

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на тему «Модернізація автоматизованої системи електроприводу
трекера зміни кута сонячних панелей автономної електростанції»**

Здобувач Толочний Д.С.

4 курс групи АЕМ-40

Керівник: Шейда Голбад К.А. д.ф.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

В.о. завідувача кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

Одеса – 2026

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П. М. Платонова

Кафедра: автоматизація технологічних, електромеханічних і робототехнічних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 141 – Електрична інженерія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри Е та М
д.т.н, проф. Петро ОСАДЧУК

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Толочного Дмитра Сергійовича

1. Тема роботи: «Модернізація автоматизованої системи електроприводу трекера зміни кута сонячних панелей автономної електростанції»

Керівник роботи: Шейда Голбад Камбіз Ахмадович, д.ф.т.н., доцент.

2. Затверджено наказом ОНТУ № 58-03 від 30.01.26 р.

Строк подання студентом роботи 14.06.26р.

3. Вихідні дані до роботи: СЕС з площею 20,64 м.кв.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Огляд літератури. Огляд існуючої конструкції. Розрахунок оптимального керування кутом нахилу сонячних панелей. Розрахунок і підбір основних компонентів проекрованої системи. Підбір мотор-редуктора. Вибір і обґрунтування комплектуючих для системи керування кутом повороту сонячних панелей. Економічна частина. Вимоги безпеки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації.

1. Актуальність теми. 2. Обладнання та схема підключення мережевої сонячної електростанції. 3. Схема роботи резервної та гібридної сонячної електростанції. 4. Принцип роботи одне та двоосьового сонячного трекера. 5. Список необхідних пристроїв для сонячного трекера. 6. Силові та кінематичні розрахунки сонячного трекера. 7. Технічні характеристики мотор редуктора BLDC-D110BLD600-48A-30S із планетарним редуктором. 8. Паспортні дані черв'ячного опорно-поворотного пристрою SE5. 9. Паспортні

дані контролера BLD-750. 10. Розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи та електроприводу трекера. 11. Схема імітаційної моделі безщіткового електродвигуна постійного струму із шестиступінчастим регулюванням. 12. Графіки зміни швидкості та електромагнітного моменту при різних навантаженнях

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Консультант	Підпис, дата	
			завдання видав	завдання прийняв
1	Аналіз літературних джерел	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.		
2	Вибір електроприводу	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.		
3	Визначення параметрів апаратури управління	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.		
4	Економічна обґрунтованість			
5	Охорона праці			

7. Дата видачі завдання: «02» лютого 2026 р.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Завдання прийняв до виконання _____ Толочний Д.С.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ Актуальність теми. Мета і завдання роботи. Об'єкт і предмет дослідження.	10.02.2026.	
2	Огляд літератури і аналіз існуючих систем. Розрахунок генерації електроенергії.	27.02.2026.	
4	Проектування системи керування положенням сонячних панелей. Розрахунок вітрових, масових навантажень на систему	20.03.2026.	
5	Розробка математичних моделей системи	14.04.2026	
6	Розрахунок економічної доцільності і ефективності.	08.05.2026	
7	Охорона праці та безпека життєдіяльності. Висновки роботи.	28.05.2026	
8	Перевірка роботи на доброчесність	12.06.2026	
9	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи	06.06.2026	
10	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Толочний Д.С.

Керівник роботи _____ Шейда Голбад К.А.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних веб-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Толочний Д.С.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації автоматизованої системи електроприводу трекера зміни кута нахилу сонячних панелей автономної електростанції. У роботі розглянуто принципи роботи сонячних електростанцій, їх основні типи та складові елементи. Проведено аналіз сучасних систем сонячного трекінгу, їх конструктивних особливостей та способів керування. У результаті виконання роботи запропоновано модернізовану систему керування електроприводом, яка забезпечує більш точне позиціонування сонячних панелей та підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої системи в автономних сонячних електростанціях для підвищення їх енергетичної ефективності та надійності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сонячна електростанція, сонячний трекер, електропривід, автоматизована система керування, фотоелектричні панелі.

ABSTRACT

The diploma thesis is devoted to the modernization of the automated electric drive system of a tracker for changing the tilt angle of solar panels in an autonomous power plant. The paper examines the operating principles of solar power plants, their main types, and structural components. An analysis of modern solar tracking systems, their design features, and control methods has been carried out. As a result of the work, a modernized electric drive control system has been proposed, which provides more accurate positioning of solar panels and improves the efficiency of converting solar energy into electrical energy. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the developed system in autonomous solar power plants to increase their energy efficiency and reliability.

KEYWORDS: solar power plant, solar tracker, electric drive, automated control system, photovoltaic panels.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1 Аналіз сучасного стану розвитку сонячної енергетики та автономних електростанцій.....	9
1.2 Основні типи сонячних електростанцій.....	11
1.3 Системи сонячного трекінгу.....	15
1.4 Елементи системи сонячних трекерів.....	21
РОЗДІЛ 2. МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРА АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	22
2.1 Опис об'єкта модернізації.....	22
2.2 Порівняльний аналіз електроприводів.....	24
2.3 BLDC-електропривід у системах сонячного трекера.....	27
2.4 Обґрунтування та розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи та електроприводу трекера.....	30
2.5 Вибір та обґрунтування одноосьового сонячного трекера.....	31
2.6 Розрахунок приросту генерації.....	32
2.7 Електрична схема фотоелектричного масиву.....	34
2.8 Обґрунтування використання одного MPPT.....	34
2.9 Розрахунок навантажень.....	35
2.10 Система кріплення панелей.....	37
2.11 Розрахунок сумарного навантаження на привод одноосьового сонячного трекера.....	38
2.12 Вибір привода.....	44
2.13 Принцип роботи системи автоматичного стеження за Сонцем.....	46

					КРБ. АТЕіРС.1.58-03.2.1			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Толочний Д.С.			Модернізація автоматизованої системи електроприводу трекера зміни кута сонячних панелей автономної електростанцій	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник		Шейда Голбад К.А.				у	5	74
Реценз.						АЕМ-40		
Консулт.								

2.14 Порівняльний аналіз базової та модернізованої структури привода сонячного трекера.....	53
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ.....	58
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК.....	60
4.1 Загальні інвестиції.....	61
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	62
4.3 Річна економія електроенергії.....	65
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	67
5.1 Основні небезпечні та шкідливі фактори.....	67
5.2 Електробезпека.....	67
5.3 Вимоги під час обслуговування.....	68
5.4 Пожежна безпека.....	69
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	73

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого зростання енергоспоживання та необхідності зменшення залежності від традиційних джерел енергії особливої актуальності набуває використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики. Сонячні електростанції є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку альтернативної енергетики завдяки екологічній безпечності, невичерпності енергетичного ресурсу та можливості автономного функціонування.

Ефективність роботи сонячних панелей значною мірою залежить від кута падіння сонячного випромінювання на їхню поверхню. За стаціонарного розміщення фотомодулів протягом дня змінюється положення сонця відносно панелей, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії системи та втрати частини потенційної електричної енергії.

Одним із шляхів підвищення продуктивності автономних сонячних електростанцій є застосування автоматизованих систем електроприводу трекерів, які забезпечують безперервне орієнтування панелей у напрямку максимального сонячного випромінювання.

Актуальність теми. Сучасні системи сонячного трекінгу базуються на використанні електроприводів, мікроконтролерних систем керування, сенсорів освітленості та алгоритмів автоматичного позиціонування. Проте існуючі системи часто характеризуються недостатньою точністю позиціонування, підвищеним енергоспоживанням приводу, складністю конструкції або низькою надійністю в умовах автономної роботи. У зв'язку з цим актуальним є питання модернізації автоматизованої системи електроприводу трекера зміни кута сонячних панелей з метою підвищення ефективності функціонування автономної електростанції.

Об'єктом дослідження є автоматизована система електроприводу трекера сонячних панелей автономної електростанції.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Предметом дослідження є процеси автоматичного керування електроприводом системи зміни кута нахилу сонячних панелей.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети в дипломній роботі використано комплекс теоретичних та практичних методів дослідження. Для дослідження роботи системи електроприводу використовувалися методи теорії автоматичного керування, електротехнічного аналізу та математичного моделювання. Також використовувалися методи комп'ютерного моделювання та імітації роботи системи в різних режимах експлуатації, що дозволило визначити оптимальні параметри функціонування автоматизованої системи зміни кута сонячних панелей.

Наукова і практична новизна отриманих результатів. Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні автоматизованої системи електроприводу трекера сонячних панелей автономної електростанції шляхом підвищення точності автоматичного позиціонування фотомодулів відносно джерела сонячного випромінювання та оптимізації режимів роботи електроприводу. У результаті дослідження вдосконалено алгоритм керування електроприводом системи зміни кута нахилу сонячних панелей, що дозволяє підвищити стабільність роботи системи в умовах змінної інтенсивності сонячного випромінювання та зовнішніх впливів. Практична значущість роботи полягає у можливості застосування модернізованої системи електроприводу в автономних сонячних електростанціях для підвищення продуктивності генерації електричної енергії. Запропоновані технічні рішення дозволяють збільшити ефективність роботи сонячних панелей, зменшити втрати енергії та підвищити надійність функціонування системи трекінгу.

Результати роботи можуть бути використані під час проєктування та модернізації систем автоматичного керування сонячними трекерами, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти за спеціальностями, пов'язаними з електромеханікою, автоматизацією та відновлюваною енергетикою.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз сучасного стану розвитку сонячної енергетики та автономних електростанцій

Сучасний розвиток світової енергетики характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є сонячна енергетика, яка забезпечує отримання електричної енергії шляхом перетворення сонячного випромінювання у електричний струм за допомогою фотоелектричних модулів.

Основними перевагами сонячної енергетики є:

- невичерпність джерела енергії;
- екологічна безпечність;
- відсутність шкідливих викидів;
- можливість автономного електропостачання;
- низькі експлуатаційні витрати.

Особливо актуальним використання автономних сонячних електростанцій є для віддалених об'єктів, приватних домогосподарств, систем резервного живлення та промислових об'єктів, де відсутнє централізоване електропостачання або необхідне підвищення енергетичної незалежності.

Сонячна електростанція — це енергетична система, призначена для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою фотоелектричних модулів. Використання сонячних електростанцій є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку альтернативної енергетики, оскільки сонячна енергія є екологічно чистим, відновлюваним та практично невичерпним джерелом енергії.

Основою роботи сонячної електростанції є фотоелектричний ефект, який полягає у виникненні електричного струму в напівпровідникових матеріалах під дією сонячного світла. Фотоелектричні панелі складаються з

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

великої кількості сонячних елементів, які перетворюють світлову енергію в електричну.

Принцип роботи сонячної електростанції базується на фотоелектричному ефекті, при якому енергія сонячного випромінювання перетворюється в електричну енергію. Потужність сонячної панелі залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, площі фотомодуля та коефіцієнта корисної дії панелі. Потужність, що виробляється сонячною панеллю, визначається за формулою:

$$P = E \cdot S \cdot \eta \quad (1.1)$$

де:

P — потужність сонячної панелі, Вт;

E — інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²;

S — площа поверхні панелі, м²;

η — коефіцієнт корисної дії панелі.

Ефективність роботи фотоелектричних модулів значною мірою залежить від кута падіння сонячних променів на поверхню панелі.

Максимальна потужність досягається за умови перпендикулярного падіння сонячного випромінювання. Залежність потужності від кута падіння променів визначається виразом:

$$P = P_{max} \cos \alpha \quad (1.2)$$

де:

P_{max} — максимальна потужність панелі;

α — кут між нормаллю до поверхні панелі та напрямком сонячного випромінювання.

Під дією сонячного випромінювання фотоелектричні модулі генерують постійний електричний струм. Далі електроенергія надходить до контролера заряду, який регулює процес заряджання акумуляторних батарей та захищає систему від перевантажень.

У автономних системах електроенергія накопичується в акумуляторних батареях, після чого через інвертор постійний струм перетворюється у змінний струм напругою 220 В для живлення побутових або промислових споживачів.

У процесі руху Сонця протягом дня кут падіння сонячних променів постійно змінюється, що призводить до зниження ефективності стаціонарно встановлених сонячних панелей. Для підвищення продуктивності сонячних електростанцій використовуються системи автоматичного стеження за Сонцем — сонячні трекери.

1.2 Основні типи сонячних електростанцій

Залежно від способу роботи та підключення сонячні електростанції поділяються на:

- мережеві;
- резервні;
- автономні;
- гібридні.

Мережеві (on-grid) сонячні електростанції являють собою фотоелектричні системи, призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з подальшою передачею її до централізованої електричної мережі. Генерація електроенергії здійснюється за допомогою сонячних панелей, які на основі фотоелектричного ефекту виробляють постійний електричний струм, що надалі перетворюється інвертором у змінний струм необхідних параметрів.

Мережеві сонячні електростанції можуть функціонувати як у режимі комерційної генерації електроенергії із продажем надлишкової енергії до загальної енергосистеми за «зеленим тарифом», так і для забезпечення власного енергоспоживання об'єкта. У випадку недостатньої генерації електроенергії система автоматично використовує електроенергію із

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

зовнішньої мережі, що забезпечує безперервність електропостачання споживачів.

