність фотоелектричної системи визначається не лише типом її орієнтації, але й конструктивними особливостями реалізації трекінгу

## КОМПАКТНІСТЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ ПЛОЩІ



В першу чергу щоб забезпечити однаковий профіль генерації для стаціонарної ФЕС порівняно з трекерною - потрібно встановити 30 панелей замість 20, що відіграє роль на корисному використанні площі.

## КІЛЬКІСНЕ ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

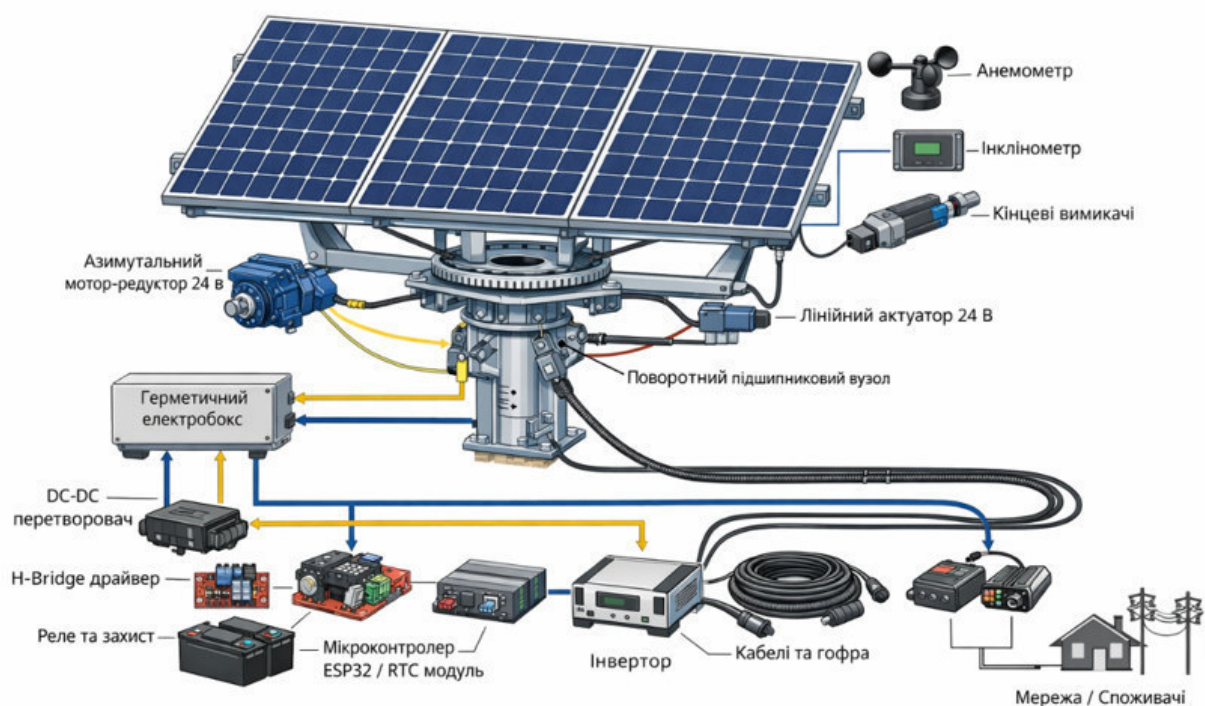
9

Стаття витрат	Стаціонарна ФЕС	Трекерна ФЕС	Коментар
Кількість сонячних панелей	30	20	Трекер потребує менше модулів
Вартість сонячних панелей	285 000 грн	190 000 грн	-95 000 грн
Металоконструкції	75 000 грн	–	Включені у трекер
Трекерна система	–	140 000 грн (Орієнтовно на 2025 рік)	Інтегрована конструкція
Монтажні роботи	40 000 грн	60 000 грн	Відмінність не значна
Річна генерація	≈ 20 000 кВт·год	≈ 20 000 кВт·год	Однаковий результат
Загальні капітальні витрати	400 000 грн	390 000 грн	+2.5% На користь трекера
Вартість 1 кВт·год (капітальні витрати)	20 грн/кВт·год	19.5 грн/кВт·год	Трекер вигідніший на 2.5 %

- Заводська трекерна ФЕС має не суттєво меншу вартість за стаціонарну попри збільшення кількості панелей для стаціонарної ФЕС
- Приріст генерації не компенсує додаткові капітальні витрати
- Вартість 1 кВт·год електроенергії зменшується лише на ≈ 2,5 %
- Економічна доцільність застосування є обмеженою.