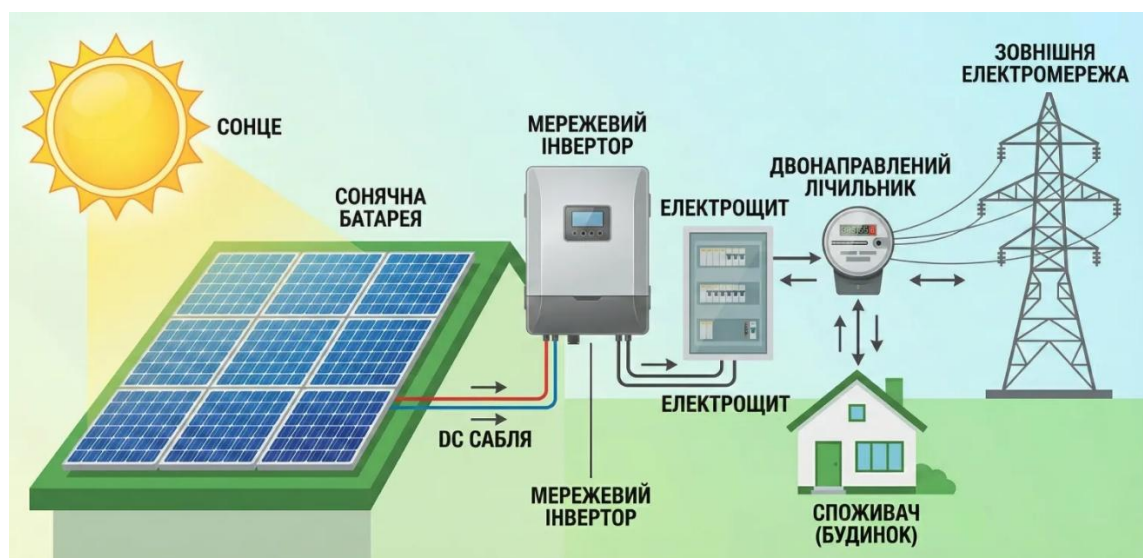


Рис. 1.1 Обладнання та схема підключення мережевої сонячної електростанції

Резервна сонячна електростанція використовується для забезпечення безперебійного електропостачання об'єктів у випадках нестабільної роботи централізованих електричних мереж. Такі системи доцільно застосовувати в умовах частих аварійних відключень, перепадів напруги або недостатньої потужності зовнішньої мережі.

Принцип роботи резервної сонячної електростанції полягає у накопиченні електричної енергії в акумуляторних батареях з подальшим автоматичним живленням споживачів у періоди відсутності або погіршення параметрів централізованого електропостачання. За наявності напруги у зовнішній мережі система може працювати в режимі заряджання акумуляторів та підтримки резервного джерела живлення.

Використання резервних сонячних електростанцій дозволяє підвищити надійність електропостачання, забезпечити автономність критично важливих споживачів та зменшити залежність від нестабільної роботи електричних мереж.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

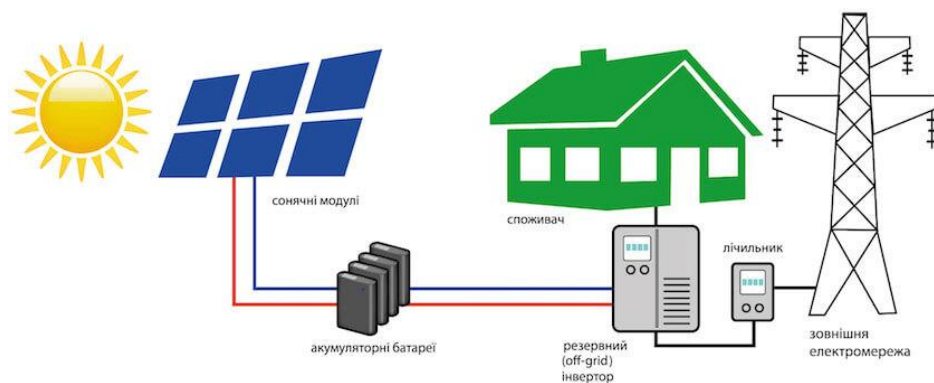


Рис. 1.2 Схема роботи резервної сонячної електростанції

Гібридні сонячні електростанції являють собою комбіновані енергетичні системи, призначені для підвищення надійності та ефективності електропостачання шляхом спільного використання декількох джерел енергії. До складу таких систем можуть входити сонячні панелі, централізована електрична мережа, акумуляторні батареї, вітрогенератори та резервні дизельні або бензинові генератори.

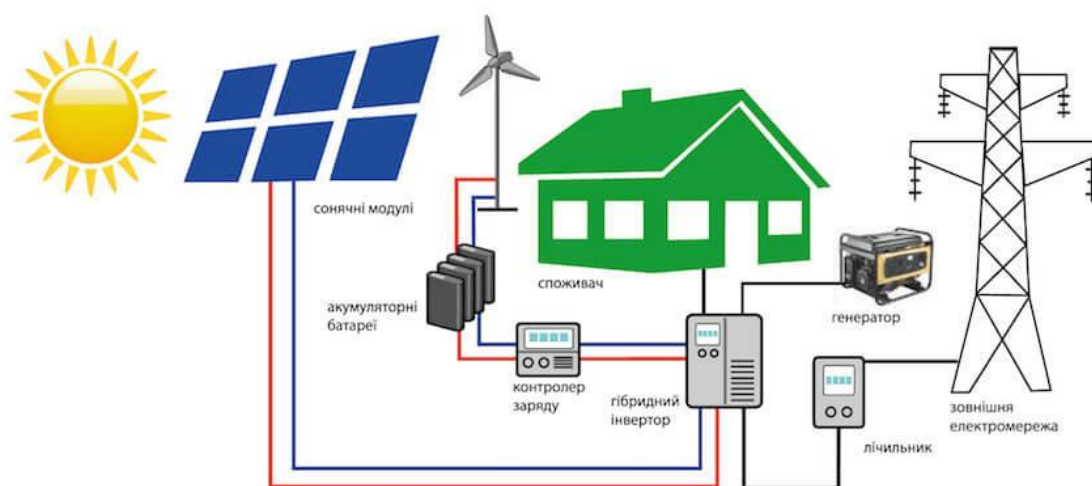


Рис. 1.3 Схема роботи гібридної сонячної електростанції

Принцип роботи гібридної сонячної електростанції полягає в автоматичному розподілі навантаження між доступними джерелами енергії залежно від режиму роботи системи, рівня генерації сонячної енергії та потреб споживачів. У разі недостатньої генерації електроенергії сонячними панелями

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

система може автоматично використовувати енергію з акумуляторних батарей, централізованої мережі або резервного генератора.

Застосування гібридних сонячних електростанцій забезпечує підвищення енергетичної незалежності, безперебійність електропостачання та оптимізацію використання відновлюваних джерел енергії. Крім того, такі системи дозволяють зменшити витрати на споживання електроенергії та підвищити загальну надійність енергосистеми.

Автономні сонячні електростанції працюють незалежно від централізованої електромережі та забезпечують живлення споживачів за рахунок накопичення енергії в акумуляторних батареях. Типова структура автономної сонячної електростанції включає:

- сонячні панелі;
- контролер заряду;
- акумуляторні батареї;
- інвертор;
- систему автоматичного керування;
- електропривід трекера.



Рис. 1.4 Принцип роботи автономної сонячної електростанції

Попри значні переваги, автономні сонячні електростанції мають ряд недоліків:

- залежність від погодних умов;
- нерівномірність генерації енергії;
- зниження ефективності при неправильному куті встановлення панелей;
- втрати енергії в системах накопичення;
- необхідність автоматичного регулювання положення панелей.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення продуктивності є використання автоматизованих систем орієнтації сонячних панелей. Застосування трекерів дозволяє збільшити виробіток електроенергії в середньому на 25–40 % порівняно зі стаціонарними системами.

1.3 Системи сонячного трекінгу

Сонячний трекер — це автоматизована механічна система, призначена для зміни просторового положення фотоелектричних панелей відповідно до руху сонця протягом дня та року. Основною метою застосування трекера є забезпечення максимально перпендикулярного падіння сонячного випромінювання на поверхню фотомодулів, що дозволяє підвищити ефективність генерації електричної енергії.



Рис. 1.5 Принцип роботи сонячного трекера

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Використання сонячних трекерів у складі сонячних електростанцій дозволяє збільшити виробіток електроенергії порівняно зі стаціонарно встановленими панелями в середньому на 20–45 %, залежно від географічних умов, типу системи та алгоритму керування.

Основні функції сонячного трекера:

- автоматичне орієнтування сонячних панелей на джерело випромінювання;
- підвищення коефіцієнта використання сонячної енергії;
- зменшення втрат енергії через невдалий кут падіння променів;
- оптимізація роботи автономних та мережевих сонячних електростанцій.

Принцип роботи трекера базується на постійному відстеженні положення сонця за допомогою:

- фотодатчиків (LDR-сенсорів);
- астрономічних алгоритмів (розрахунок положення сонця за координатами та часом).

Отримані дані передаються до системи керування (мікроконтролера), яка формує сигнали для електроприводу. Електропривід, у свою чергу, змінює кут нахилу або повороту панелей.

За конструкцією розрізняють одновісні та двовісні сонячні трекери.

Одновісні трекери (single-axis tracker) — це системи автоматичного позиціонування фотоелектричних модулів, які забезпечують обертання сонячних панелей навколо однієї осі. Такі системи є компромісом між складністю конструкції, вартістю та підвищенням ефективності генерації електроенергії. Залежно від напрямку осі обертання одновісні трекери поділяються на два основні типи: забезпечують обертання панелей навколо однієї осі (схід–захід або верх–низ).

Трекери типу «схід–захід» (East–West tracking). У даному випадку вісь обертання розташована вертикально або під невеликим кутом, а панелі повертаються протягом дня зі сходу на захід, слідуючи за рухом сонця по небосхилу.

Особливості:

- оптимізовані для денного руху сонця;
- найпоширеніший тип одновісних трекерів;
- забезпечують приріст генерації приблизно 20–30%.

Принцип роботи: система змінює азимутальний кут положення панелі відповідно до часу доби або сигналів датчиків освітлення, забезпечуючи максимальне освітлення протягом дня.

2. Трекери типу «верх–низ» (North–South / tilt tracking). У таких системах вісь обертання розташована горизонтально, і панель змінює кут нахилу (вгору–вниз) залежно від висоти сонця над горизонтом.

Особливості:

- адаптація до сезонної зміни висоти сонця;
- більш ефективні в регіонах із значною зміною сонячної висоти протягом року;
- приріст генерації зазвичай становить 15–25%.

Принцип роботи: панель змінює кут нахилу (елевацію), компенсуючи зміну висоти Сонця протягом дня або сезону.

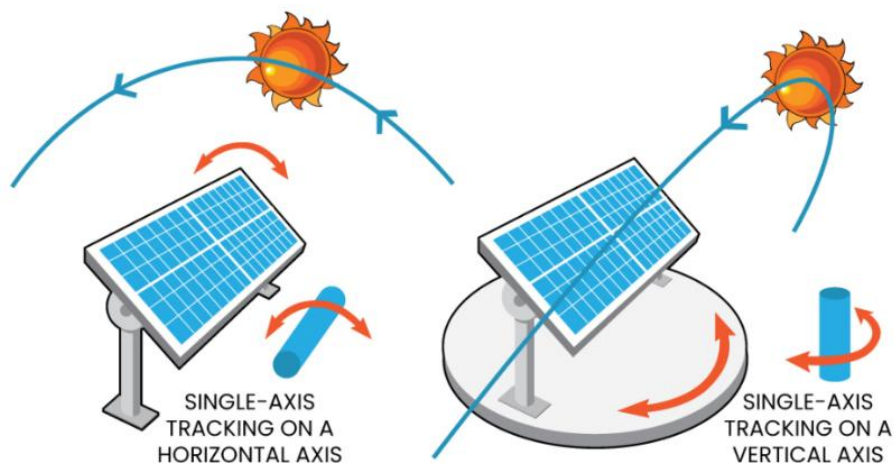


Рис. 1.6 Порівняння типів одновісних трекерів Схід–захід → Верх–низ

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

2. Двовісні сонячні трекири (dual-axis tracker) — це автоматизовані системи орієнтації фотоелектричних панелей, які забезпечують обертання сонячних модулів одразу навколо двох взаємно перпендикулярних осей по азимуту та по куту висоти сонця. Такі системи дозволяють точно підтримувати оптимальний кут падіння сонячного випромінювання на поверхню панелі протягом усього дня та в різні пори року.

Принцип роботи двовісного трекара базується на безперервному визначенні поточного положення сонця та корекції положення сонячної панелі за двома координатами:

- азимут (α) — горизонтальний кут (схід–захід);
- кут підйому (β) — вертикальний кут (висота Сонця).

Загальний принцип керування можна описати як мінімізацію похибки між напрямком на сонце та нормаллю до поверхні панелі:

$$\varepsilon = \theta_{sun} - \theta_{panel} \quad (1.3)$$

де:

ε — кутова похибка позиціонування;

θ_{sun} — поточне положення Сонця;

θ_{panel} — положення панелі.

Система керування аналізує сигнал від датчиків або астрономічного алгоритму та формує команди на два електроприводи, які змінюють положення панелі в двох площинах.

Основними елементами системи є:

- фотоелектричні датчики або астрономічний модуль визначення положення сонця;
- мікроконтролер або програмований контролер;
- два електроприводи (по кожній осі);
- редукторні або важільні механізми;
- несуча конструкція для панелей;
- система живлення та захисту.

Переваги двовісних трекерів:

- максимальна точність орієнтації на Сонце;
- найвищий рівень енергогенерації серед трекерів;
- підвищення виробітку електроенергії до 35–45% у порівнянні зі стаціонарними системами;
- ефективна робота протягом усього року.

Недоліки двовісних трекерів

- складна механічна конструкція;
- вища вартість виготовлення та обслуговування;
- підвищене енергоспоживання системи керування;
- необхідність більшої точності налаштування та контролю.

За способом керування сонячні трекери поділяються на активні та пасивні трекери.

Активні сонячні трекери — це системи, в яких керування положенням панелей здійснюється за допомогою електронних пристроїв і виконавчих механізмів. У таких системах використовуються датчики освітленості або астрономічні алгоритми, які визначають оптимальне положення сонця.

Система сонячного трекінгу забезпечує автоматичну зміну положення панелей відповідно до переміщення сонця. Основними елементами такої системи є:

- датчики освітленості;
- мікроконтролер;
- система керування;
- електропривід;
- механізм повороту панелей.

Електропривід забезпечує зміну кута нахилу або повороту фотомодулів відповідно до команд системи керування. Кутове переміщення панелі можна описати залежністю:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.4)$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

де:

ω — кутова швидкість обертання;

φ — кут повороту панелі;

t — час.

Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно мінімізувати похибку позиціонування сонячних панелей та знизити енергоспоживання електроприводу.

Отримана інформація обробляється мікроконтролером, після чого формуються керуючі сигнали на електропривід (двигун), який змінює кут нахилу або повороту панелей.

Особливості активних систем:

- висока точність позиціонування;
- можливість програмного керування;
- використання електродвигунів і контролерів;
- підвищене енергоспоживання власних систем.

Пасивні системи керування функціонують без складної електроніки та активних керуючих систем. Рух панелей забезпечується за рахунок фізичних явищ, таких як температурне розширення матеріалів, зміна тиску газів або рідин у спеціальних балансирах.

Такі системи не потребують мікроконтролерів або датчиків і працюють автоматично під впливом зовнішніх умов.

Особливості пасивних систем:

- проста конструкція;
- низька вартість;
- відсутність електронного керування;
- менша точність позиціонування;
- залежність від температурних умов.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

1.4 Елементи системи сонячних трекерів

Сонячний трекер є складною електромеханічною системою, що складається з сенсорної, керуючої, виконавчої, механічної та енергетичної частин, які працюють узгоджено для забезпечення оптимальної орієнтації сонячних панелей. Сукупність цих елементів дозволяє системі точно орієнтувати фотоелектричні панелі та підвищувати ефективність генерації електроенергії.

Таблиця 1.1 - Основні компоненти сонячного трекера

Компонент	Функція	Приклад
Датчики освітленості	Визначають інтенсивність та напрямок світла	LDR (фоторезистори), фотодіоди
Астрономічний модуль	Розраховує положення сонця за часом і координатами	GPS-модуль, RTC DS3231, алгоритми
Контролер	Обробляє дані та формує команди керування	Arduino, STM32, PLC
Драйвер двигуна	Підсилює сигнали керування для привода	L298N, L293D, драйвери крокових двигунів
Електропривід	Забезпечує механічний рух системи	DC-двигун, кроковий двигун, сервопривід
Редуктор	Зменшує швидкість і збільшує крутний момент	Черв'ячний або планетарний редуктор
Механічна рама	Підтримує конструкцію та панелі	Металева або алюмінієва рама
Поворотний механізм	Забезпечує обертання по осях	Підшипникові вузли, шарніри
Джерело живлення	Живить систему керування та привід	Акумулятор, сонячна панель, БЖ
Захисні елементи	Запобігають аварійним режимам	Кінцеві вимикачі, запобіжники
Комунікаційний модуль (опційно)	Дистанційний моніторинг і керування	Wi-Fi (ESP8266), GSM, LoRa

РОЗ ДІЛ 2. МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРА АВТОНОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Опис об'єкта модернізації

Об'єктом дослідження в даній роботі є автономна сонячна електростанція приватного житлового будинку загальною площею 200 м², обладнаного системою газового опалення. Електропостачання будинку здійснюється за рахунок фотоелектричної системи з сонячними панелями та акумуляторним накопиченням енергії.

Система призначена для забезпечення електроенергією основних побутових споживачів, серед яких:

- освітлення;
- побутова техніка;
- циркуляційні насоси системи опалення;
- система вентиляції;
- електронні системи керування;
- резервне живлення критичних навантажень.

До складу автономної сонячної електростанції входять:
фотоелектричні панелі;
одноосьовий сонячний трекер;
електропривід механізму позиціонування;
контролер керування;
акумуляторна батарея;
інвертор;
система захисту та комутації.

Сонячні панелі встановлені на одноосьовому трекері, який забезпечує зміну кута повороту в напрямку схід–захід відповідно до положення сонця протягом дня.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Для забезпечення електропотреб житлового будинку приймається середнє добове енергоспоживання:

$$W_{day} = 15\text{--}20 \text{ kW}_{\text{год/доба}}$$

Добова генерація електроенергії визначається за формулою:

$$W = P_{PV} \cdot H \cdot \eta \quad (2.1)$$

де:

P_{PV} — встановлена потужність сонячних панелей, кВт;

H — середня тривалість ефективного сонячного випромінювання, год;

η — коефіцієнт ефективності системи.

При середньому значенні:

$$H = 5 \text{ год},$$

$$\eta = 0,8$$

Звідси можна знайти необхідну потужність станції:

$$P_{PV} = \frac{W}{H \cdot \eta}$$

Підставимо максимальне споживання:

$$P_{PV} = \frac{20}{5 \cdot 0,8} = 5 \text{ кВт}$$

2.2 Порівняльний аналіз електроприводів

У існуючій системі використовується електропривід постійного струму зі щітковим колектором (Brushed DC motor) у поєднанні з черв'ячним редуктором, який забезпечує поворот сонячних панелей навколо однієї осі. Такий електропривід має просту конструкцію та невисоку вартість, однак характеризується рядом недоліків:

- наявність щітково-колекторного вузла, що зношується;
- обмежений ресурс роботи;
- іскріння при комутації;
- підвищене енергоспоживання приводу;
- зниження ККД через механічні втрати;

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

- неточність позиціонування при зворотних люфтах редуктора;
- відсутність адаптивного алгоритму керування;
- низька ефективність роботи при змінній хмарності.

У зв'язку з цим виникає необхідність модернізації системи електроприводу сонячного трекера з метою підвищення точності орієнтації панелей та ефективності роботи автономної електростанції.

Основні типи електроприводів, що застосовуються в сонячних трекерах.

1. Кроковий електропривід. Це електричний двигун, у якому подача імпульсів електричного струму забезпечує дискретне переміщення ротора, тобто він не обертається безперервно, а здійснює послідовні повороти на певний кут. Величина кутового переміщення безпосередньо залежить від кількості поданих імпульсів, а швидкість обертання визначається їх частотою та кутом одного кроку двигуна. Кут повороту за один імпульс залежить від конструктивних особливостей двигуна і зазвичай становить від кількох градусів до кількох десятків градусів.

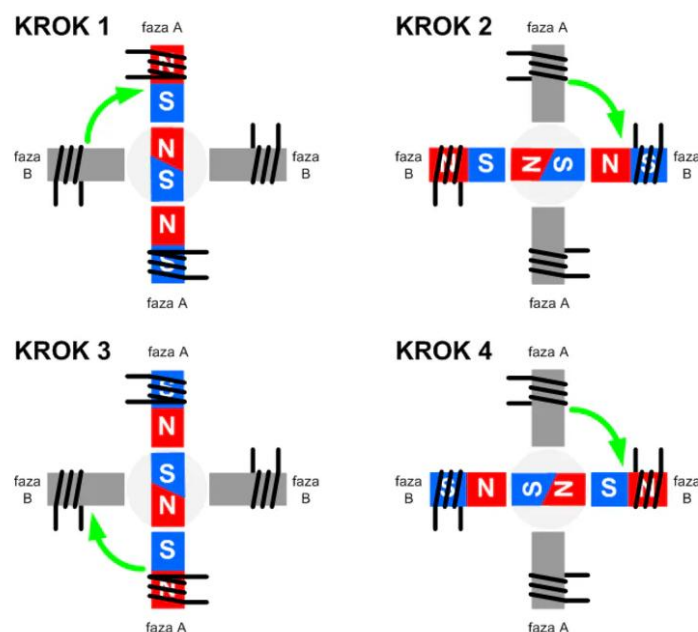


Рис. 2.1 Принцип роботи крокового двигуна в режимі повного кроку

Крокові двигуни можуть працювати в широкому діапазоні швидкостей — від дуже повільного обертання (частки оберту за хвилину) до кількох тисяч обертів за хвилину залежно від режиму роботи та навантаження.

Переваги: висока точність; просте цифрове керування; відсутність необхідності у датчиках положення.

Недоліки: підвищене енергоспоживання; можливість пропуску кроків при перевантаженні; складніша система керування.

2. Серводвигуни (сервоприводи) – механізм, що має у своєму пристрої спеціальний датчик, за яким відстежуються певні значення, блок керування, двигун. Завданням пристрою є контроль та підтримка параметрів під час роботи, залежно від сигналу, що передається в окремий момент часу. Робота пристрою відбувається за принципом зворотної взаємодії із системними сигналами. Сервопривід у певний момент часу отримує вхідні параметри регулюючого значення та підтримує його на виході виробленого елемента.

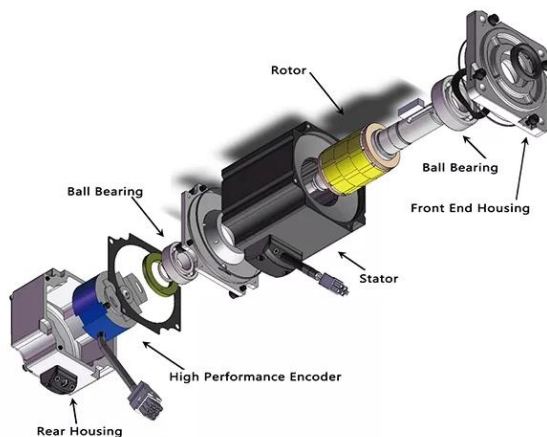


Рис. 2.2 Пристрій сервопривода

Розрізняють два види сервоприводів:

- синхронні – задають темп швидкості обертання двигуна та інші параметри, швидше досягаючи зазначеної швидкості обертання;
- асинхронні – здатні зберігати роботу двигуна навіть за низьких обертів.

Також пристрої поділяють на електромеханічні та електрогідромеханічні за особливостями конструкції та принципом роботи.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Переваги: висока точність; наявність зворотного зв'язку; стабільність роботи.

Недоліки: висока вартість; складність налаштування.

3. Асинхронний електропривід застосовуються переважно у великих промислових сонячних трекерах.

Переваги: висока надійність; довговічність; можливість роботи з великими навантаженнями.

Недоліки: складніше регулювання швидкості; більші габарити; необхідність використання частотного перетворювача.

4. Електричний лінійний привід (актуатор) — це пристрій, який перетворює обертовий рух електродвигуна на прямолінійний (поступальний) рух штока. Він дозволяє з високою точністю штовхати, тягнути, піднімати або опускати вантажі без використання складних гідравлічних чи пневматичних систем. Привід складається з електромотора, редуктора та гвинтової передачі (гвинт-гайка). Коли двигун обертається, він крутить гвинт, змушуючи гайку (і з'єднаний з нею шток) рухатися вперед або назад по прямій лінії.

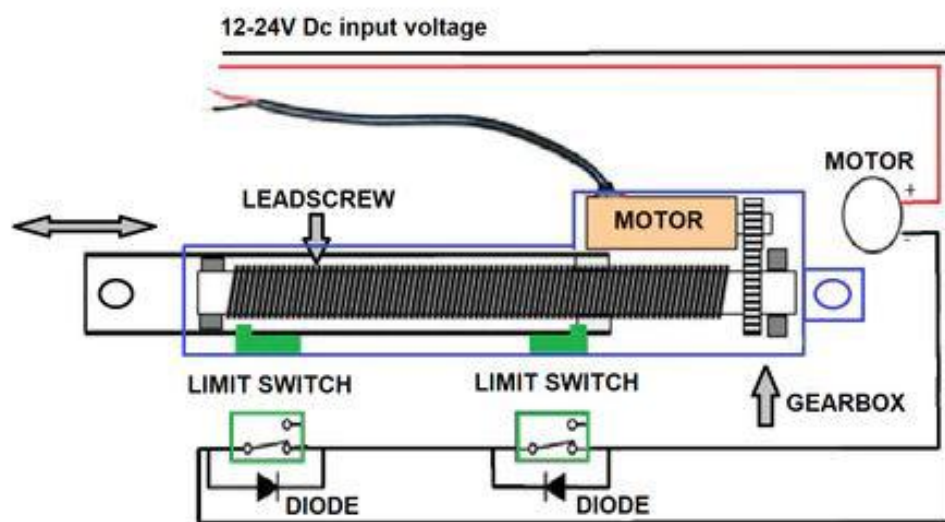


Рис. 2.3 Схема лінійного актуатора

Переваги: проста механічна конструкція; високе зусилля (підходить для

великих панелей); самогальмування; не потрібні складні редуктори; добре працює на відкритому повітрі.

Недоліки: обмежена швидкість руху; менша точність, ніж у сервоприводів або крокових двигунів; обмежений хід штока; знос гвинтової пари.

2.3 BLDC-електропривід у системах сонячного трекера

BLDC (Brushless DC Motor) — це безщітковий двигун постійного струму, в якому комутація фаз здійснюється електронним способом за допомогою спеціального контролера. На відміну від класичних двигунів постійного струму, BLDC-двигуни не мають механічних щіток та колектора, що забезпечує вищу надійність, довговічність та енергоефективність.

BLDC-електроприводи широко застосовуються в автоматизованих системах позиціонування, зокрема в сонячних трекерах, де необхідна висока точність зміни кута нахилу сонячних панелей та низьке енергоспоживання.

Основними елементами BLDC-двигуна є:

- статор із трифазними обмотками;
- ротор з постійними магнітами;
- електронний контролер комутації;
- датчики положення ротора (датчики Холла або енкодер).

Принцип роботи BLDC-двигуна базується на створенні обертового магнітного поля в статорі, яке взаємодіє з постійними магнітами ротора. Безщіточні двигуни постійного струму зазвичай мають три котушки, до кожної з яких підключені напівпровідникові перемикачі.

Увімкнення та вимикання напівпровідникових перемикачів у правильній послідовності змінює потік струму, який створює обертове магнітне поле, яке змушує двигун обертатися.

Електронний контролер послідовно перемикає струм у фазах статора відповідно до положення ротора, забезпечуючи безперервне обертання двигуна.