Саме тому в роботі було поставлено завдання розробки власної трекерної фотоелектричної системи, яка б забезпечила суттєве підвищення ефективності без значного зростання вартості.

## ОПТИМІЗОВАНА ТРЕКЕРНА СИСТЕМА ВЛАСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ 10



- Розроблено трекерну ФЕС з урахуванням економічних обмежень
- Скорочення капітальних витрат за рахунок здешевлення компонентів
- Компактна конструкція з однією опорою
- Орієнтація системи на використання в приватному домогосподарстві

## ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ТА НАДІЙНІСТЬ

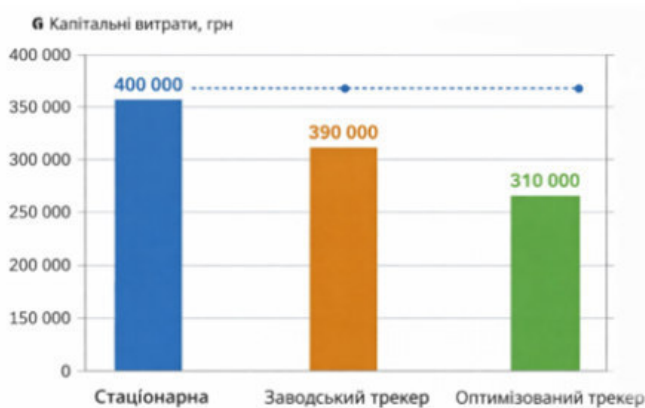


- Конструкція адаптована до кліматичних умов експлуатації
- Стійкість до вітрових навантажень за рахунок централізованої опори
- Зменшена кількість рухомих механічних елементів
- Вузли системи захищені від впливу навколишнього середовища
- Простота технічного обслуговування у порівнянні з заводськими трекерами
- За рахунок власної розробки, є можливість заміни компонентів якщо вони вийдуть з ладу

## ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ВИСНОВКИ

12

Критерій оцінки	Стаціонарна ФЕС	Трекерна (заводська)	Оптимізована трекерна
Кількість панелей	Найбільша	Менша	Менша
Займана площа	Найбільша	Менша	Найменша
Генерація у ранкові та вечірні години	Низька	Вища	Вища
Добовий профіль генерації	Нерівномірний	Покращений	Покращений
Питома вартість 1 кВт·год	Висока	Середня	Низька
Втрати через орієнтацію	Значні	Менші	Мінімальні
Навантаження на АКБ	Підвищене	Помірне	Помірне
Складність обслуговування	Мінімальна	Підвищена	Контрольована



- Зменшення собівартості виробленої електроенергії
- Скорочення капітальних витрат за рахунок власних компонентів, а не готових рішень
- Відсутність суттєвого зростання вартості конструкції
- Покращене співвідношення між витратами та річною генерацією
- Економічна доцільність використання у приватному домогосподарстві

## ВИСНОВКИ

- Проаналізовано стаціонарні та трекерні фотоелектричні системи для умов приватного домогосподарства
- Встановлено обмежену економічну доцільність застосування заводських трекерних ФЕС
- Розроблено оптимізовану трекерну фотоелектричну систему власної конструкції
- Забезпечено підвищення річної генерації електроенергії порівняно зі стаціонарною ФЕС
- Зменшено кількість сонячних модулів та займану площу встановлення
- Підтверджено практичну придатність та експлуатаційну надійність системи
- Доведено економічну ефективність запропонованого рішення



АНАЛІЗ ФЕС

ВЛАСНА  
КОНСТРУКЦІЯ

ГЕНЕРАЦІЯ



ВИТРАТИ

ПРИВАТНЕ  
ДОМОГОСПОДАРСТВО

Дякую за увагу!