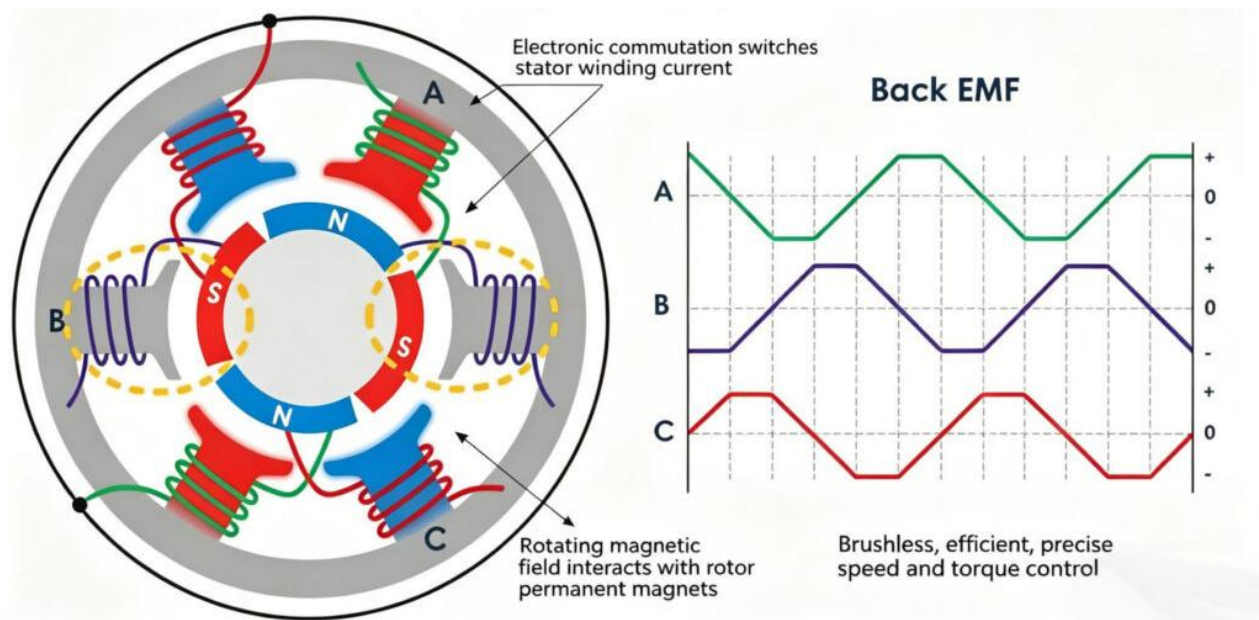


Рис. 2.4 Принцип роботи BLDC двигуна

Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M = k_t \cdot I \quad (2.2)$$

де:

M — електромагнітний момент двигуна, Н·м;

k_t — коефіцієнт моменту двигуна;

I — фазний струм.

Напруга фази двигуна визначається:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + E \quad (2.3)$$

де:

U — напруга живлення;

R — активний опір обмотки;

L — індуктивність фази;

I — струм;

E — проти-ЕРС.

Проти-ЕРС двигуна:

$$E = k_e \cdot \omega \quad (2.4)$$

де:

k_e — коефіцієнт проти-ЕРС;

ω — кутова швидкість ротора.

Рух ротора описується рівнянням:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_L \quad (2.5)$$

де:

J — момент інерції;

M — електромагнітний момент;

M_L — момент навантаження.

Переваги BLDC у сонячних трекарах:

- високий ККД (85–95%);
- низькі механічні втрати;
- відсутність щіткового вузла;
- великий ресурс роботи;
- плавне регулювання швидкості;
- висока точність позиціонування;
- низький рівень шуму;
- мінімальне технічне обслуговування.

Основні недоліки: складніша система керування; необхідність електронного драйвера; вища вартість порівняно зі звичайними DC-двигунами.

Характеристика моменту BLDC. Для BLDC-двигуна характерна майже лінійна залежність моменту від струму:

$$M(I) \sim I$$

При збільшенні струму двигун розвиває більший момент, що дозволяє забезпечити стабільний поворот сонячних панелей навіть при дії вітрових навантажень.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

2.4 Обґрунтування та розрахунок основних параметрів фотоелектричної системи та електроприводу трекера

Для проєктування автономної фотоелектричної системи приватного будинку прийнято:

- встановлена потужність системи:

$$P_{PV} = 5 \text{ кВт}$$

- тип роботи: автономна система
- умови експлуатації: цілорічна робота на відкритому повітрі
- середня пікова сонячна інсоляція:

$$H = 5 \text{ год/добу}$$

- ККД системи (інвертор + втрати + температура):

$$\eta = 0,8$$

Для системи обрано монокристалічні (PERC) фотоелектричні модулі LONGi Solar LR7-72HVN-650M серії Hi-MO X10, як найбільш ефективні при змінній інсоляції.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики модуля

LONGi Solar LR7-72HVN-650M

Параметр	Значення
Номінальна потужність (Pmax)	650 Вт
ККД модуля	23,3%
Напруга розімкнутого кола (Voc)	52,81 В
Струм короткого замикання (Isc)	15,69 А
Напруга при макс. потужності (Vmp)	44,02 В
Струм при макс. потужності (Imp)	14,77 А
Тип осередків	HPBC 2.0 (N-type)
Кількість осередків	144 (6 × 24)
Максимальна напруга системи	1500 В (DC)
Ступінь захисту коробки	IP68
Вага	28,5 кг
Габарити (В×Ш×Г)	2278 × 1134 × 30 мм
Температурний коефіцієнт Voc	-0,23 %/°C
Температурний коефіцієнт Isc	+0,05 %/°C

Головною особливістю серії є перенесення всіх контактних шин на тильну сторону панелі. Це не тільки надає модулю естетичного вигляду, але й дозволяє передній стороні поглинати 100% сонячного світла без затінення металевими елементами.

Площа панелі:

$$S \approx 2,58 \text{ м}^2$$

Кількість фотоелектричних панелей визначають за формулою:

$$N = \frac{P_{PV}}{P_{panel}} = \frac{5000}{650} = 7,69 \quad (2.6)$$

де:

N — кількість панелей;

P_{PV} — необхідна встановлена потужність системи, кВт;

P_{panel} — потужність однієї панелі, кВт.

Для реалізації фотоелектричної системи потрібно 8 монокристалічних фотоелектричних модулів потужністю 650 Вт кожен.

Загальна площа панелей:

$$S_{total} = 8 \times 2,58 = 20,67 \text{ м}^2$$

2.5 Вибір та обґрунтування одноосьового сонячного трекера

У даному проєкті фотоелектрична система потужністю 5 кВт (8 модулів по 650 Вт) встановлюється на наземній опорній конструкції. Для підвищення ефективності фотоелектричної системи обрано одноосьову систему стеження за Сонцем (Single Axis Solar Tracker, SAT). Така система забезпечує автоматичне повертання фотоелектричних модулів протягом дня відповідно до зміни положення Сонця по азимуту, що дозволяє збільшити виробіток електричної енергії на 15–25 % порівняно зі стаціонарним встановленням модулів.

Застосування трекера дозволяє змінювати просторове положення фотоелектричного масиву протягом доби з метою максимального

використання прямого сонячного випромінювання та підвищення виробітку електроенергії.

Одновісний трекер забезпечує автоматичне відстеження руху сонця зі сходу на захід, що дозволяє підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів на поверхню фотоелектричних модулів.

Вихідні дані системи.

Кількість фотоелектричних модулів:

$$N = 8 \text{ шт}$$

Потужність одного модуля:

$$P_{\text{panel}} = 650 \text{ Вт}$$

Загальна встановлена потужність фотоелектричної системи:

$$P_{PV} = N \cdot P_{\text{panel}}$$

$$P_{PV} = 8 \cdot 650 = 5200 \text{ Вт} = 5,2 \text{ кВт}$$

Одноосьовий сонячний трекер обрано як оптимальний компроміс між:

- підвищенням енерговиробітку;
- складністю конструкції;
- вартістю обладнання;
- надійністю та простотою експлуатації.

У порівнянні зі стаціонарною конструкцією використання одноосьового трекера дозволяє збільшити генерацію електроенергії в середньому на 15–25% залежно від географічного розташування та погодних умов. Трекер забезпечує обертання фотоелектричного масиву навколо однієї осі, орієнтованої у напрямку північ–південь, що дозволяє відслідковувати добовий рух Сонця зі сходу на захід.

2.6 Розрахунок приросту генерації

Добова генерація електроенергії без використання трекера визначається за формулою:

$$W_0 = P_{PV} \cdot H \cdot \eta$$

де:

P_{PV} — встановлена потужність системи, кВт;

H — середня тривалість ефективної сонячної інсоляції, год/добу;

η — коефіцієнт корисної дії системи.

Приймаємо:

$$H = 5 \text{ год/добу}$$

$$\eta = 0,8$$

Тоді:

$$W_0 = 5,2 \cdot 5 \cdot 0,8 = 20,8 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

Для одноосьового трекера вводиться коефіцієнт підвищення генерації:

$$k_{trk} = 1,2$$

Тоді добова генерація з трекером становить:

$$W_{trk} = W_0 \cdot k_{trk} \quad (2.7)$$

$$W_{trk} = 20,8 \cdot 1,2 = 24,96 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

Отже, використання одноосьового трекера дозволяє підвищити добову генерацію приблизно на:

$$\Delta W = 24,96 - 20,8 = 4,16 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

2.7 Електрична схема фотоелектричного масиву

Для фотоелектричного масиву прийнято послідовне з'єднання 8 фотоелектричних модулів в один стрінг.

Робоча напруга одного модуля:

$$U_{mpp} \approx 45 \text{ В}$$

Робоча напруга стрінга:

$$U_{string} = 8 \cdot 44,56 \approx 357 \text{ В}$$

Напруга холостого ходу одного модуля:

$$U_{oc} \approx 54 \text{ В}$$

Максимальна напруга холостого ходу стрінга:

$$U_{oc,string} = 8 \cdot 53,9 \approx 431 \text{ В}$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Струм стрінга:

$$I_{string} \approx 15 \text{ A}$$

Зазначені параметри відповідають вимогам більшості сучасних мережевих інверторів класу 1000 В та забезпечують ефективне перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

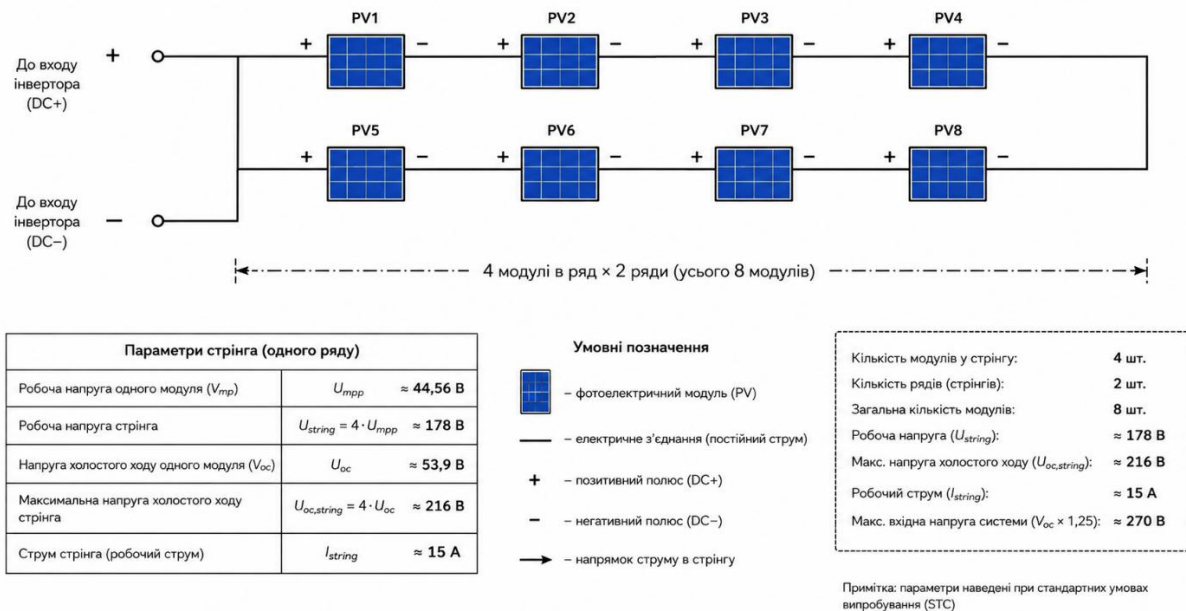


Рис. 2.5 Схема фотоелектричної системи із 8 модулів з'єднаних послідовно

2.8 Обґрунтування використання одного МРРТ

У системі використовується один МРРТ-трекер інвертора, оскільки:

- усі панелі мають однакову орієнтацію;
- модулі встановлені на одній рухомій конструкції;
- відсутнє взаємне затінення між рядами;
- усі панелі працюють в однакових умовах інсоляції.

Використання одного МРРТ забезпечує:

- максимальну ефективність відбору енергії;
- спрощення електричної схеми;
- зменшення вартості системи;
- підвищення надійності роботи інвертора.

У проєкті використовується горизонтальний одноосьовий трекер (Horizontal Single Axis Tracker, HSAT).

Основні характеристики системи:

- вісь обертання — північ–південь;
- напрямок руху — схід–захід;
- кут повороту — $\pm 45 \dots 60^\circ$;
- автоматичне керування положенням масиву.

Така конструкція забезпечує високу ефективність роботи при відносно невеликій складності механічної системи.

Наземна конструкція складається з:

- опорних металевих стійок;
- поворотної рами для фотоелектричного масиву;
- центрального вала обертання;
- привідного механізму;
- системи тросового підсилення;
- фундаментної основи.

Для виготовлення несучих елементів використовуються оцинковані сталеві профілі, що забезпечують високу механічну міцність та корозійну стійкість конструкції.

2.9 Розрахунок навантажень

Вітрове навантаження визначається за формулою:

$$F_w = q \cdot C_d \cdot S_{total} \quad (2.8)$$

де:

q — питомий тиск вітру, для розрахунку приймаємо 600 Н/м^2 ;

C_d — коефіцієнт аеродинамічного опору, 1,2;

S_{total} — площа фотоелектричного масиву, м^2 .

Тоді вітрове навантаження становить:

$$F_w = 600 \cdot 1,2 \cdot 20,64 = 14860,8 \text{ Н}$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Для підвищення жорсткості конструкції застосовується система сталевих тросів.

Основні функції тросової системи:

- зменшення коливань конструкції при вітрових навантаженнях;
- розвантаження центрального приводу;
- стабілізація положення поворотної рами;
- підвищення загальної жорсткості системи.

Розрахункове зусилля в одному тросі визначається за формулою:

$$T = \frac{F_w}{n} \quad (2.9)$$

де:

F_w — сумарне вітрове навантаження;

n — кількість тросів.

Кількість тросів визначається з умови забезпечення допустимого навантаження на один трос. Для цього використовується умова міцності:

$$T \leq T_{dop}$$

де:

T — фактичне зусилля в одному тросі, Н;

T_{dop} — допустиме зусилля для вибраного троса, Н.

Тоді мінімальна кількість тросів визначається за формулою:

$$n \geq \frac{F_w}{T_{dop}}$$

де:

F_w — сумарне вітрове навантаження, Н;

T_{dop} — допустиме навантаження одного троса, Н.

Для даної конструкції:

$$F_w = 14860,8 \text{ Н}$$

Приймаємо сталевий трос діаметром 6 мм з допустимим навантаженням:

$$T_{dop} = 8000 \text{ Н}$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Тоді необхідна кількість тросів:

$$n \geq \frac{14860,8}{8000} = 1,86$$

Приймаємо $n = 2$

2.10 Система кріплення панелей

Фотоелектричні модулі закріплюються на алюмінієвій або оцинкованій сталевій рамі.

Система кріплення включає:

- монтажні рейки (rail system);
- міжмодульні та крайові клєми (mid clamp / end clamp);
- болтові з'єднання М8–М10;
- антикорозійне покриття.

Конструкція кріплення забезпечує надійну фіксацію модулів та стійкість до атмосферних впливів.

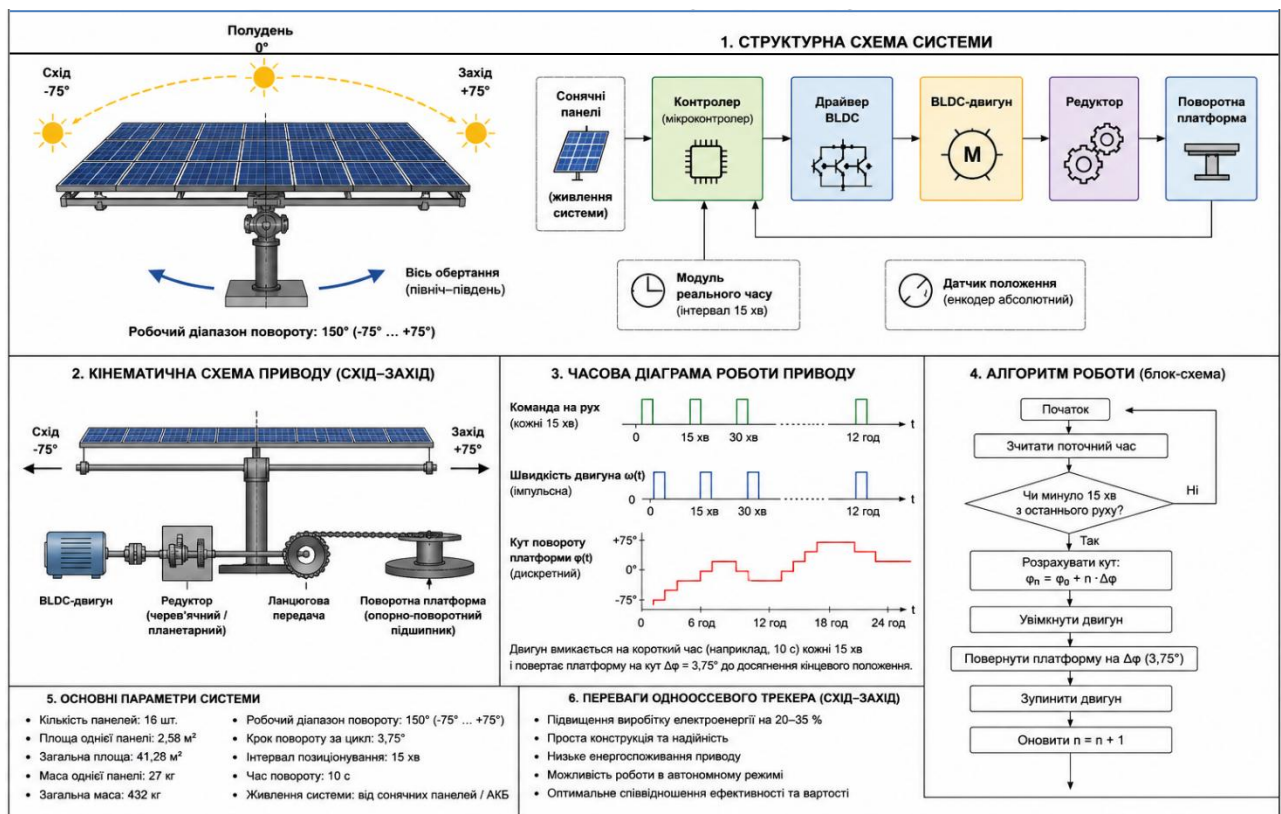


Рис. 2.6 Одноосевий сонячний трекер (схід-захід) з BLDC приводом

2.11 Розрахунок сумарного навантаження на привод одноосьового сонячного трекера

Потужність приводу визначається:

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{total}} \cdot \omega}{\eta_{\text{заг}}} \quad (2.10)$$

де:

$P_{\text{дв}}$ — потужність двигуна, Вт

M_{total} — сумарний момент навантаження, Н·м

ω — кутова швидкість обертання, рад/с

η_{BLDC} — ККД приводу

Сумарний момент навантаження

$$M_{\text{total}} = M_w + M_s + M_f + M_g \quad (2.11)$$

де:

M_w — момент від вітрового навантаження

M_s — момент від снігового навантаження

M_g — момент від власної ваги конструкції

M_f — момент сил тертя в опорах/передачі

Вага конструкції:

$$F_g = (m_{\text{п}} + m_{\text{р}}) \cdot g \quad (2.12)$$

де:

g — прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²

$m_{\text{п}}$ — вага панелей, 228кг

$m_{\text{р}}$ — вага металевої рами, кг

Конструкція розділяється на два елементи: важку центральну несучу трубу (вал) та легкі монтажні профілі під панелі (раму). Торсіонний вал з'єднується з опорно-поворотним редуктором та підшипниковими опорами, утворюючи єдину систему повороту фотоелектричних модулів навколо осі «схід–захід» для відстеження добового руху Сонця.

Розмір однієї панелі:

$$2,278 \times 1,134 \text{ м}$$

Тоді габарити поля приблизно:

довжина:

$$L \approx 4 \times 1,134 = 4,536 \text{ м}$$

ширина:

$$B \approx 2 \times 2,278 = 4,556 \text{ м}$$

Периметр зовнішньої рами

$$L_1 = 2(L + B) = 2(4,556 + 4,536) = 18,184 \text{ м}$$

Внутрішні перемички

Для кріплення 8 панелей зазвичай є:

- 3 поздовжні перемички по 4,536 м;
- 4 поперечні перемички по 4,556 м.

Тоді:

$$L_2 = 3 \cdot 4,536 + 4 \cdot 4,556 = 31,832 \text{ м}$$

Загальна довжина профілю

$$L_p = L_1 + L_2 = 18,184 + 31,832 = 50,016 \text{ м}$$

Маса металоконструкції

$$m_p = L_p \cdot m_{\text{пог.р}} + L_T \cdot m_{\text{пог.труб}} = 50,016 \cdot 1,8 + 4,536 \cdot 9,2 = 131,76 \text{ кг}$$

де:

$m_{\text{пог.р}}$ – маса погонного метра монтажного оцинкованого С-профіля, 1,8 кг

$m_{\text{пог.труб}}$ - маса погонного метра для сталеві квадратної труби (80x80x4мм),
9,2 кг

$$F_g = (m_n + m_p) \cdot g = (228 + 131,76) \cdot 9,8 \approx 3526 \text{ Н}$$

Момент від ваги (дисбаланс). Для трекера важливо, що центр мас не на осі. Приймаємо типове інженерне припущення: плече сили $l_g \approx 0,6 \text{ м}$

(типова конструкція рам)

$$M_g = F_g \cdot l_g = 3526 \cdot 0,6 \approx 2115 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.13)$$

Снігове навантаження на поверхню сонячних панелей визначається за нормативним виразом:

$$F_s = \mu \cdot S_0 \cdot S_{total} \quad (2.14)$$

де:

F_s — сила снігового навантаження, Н;

S_0 — нормативне снігове навантаження півдня України 0,7 - 0,8 кН/м²;

μ — коефіцієнт форми, що враховує вплив кута нахилу поверхні, 0,6 для 45°;

S_{total} — загальна площа сонячних панелей, м².

$$F_s = \mu \cdot S_0 \cdot S_{total} = 0,6 \cdot 20,67 \cdot 800 \approx 9922 \text{ Н}$$

Момент від снігового навантаження відносно осі обертання визначається як:

$$M_s = F_s \cdot e_s = 9922 \cdot 0,3 \approx 2977 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.15)$$

де:

M_s — момент від снігу, Н·м;

e_s — ексцентриситет прикладання рівнодіючої сили відносно осі обертання, м.

Для симетричної конструкції одновісного сонячного трекера, у якій вісь проходить через центр масиву панелей, снігове навантаження розподіляється рівномірно, тому ексцентриситет є малим:

$$e_s \approx 0,1 \dots 0,3 \text{ м}$$

Вітрове навантаження (EN 1991-1-4)

$$F_w = q \cdot C_d \cdot S_{total} \quad (2.16)$$

де:

F_w - сила вітру, Н

q - швидкісний тиск вітру, Н/м²;

C_d - коефіцієнт аеродинамічного опору (плоскі панелі), 1,2.

Швидкісний тиск вітру визначається як:

$$q = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{1,225 \cdot 625}{2} \approx 383 \text{ Н/м}^2 \quad (2.17)$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

де:

ρ — густина повітря ($\approx 1,225 \text{ кг/м}^3$);

V — швидкість вітру, для півдня України приймається 25 м/с .

$$F_w = 383 \cdot 1,2 \cdot 20,67 \approx 9500 \text{ Н}$$

Аеродинамічний момент. Сумарна сила вітру вже враховує аеродинаміку через C_d , тому:

$$F_{aero} \equiv F_w$$

Момент від вітрового навантаження відносно осі обертання:

$$M_w = F_w \cdot e_w = 2850 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де:

M_w — момент від вітру, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

e_w — ексцентриситет дії вітрової сили відносно осі обертання.

Для одновісного сонячного трекера, у якому вісь обертання проходить через центр конструкції, ексцентриситет зазвичай є малим:

$$e_w \approx 0,1 \dots 0,3 \text{ м}$$

Момент тертя виникає у підшипниках зазвичай приймають:

$$M_f = 0,03 \div 0,1 M_w$$

$$M_f = 0,1 \cdot 2850 = 285 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Інерційне навантаження

$$M_{inertia} = J \cdot \alpha \quad (2.18)$$

де:

$M_{inertia}$ — інерційний момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$

J — момент інерції системи, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$

α — кутове прискорення, рад/с^2

Для спрощення розрахунку динамічних характеристик приводу сонячного трекера приймемо, що масив фотопанелей являє собою суцільну рівномірно розподілену прямокутну пластину.

Розглянемо систему як прямокутну пластину розмірами $a \times b$, що обертається відносно центральної осі, паралельної одній із її сторін (вісь обертання одновісного трекера проходить через центр конструкції).

Тоді момент інерції відносно осі обертання визначається за формулою:

$$J = \frac{1}{12} m L^2 \quad (2.19)$$

де:

m — сумарна маса сонячних панелей з рамою, кг;

L — характерний розмір конструкції у напрямку, перпендикулярному осі обертання, м.

Для одновісного трекера зі віссю обертання вздовж горизонтальної осі приймаємо:

$$L = 4,556 \text{ м}$$

Тоді момент інерції:

$$J = \frac{1}{12} 359,76 \cdot (4,556)^2 = 622 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\alpha = \frac{\omega_{\text{тр}}}{t} \quad (2.20)$$

Земля здійснює повний оберт за:

$$24 \text{ години} = 86400 \text{ с}$$

За цей час видиме Сонце проходить 360°

Кутова швидкість видимого руху Сонця по небосхилу визначається за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.21)$$

де:

ω — кутова швидкість, рад/с;

T — період повного оберту Землі навколо своєї осі, с.

Оскільки

$$T = 86400 \text{ с}$$

Кутова швидкість Сонця

$$\omega = \frac{2\pi}{86400} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$$

$$\omega = \frac{360^\circ}{86400} = 0,004166^\circ/\text{с}$$

$$\omega = 0,004166^\circ/\text{с}$$

Інтервал між послідовними переміщеннями сонячного трекара приймається рівним 1135 с, при цьому тривалість одного переміщення становить 5 с

$$\Delta t = 1140 \text{ с}$$

За 1140 с Сонце зміщується

$$\Delta\varphi = 0,004166 \cdot 1140 = 6^\circ$$

Трекер працює повільно і переміщується протягом дня. Максимальний кут повороту приймаємо:

$$\varphi_{\text{пов}} = 120^\circ$$

$$120^\circ = \frac{120\pi}{180} = 2,094 \text{ рад}$$

Визначаємо кількість кроків

$$N = \frac{120}{6} = 20$$

Тобто трекер робить 20 мікропереміщень на добу.

Визначасмо загальний час переміщення. Кожен крок через 1135 с, час переміщення трекара - 5 с:

$$t_{\text{заг}} = 20 \cdot 5 + 20 \cdot 1135 = 28800 \text{ с}$$

$$t_{\text{заг}} = \frac{28800}{3600} = 8 \text{ годин}$$

Визначаємо кутову швидкість трекара

$$\varphi_{\text{перем}} = 6^\circ$$

$$\varphi_{\text{перем}} = \frac{6\pi}{180} = 0,1047 \text{ рад}$$

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{0,1047}{5} = 0,0209 \text{ рад/с}$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Враховуючи, що номінальний час розгону електродвигуна до робочої швидкості

$$t_{\text{роз}} = 1 \text{ с}$$

$$\alpha = \frac{\omega_{\text{тр}}}{t} = 0,0209 \text{ рад/с}^2$$

$$M_{\text{inertia}} = 622 \cdot 0,0209 \approx 12 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{total}} = 2115 + 2977 + 2850 + 285 + 12 \approx 8239 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2.12 Вибір електропривода

Для приводу системи стеження за Сонцем доцільно застосувати опорно-поворотний пристрій (ОПП) з черв'ячною передачею, який поєднує функції редуктора та опорного вузла. Така конструкція забезпечує передачу значного крутного моменту від BLDC-двигуна до несучої рами фотоелектричних модулів і дозволяє плавно здійснювати їх поворот навколо осі стеження.

Момент двигуна з редуктором

$$M_{\text{вих}} = \frac{M_{\text{total}}}{i \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{34396}{80 \cdot 0,35} \approx 1228 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.22)$$

де:

i - реально допустимі значення для ОПП з черв'ячною передачею, 80-120

$\eta_{\text{ред}}$ – ККД ОПП, зазвичай 0,35 - 0,45

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД DLDC двигуна, 0,9-0,92

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{total}} \cdot \omega}{\eta_{\text{зар}}} = \frac{8239 \cdot 0,0209}{0,45 \cdot 0,92} = 415,94 \text{ Вт}$$

Обираємо безщітковий електродвигун постійного струму BLDC-D110BLD600-48A-30S оснащений планетарним редуктором, що забезпечує високе передавальне число до 250:1 для ефективної передачі потужності. Двигун забезпечує високий крутний момент навіть на низьких швидкостях. Просте регулювання швидкості та реверсивний напрямок: підтримує зручне керування швидкістю та реверсивний напрямок для гнучкої роботи.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

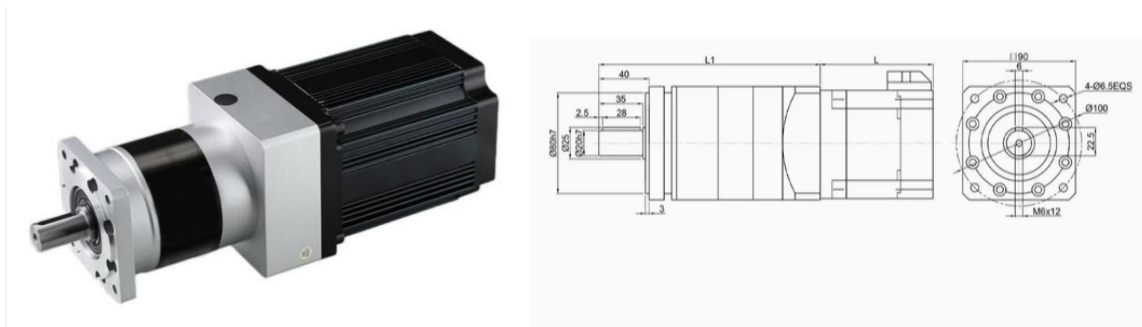


Рис. 2.7 Безколекторний електродвигун BLDC-D110BLD600-48A-30S

Таблиця 2.1 Технічні характеристики безколекторного електродвигуна
BLDC-D110BLD600-48A-30S

Параметр	Значення
Номінальна напруга	48 В
Номінальна потужність	600 Вт
Номінальний струм	~15–16 А
Струм холостого ходу	< 3,8 А
Номінальна швидкість обертання	3000 об/хв
Номінальний крутний момент	1,91 Н·м
Максимальний крутний момент	5,73 Н·м
Передавальне число	4:250
ККД	90–92 %
Тип охолодження	Повітряне
Режим роботи	S1 (тривалий)
Клас захисту	IP54–IP65 (залежно від моделі)
Керування	Електронний контролер (ESC)
Реверс	Так
Ресурс роботи	10 000+ годин

2.13 Принцип роботи системи автоматичного стеження за Сонцем

Фотоелектрична система зі стеженням за положенням Сонця, виконує дві ключові функції:

- азимутальне наведення, яке забезпечує оптимальну орієнтацію фотоелектричних модулів протягом світлового дня;
- відстеження сонячної висоти (кута піднесення Сонця), що дозволяє підвищити ефективність поглинання сонячної радіації впродовж року.

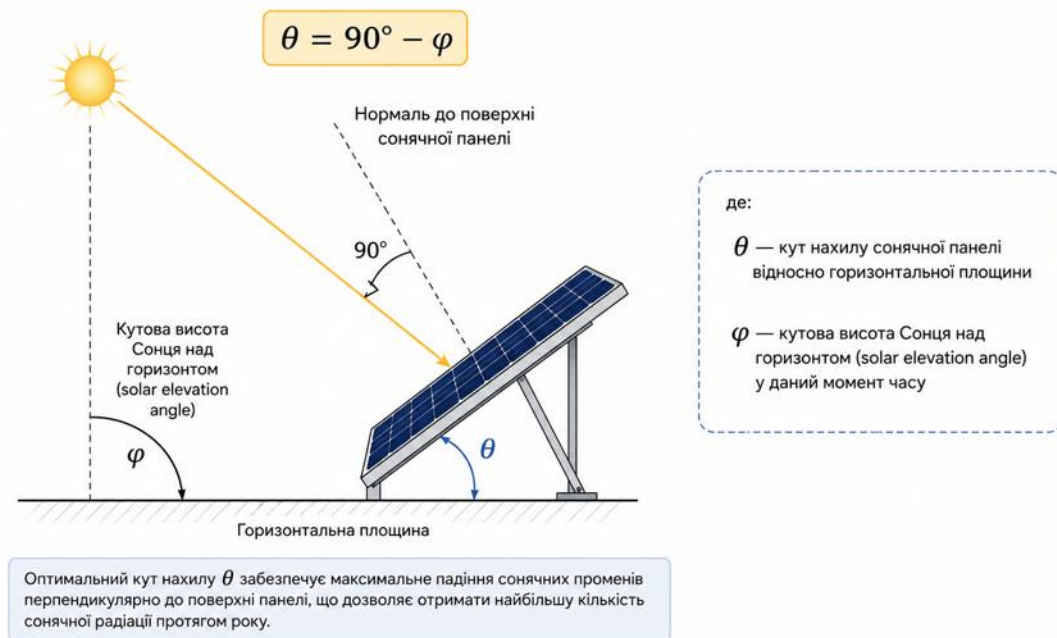


Рис. 2.7 Визначення оптимального кута нахилу поверхні сонячної панелі відносно горизонту

Кут нахилу θ фотоелектричної системи є одним із ключових параметрів, що визначає ефективність перетворення сонячної енергії в електричну протягом року. Його значення безпосередньо впливає на величину сонячної радіації, що надходить на поверхню фотоелектричних модулів. Визначення оптимального кута нахилу поверхні сонячної панелі відносно горизонту:

$$\theta = 90^\circ - \varphi$$

де:

θ — кут нахилу сонячної панелі відносно горизонтальної площини

φ — кутова висота Сонця над горизонтом (solar elevation angle) у даний момент часу

Оскільки положення Сонця змінюється як протягом доби, так і протягом року, оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів також є змінною величиною. У літній період Сонце знаходиться вище над горизонтом, тому доцільно використовувати менший кут нахилу панелей. В зимовий період, навпаки, висота Сонця зменшується, що потребує збільшення кута нахилу для забезпечення більш перпендикулярного падіння сонячних променів.

Таким чином, сезонна оптимізація кута нахилу дозволяє підвищити середньорічну ефективність фотоелектричної установки. У разі застосування систем стеження за Сонцем (трекерних систем) кут нахилу може автоматично коригуватися відповідно до поточного положення Сонця, що додатково збільшує виробіток електроенергії порівняно зі стаціонарними системами.

Слідкуюча система зазвичай складається з двох основних блоків: системи визначення положення Сонця на основі фоторезисторів та системи керування, яка забезпечує коригування положення сонячних панелей за допомогою електродвигунів або сервоприводів.

Фоторезистори (LDR) змінюють свій опір залежно від інтенсивності світла. Якщо розмістити кілька фоторезисторів у різних напрямках (наприклад, ліво/право або верх/низ) і розділити їх перегородкою, то:

- з боку, де світло сильніше → опір менший → сигнал більший;
- з боку, де світло слабше → опір більший → сигнал менший.

Контролер порівнює ці сигнали і визначає, у який бік потрібно повернути панель, щоб вирівняти освітленість. Коли сигнали стають однаковими — панель орієнтована прямо на Сонце.

Простіше кажучи: це «очі» системи стеження, які дозволяють визначати напрямок максимального світлового потоку.

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

- габаритні розміри конструкції системи;
- тип приводів, що забезпечують коригування положення панелей;
- тип системи стеження за положенням Сонця;
- керуючий пристрій (контролер);
- спосіб керування системою.

Площа фотоелектричного масиву становить 20,67 м². Конструкція виконується у вигляді поворотної рами з можливістю обертання лише навколо однієї осі (азимутальної), що забезпечує відстеження руху Сонця зі сходу на захід протягом світлового дня.

Як виконавчий механізм системи автоматичного стеження за положенням Сонця доцільно застосувати безщітковий двигун постійного струму (BLDC) у поєднанні з опорно-поворотним пристроєм (ОПП) черв'ячного типу. Використання BLDC-двигуна забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, плавність регулювання швидкості, низький рівень шуму та підвищену надійність завдяки відсутності щітково-колекторного вузла. Черв'ячний опорно-поворотний пристрій забезпечує значне передаточне число, збільшення крутного моменту на вихідному валу та точне позиціонування фотоелектричних модулів. Крім того, черв'ячна передача має ефект самогальмування, що дозволяє утримувати сонячні панелі в заданому положенні без додаткових витрат електроенергії та підвищує стійкість конструкції до вітрових навантажень.



Рис. 2.8 Черв'ячний опорно-поворотний пристрій SE5

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Завдяки використанню поворотного підшипника як основний компонент, поворотний привід може одночасно сприймати осьову силу, радіальну силу і момент перекидання. Поворотні приводи широко застосовуються у всіх типах кранів, підйомних робочих платформах, системах стеження за сонцем та вітроенергетичних системах.

Таблиця 2.2 Характеристики опорно-поворотного пристрою SE5

Параметр	Значення
Модель	SE5
Тип	Черв'ячний опорно-поворотний пристрій (slewing drive)
Вихідний крутний момент	18.3 кН·м
Передатне число	84:1
Клас захисту	IP65
Статичне осьове навантаження	970 кН
Статичне радіальне навантаження	380 кН
Перекидний (tilting) момент	~67–72 кН·м
Утримуючий момент	~48–56 кН·м
Зовнішній діаметр	390 мм
Внутрішній діаметр	295 мм
Матеріал корпусу	QT450 (високоміцний чавун)
Рекомендована швидкість обертання	~2–2.5 об/хв
Тип конструкції	Закритий редуктор з черв'ячною передачею
Тип застосування	Сонячні трекери, крани, поворотні платформи, спецтехніка
Кріплення	Фланцеве, багатоболтове

В системі автоматичного позиціонування сонячного трекера для визначення точного положення опорно-поворотного механізму застосовується магнітний енкодер абсолютного типу AS5600. Даний датчик призначений для вимірювання кутового положення об'єкта в діапазоні 0...360° з високою точністю та стабільністю, що дозволяє реалізувати зворотний зв'язок у системі

керування приводом.

Принцип дії AS5600 базується на вимірюванні змін магнітного поля:

- на обертову частину механізму встановлюється постійний магніт;
- датчик фіксується на нерухомій частині конструкції;
- при обертанні змінюється напрямок магнітного поля;
- мікросхема перетворює ці зміни у цифровий код, що відповідає куту повороту.

Таким чином, AS5600 є абсолютним датчиком положення, який завжди зберігає актуальне значення кута навіть після вимкнення живлення.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики AS5600

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання кута	0...360°
Роздільна здатність	12 біт (4096 дискретних положень)
Точність вимірювання	приблизно $\pm 0.5^\circ$ (типово)
Тип виходу	I2C інтерфейс аналоговий вихід (PWM або напруга)
Напруга живлення	3.3–5 В
Споживаний струм	до 6 мА
Тип датчика	безконтактний магнітний енкодер
Робоча температура	-40...+125 °C

У структурі автоматизованої системи трекера AS5600 виконує функцію зворотного зв'язку по куту повороту.

Сигнал з датчика передається на мікроконтролер який порівнює фактичне положення з розрахунковим положенням Сонця. На основі цього формується керуючий сигнал для драйвера двигуна, що забезпечує поворот опорно-поворотного пристрою.

Як керуючий пристрій обрано мікроконтролер Arduino Mega 2560. Його

використання обґрунтовується:

- достатньою кількістю аналогових входів для підключення датчиків освітленості;
- можливістю реалізації алгоритму порівняння сигналів;
- підтримкою ШІМ-керування приводом;
- простотою програмування та широкою доступністю.

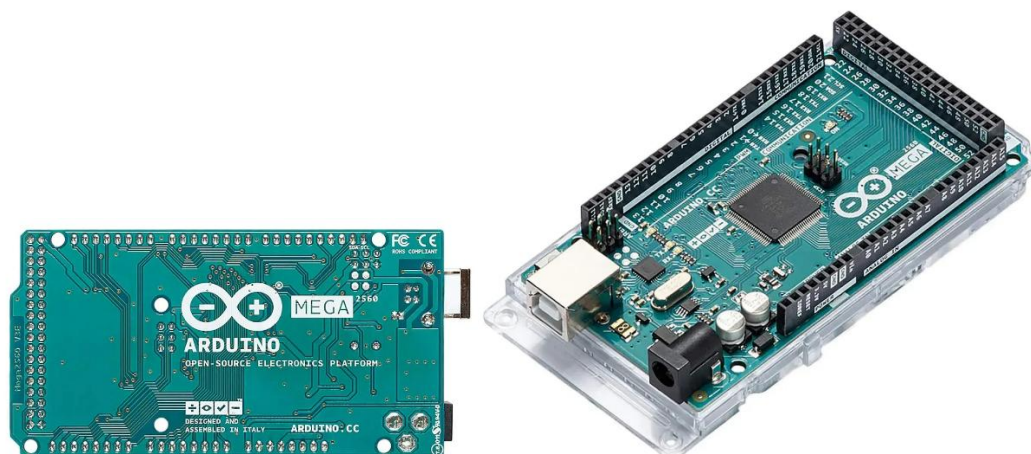


Рис. 2.9 Мікроконтролер Arduino Mega 2560

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики мікроконтролера Arduino Mega 2560

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega2560
Тактова частота	16 МГц
Робоча напруга	5 В
Аналогові входи	16
Цифрові входи/виходи	54
ШІМ-виходи	15
Flash-пам'ять	256 КБ
SRAM	8 КБ
EEPROM	4 КБ

Для реалізації системи автоматичного позиціонування сонячного трекера обрано контролер BLD-750 Brushless DC Motor Driver, розрахований на керування трифазними безколекторними двигунами потужністю до 750 Вт при напрузі живлення 48 В.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики контролера BLD-750

Параметр	Значення
Тип двигуна	Безколекторний BLDC, 3-фазний
Номінальна напруга живлення	15 – 52 В
Максимальна потужність	750 Вт
Номінальний струм	25 А
Діапазон регулювання швидкості	0-20000 об/хв
Зовнішній потенціометр	10 кОм
Робоча температура	0 ~ 40°C
Тип керування	PWM / Analog 0–5 В
Режим роботи	Реверсивний (Forward/Reverse)
Регулювання швидкості	Плавне (широотно-імпульсне)
Захист	Від перевантаження та перегріву
Інтерфейс керування	Сумісний з Arduino
Вага	0,65 кг

Вибір даного контролера обґрунтовано необхідністю забезпечення стабільної роботи електропривода в умовах низькошвидкісного позиціонування, частих реверсів та змінного навантаження, яке виникає під дією вітрових навантажень на фотоелектричні модулі. Контролер забезпечує широтно-імпульсне (PWM) регулювання швидкості, роботу з датчиками Холла, реверс напрямку обертання та можливість інтеграції з мікроконтролерною системою на базі Arduino Mega 2560. Застосування контролера з підвищеним запасом потужності (750 Вт при навантаженні двигуна 600 Вт) дозволяє підвищити надійність системи, особливо в перехідних режимах запуску та гальмування.



Рис. 2.10 BLDC контроллер постоянного тока BLD-750

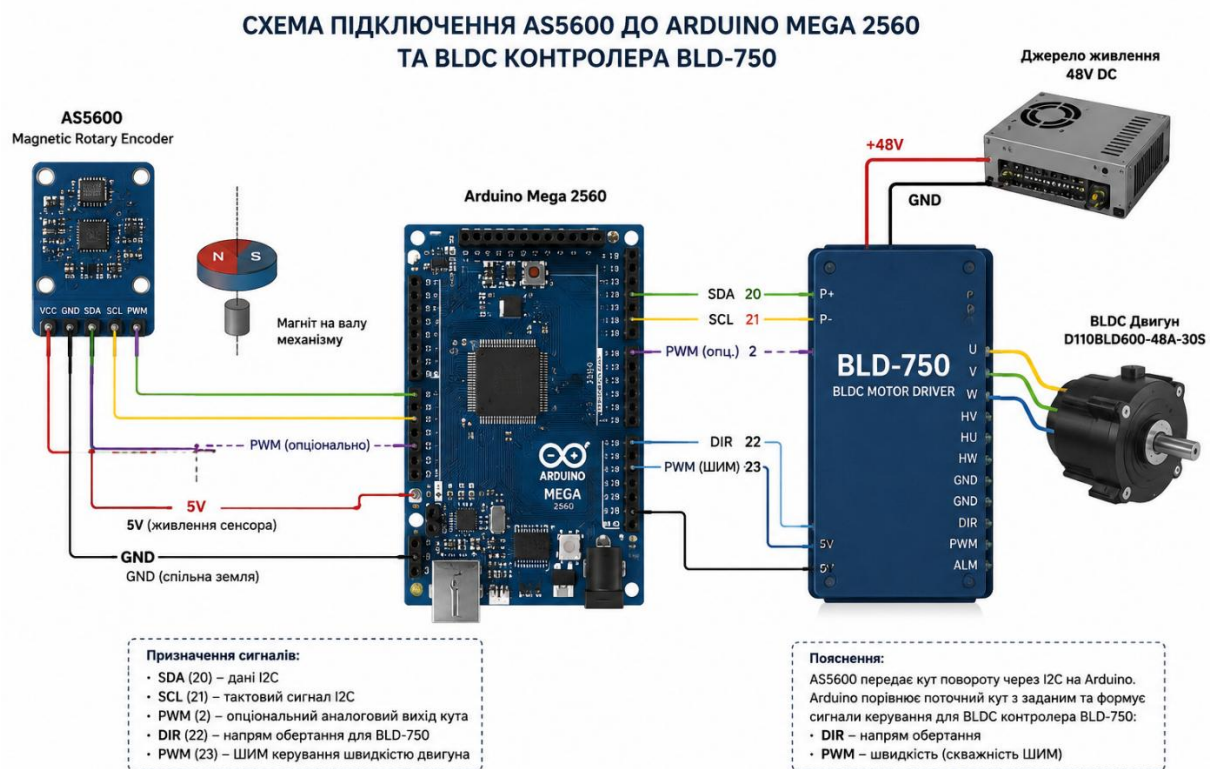


Рис. 2.11 Модернізова система сонячного трекера

2.14 Порівняльний аналіз базової та модернізованої структури привода сонячного трекера

У початковій конфігурації система позиціонування сонячного трекера виконувалась на основі асинхронного електродвигуна з мотор-редуктором.

Передача крутного моменту базової конструкції здійснювалася через механічний редуктор з фіксованим передавальним числом, а система управління положенням сонячного трекера будувалася на спрощених дискретних алгоритмах з використанням фотодатчиків освітленості. Управління реалізовувалося за релейним (on/off) принципом з урахуванням порівняння сигналів від фотодатчиків, встановлених з протилежним сторонам робочої поверхні. При перевищенні різниці освітленості заданого порога формувалася команда на включення приводу у відповідному напрямку, при малій різниці сигналів система переходила в стан зупинки.

Слід зазначити, що застосування фотодатчиків без точного зворотного кутового зв'язку істотно обмежує точність позиціонування. На роботу системи впливали зовнішні фактори, такі як хмарність, розсіяне випромінювання, забруднення датчиків та їх старіння, що призводило до помилок стеження, коливань навколо точки максимальної освітленості та зниження загальної енергетичної ефективності трекера.

Основними недоліками такої структури були:

- наявність люфтів у редукторі;
- низька точність позиціонування;
- інерційність системи;
- відсутність високоточної зворотної інформації про кут;
- обмежена адаптивність до змін положення Сонця.

У модернізованій системі виконано комплексну заміну виконавчого приводу та системи керування:

- асинхронний двигун з редуктором замінено на безколекторний двигун BLDC з планетарним редуктором;
- введено сучасний драйвер керування BLD-750 Brushless DC Motor Driver;
- замість механічного позиціонування реалізовано точний контроль кута за допомогою магнітного енкодера AS5600;

- додано опорно-поворотний пристрій класу WH14, який раніше в базовій системі відсутній, а функції повороту виконувалися без спеціалізованого опорного вузла;
- мікроконтролерна система побудована на Arduino Mega 2560.

Додатково введено безконтактний датчик положення, що дозволяє реалізувати замкнену систему керування з високою точністю позиціонування.

Таблиця 2.6 - Порівняльна таблиця структур привода

Параметр	Базова система	Модернізована система
Тип електропривода	Асинхронний двигун / простий привод з редуктором	BLDC-двигун
Передача крутного моменту	Механічний редуктор з фіксованим передавальним числом	Опорно-поворотний пристрій WH14 + редукційна передача (за потреби)
Опорно-поворотний вузол	Відсутній	Встановлено WH14 як окремий механічний вузол
Система керування	Спрощене дискретне керування (on/off)	Цифрова система керування з мікроконтролером
Алгоритм керування	Релейний алгоритм за фотодатчиками	PID-регулятор + алгоритм точного позиціонування
Зворотний зв'язок	Відсутній або непрямий (за освітленістю)	Точний кутовий зворотний зв'язок (енкодер)
Датчики	Фотодатчики освітленості	Інкрементальний/абсолютний енкодер
Точність позиціонування	Низька, залежить від умов освітлення	Висока, стабільна незалежно від зовнішніх факторів
Стійкість до зовнішніх впливів	Низька (хмари, забруднення датчиків)	Висока
Енергетична ефективність	Нестабільна, втрати через неточне наведення	Підвищена за рахунок точного слідування
Динаміка системи	Повільна, з коливаннями	Швидка та стабілізована
Рівень автоматизації	Низький	Високий
Надійність	Обмежена	Підвищена

Проведений аналіз базової та модернізованої системи сонячного трекера показує, що ключовим фактором підвищення ефективності є перехід від спрощеного релейного керування з фотодатчиками до системи точного

позиціонування на основі кутового зворотного зв'язку (енкодера) та цифрового керування приводом BLDC.

У базовій системі точність наведення визначалась лише різницею освітленості:

$$e = L_{left} - L_{right} \quad (2.23)$$

де:

$L_{left} - L_{right}$ — сигнали фотодатчиків.

Такий підхід не дозволяє точно визначати кутове положення сонячного диска та є чутливим до зовнішніх факторів (хмарність, дифузне випромінювання, забруднення датчиків), що призводить до систематичної кутової похибки $\Delta\theta$.

В ідеальній умові максимальна потужність фотоелектричного модуля описується як:

$$P = P_0 \cos(\theta) \quad (2.24)$$

де:

P_0 — потужність при перпендикулярному падінні випромінювання,

θ — кут відхилення від нормалі до поверхні панелі.

Для фотодатчикової системи характерна середня кутова похибка:

$$\theta_{avg} \approx 8^\circ - 15^\circ$$

Візьмемо середнє значення:

$$\theta_{avg} \approx 10^\circ$$

Тоді відносна втрата енергії:

$$\eta_{loss} = 1 - \cos(10^\circ) \approx 1,5\%$$

Однак це лише миттєва геометрична похибка. У реальних умовах (хмарність, шум датчиків, запізнення реакції привода) ефективна середня похибка становить:

$$\eta_{real} \approx 10\% - 15\%$$

У модернізованій системі застосовано BLDC-привід з ШІМ-керуванням, енкодер для точного визначення кута:

$$\theta = f(N_{imp}) \quad (2.25)$$

PID-регулятор:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.26)$$

Це забезпечує зменшення кутової похибки до:

$$\theta_{mod} \approx 1^\circ - 2^\circ$$

Втрати енергії:

$$\eta_{mod} = 1 - \cos(2^\circ) \approx 0,061\%$$

Сумарне підвищення ефективності можна оцінити як:

$$\Delta P \approx \eta_{base} - \eta_{mod} = (10\% - 15\%) - (0,061\%)$$

$$\Delta P_{avg} \approx 14,939\%$$

В результаті модернізації системи сонячного трекера шляхом впровадження BLDC-привода, опорно-поворотного пристрою WH14 та системи кутового зворотного зв'язку на основі енкодера, було досягнуто суттєвого підвищення точності позиціонування панелей. Це дозволило зменшити кутову похибку наведення з 8–15° до 1–2°, що відповідно знизило втрати енергії, пов'язані з косинусним відхиленням падаючого випромінювання. Загальне підвищення виробітку електроенергії системи становить приблизно 12–15%, що підтверджує ефективність запропонованої модернізації та її доцільність для використання в системах малої та середньої потужності фотоелектричних установок.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

Моделювання в роботі з модернізації трека сонячних панелей необхідне для попередньої перевірки працездатності та ефективності запропонованої системи керування без виготовлення фізичного прототипу. Воно дозволяє дослідити динамічні режими роботи привода, оцінити точність позиціонування, швидкість відпрацювання сигналів керування та вплив навантаження на стабільність системи. Крім того, імітаційне моделювання дає змогу виявити можливі коливання, перевантаження та нестійкі режими роботи ще на етапі проектування, що підвищує надійність і зменшує ризики при практичній реалізації.

На основі цього виконується побудова імітаційної моделі електропривода, що дозволяє дослідити його роботу в різних режимах керування.

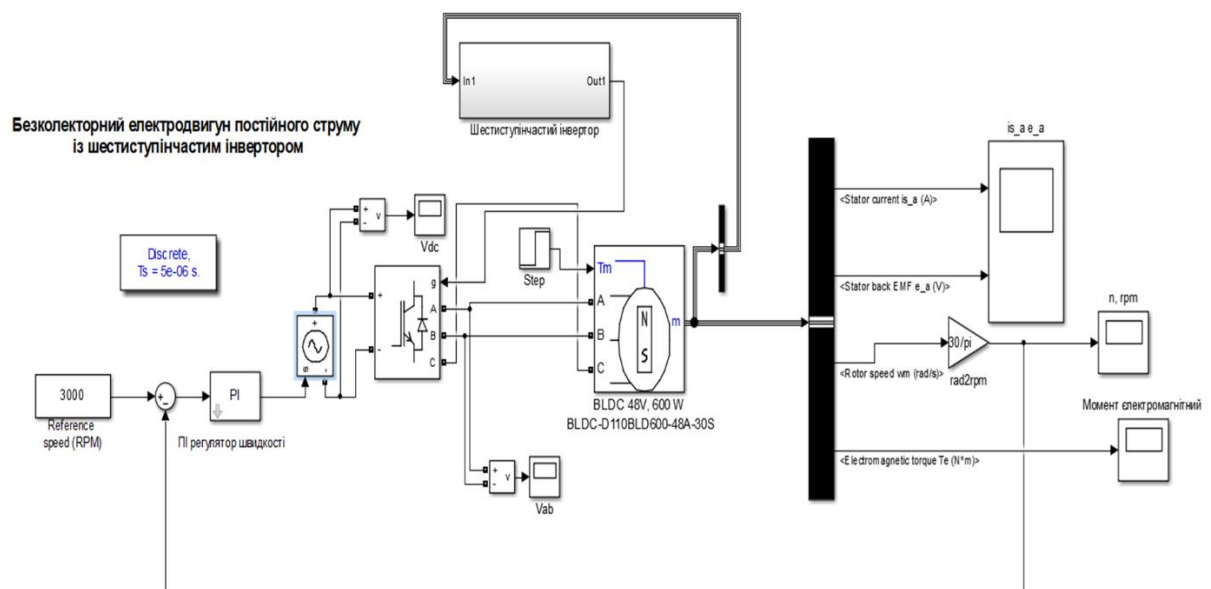


Рис. 3.1 Схема імітаційної моделі безщіткового електропривода постійного струму із шестиступінчастим регулюванням

Для дослідження динамічних властивостей електропривода трекера сонячних панелей побудовані графіки зміни швидкості та електромагнітного моменту при різних навантаженнях, що дозволяє:

- дозволяють оцінити стабільність швидкості обертання при зміні навантаження;
- показують, як двигун автоматично компенсує навантаження збільшенням електромагнітного моменту;
- підтверджують правильність вибору BLDC-привода та системи керування;
- дають можливість перевірити динамічні властивості системи (перехідні процеси);
- дозволяють виявити перевантаження, просадки швидкості та нестійкі режими.

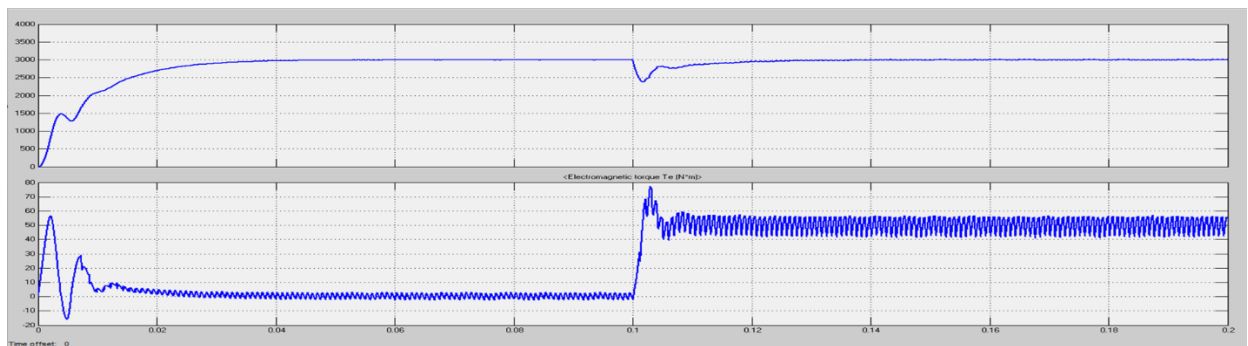


Рис. 3.2 Графіки зміни швидкості та електромагнітного моменту при навантаженні 20 Н·м

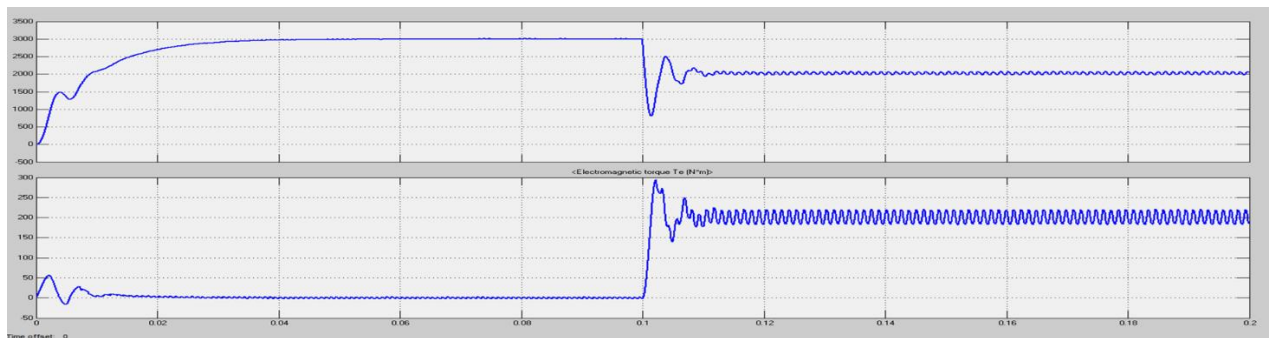


Рис. 3.3 Графіки зміни швидкості та електромагнітного моменту при навантаженні 200 Н·м

Для дослідження електромагнітних процесів у безщітковому двигуні та оцінки його динамічних характеристик побудовані графіки зміни струму статора електродвигуна та зворотної ЕРС статора при різних режимах навантаження.

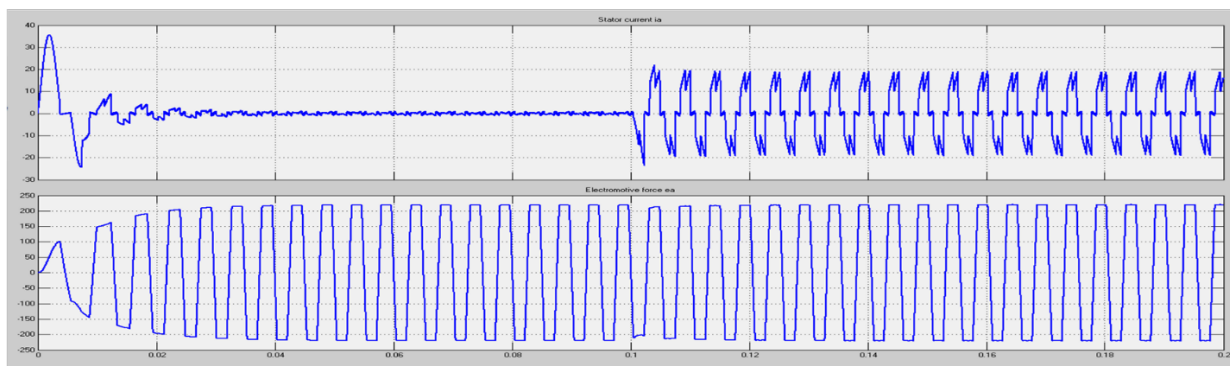
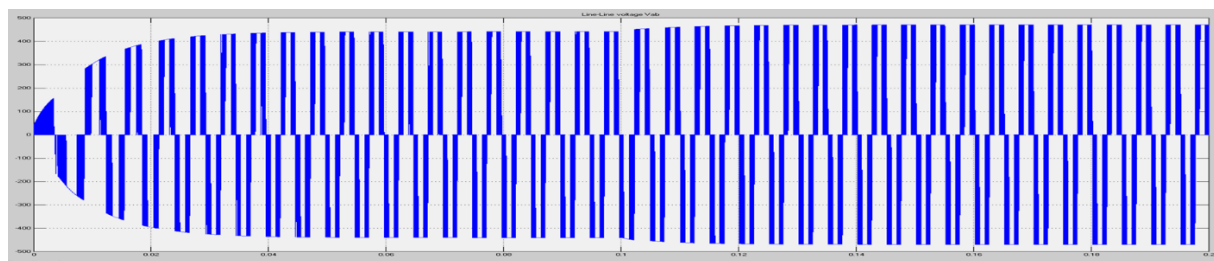


Рис. 3.4 Графіки зміни струму статора електродвигуна та зворотної ЕРС статора.

Для аналізу якості комутації фаз та оцінки електромагнітних процесів у безщітковому двигуні побудовано графік зміни та форми лінійної напруги між двома фазами BLDC-двигуна, що дозволяє перевірити правильність роботи системи керування та відповідність форми напруги алгоритму шестиступінчастої комутації.



3.5 Графік зміни та форми лінійної напруги між двома фазами BLCD

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

4.1 Загальні інвестиції

Для обчислення запропонованої у дипломному проєкті модернізації необхідно провести розрахунок витрат, якій складається з:

1. Витрати на придбання обладнання.
2. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт.
3. Витрати на:
 - виконання монтажних робіт;
 - налагоджувальні роботи;
 - транспортні витрати.

Таблиця 4.1 - Розрахунок вартості обладнання

Найменування	Ціна за одиницю, грн	Кількість, шт.	Вартість, грн
Двигун BLDC-D110BLD600-48A-30S	2800	1	2800
Опорно-поворотний пристрій WH14	20000	1	25000
Енкодер AS5600	120	1	120
Контролер BLD-750	1500	1	1500
Алгоритм позиціонування Arduino Mega 2560	900	1	900
Всього			30320

Оскільки сонячна фотоелектрична станція потужністю 5,2 кВт була встановлена на початковому етапі реалізації проєкту приватного домогосподарства, її вартість у межах даного модернізаційного проєкту не враховується. У даній роботі розглядається лише модернізація системи позиціонування сонячних панелей, тому до складу капітальних витрат включається виключно додаткове обладнання системи керування та приводу. Вартість сонячних панелей у розрахунок економічної ефективності модернізації не включається, оскільки вони були встановлені раніше та не є предметом модернізації.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Величина проектних капіталовкладень (S_i) за формулою:

$$S_i = K_{об} + K_T + K_{дм} + K_H + K_{пк} \quad (4.1)$$

де $K_{об}$ - сумарна вартість придбання обладнання, необхідного для реалізації проекту;

K_T – транспортні витрати;

$K_{дм}$ – витрати на демонтажні, монтажні роботи;

K_H - витрати на налагоджувальні роботи;

$K_{пк}$ – інші одноразові вкладення на придбання комплектуючих елементів, становлять приблизно 10% від вартості обладнання.

Витрати на транспортування, монтаж і наладку розраховуються за допомогою цін, прейскурантів, тарифів підприємств-перевізників та підприємств, які займаються монтажними і пусконаладжувальними роботами. Визначаємо ці витрати на рівні 10% від вартості обладнання.

$$S_i = 30320 + 3032 + 3032 = 36384 \text{ грн.}$$

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати системи стеження сонячної електростанції до модернізації можна подати як суму основних складових:

$$Cold = C_{mech} + C_{drive} + C_{sens} + Clabor \quad (4.2)$$

де:

C_{mech} - Обслуговування механічної частини (редуктор, підшипники, ОПП),

C_{drive} - обслуговування електроприводу (асинхронний двигун),

C_{sens} - обслуговування фотодатчиків

$Clabor$ - трудовитрати на регламентні та аварійні роботи

Обслуговування механічної частини

- мастило редуктора

- регулювання люфтів

- підтяжка з'єднань

- часткова заміна зношених елементів

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Типово виконується 2-4 рази на рік. Оцінка витрат:

- матеріали (мастило, дрібні деталі): 800–1200 грн/рік
- ремонтні роботи: 1500–2500 грн/рік

$$C_{tech} \approx 6500 \text{ грн/рік}$$

Обслуговування електроприводу (асинхронний двигун сам по собі надійний, але редуктор збільшує навантаження):

- перевірка ізоляції
- вібродіагностика
- обслуговування підшипників
- втрати через роботу з редуктором

$$C_{drive} \approx 4000 \text{ грн/рік}$$

Обслуговування фотодатчиків - один із «проблемних» елементів старої системи

- очищення від пилу та забруднень
- калібрування положення
- заміна при деградації чутливих елементів
- налаштування порогів спрацьовування

$$C_{sens} \approx 3000 \text{ грн/рік}$$

Трудовитрати на обслуговування

- планове ТО
- аварійні виїзди
- діагностика несправностей

Для малих СЕС зазвичай оцінюється окремо.

$$C_{labor} \approx 5000 \text{ грн/рік}$$

Підсумкові витрати до модернізації

$$C_{old} = 6500 + 4000 + 3000 + 5000 = 18500 \text{ грн/рік}$$

Складові витрат на обслуговування (після модернізації)

Після модернізації система включає:

- BLDC-D110BLD600-48A-30S (безщітковий двигун)

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

- ОПП WH14 (підвищений ресурс)
- енкодер AS5600 (безконтактний)
- контролер BLD-750
- Arduino Mega 2560 (цифрове керування)

Річні витрати:

$$C_{new} = C_{mech} + C_{drive} + C_{sens} + C_{labor}$$

- Механічна частина (WH14 + зниження зносу)
- менше вібрацій через BLDC
- WH14 має високий ресурс

Обслуговування тепер мінімальне:

- перевірка кріплень 1-2 рази на рік
- мастило/контроль вузлів

$$C_{mech} \approx 1500 \text{ грн/рік}$$

Електропривод (BLDC)

BLDC двигун:

- немає щіток → немає зносу щіткового вузла
- немає редуктора → менше механічних втрат
- нижче вібрації → менше навантаження на підшипники

$$C_{drive} \approx 900 \text{ грн/рік}$$

Датчики (AS5600 замість фотодатчиків). Ключове покращення:

- немає забруднення оптики
- немає калібрування за освітленістю
- абсолютний вимір кута

$$C_{sens} \approx 400 \text{ грн/рік}$$

Трудовитрати

- немає регулярного калібрування фотодатчиків
- менше аварій
- діагностика рідко

$$C_{labor} \approx 1500 \text{ грн/рік}$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

Підсумкові витрати після модернізації

$$C_{new} = 1500 + 900 + 400 + 1500 = 4300 \text{ грн/рік}$$

Економічний ефект

$$\Delta C = C_{old} - C_{new} = 18500 - 4300 = 14200$$

4.3 Річна економія електроенергії

Добове споживання приватного будинку

$$W_{доб} = 20 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу}$$

Річне споживання

$$W_{річ} = 20 \cdot 365 = 7300 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

Річна частка покриття СЕС

65% ~ сонячна енергія

35% ~ з мережі

Енергія, яку заміщає СЕС:

$$W_{СЕС} = 7300 \cdot 0,65 = 4745 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

$$W_{мережа} = 7300 - 4745 = 2555 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

Тариф для побутових споживачів 4,32 грн/кВт·год

$$C = 2555 \cdot 4,32 = 11037,60 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Після модернізації загальне підвищення виробітку електроенергії системи становить приблизно до 25%

Тоді

$$4745 + 25\% = 5931 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

Річна економія

$$W_{мережа} = 7300 - 5931 = 1369 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

$$E = 11037,6 - 5914,08 = 5124 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності капіталовкладень визначається як співвідношення інвестицій та річних витрат на обслуговування к річної економії електроенергії:

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

$$T_{\text{ок}} = \frac{S_i}{E} = \frac{36384}{19324} = 1,9 \text{ року}$$

Економія електричної енергії внаслідок модернізації є незначною, оскільки споживання системи позиціонування становить малу частку загального енергобалансу сонячної електростанції. Основний ефект проявляється саме у зниженні витрат на обслуговування та підвищенні надійності роботи системи.

Таким чином, загальний економічний ефект модернізації формується переважно за рахунок зниження річних витрат на технічне обслуговування, скорочення ремонтних робіт та підвищення ресурсу обладнання, що забезпечує зменшення експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі та підвищує економічну доцільність впровадження запропонованих технічних рішень.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Основні небезпечні та шкідливі фактори

Експлуатація сонячної електростанції в приватному домогосподарстві пов'язана з дією підвищених електричних напруг постійного струму, наявністю інверторного обладнання та зовнішніх метеорологічних факторів. У зв'язку з цим необхідне дотримання вимог охорони праці та електробезпеки відповідно до діючих нормативних документів.

Під час експлуатації СЕС можуть виникати такі небезпечні фактори:

- наявність постійної напруги до 600–1000 В DC на стороні фотоелектричних модулів;
- ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції;
- дугові розряди при неправильному з'єднанні DC-ланцюгів;
- перегрів інвертора та кабельних ліній;
- вплив атмосферних явищ (дощ, сніг, обледеніння, блискавка);
- механічні ризики при обслуговуванні конструкцій на висоті.

5.2 Електробезпека

Оскільки СЕС працює на постійному струмі, особливу небезпеку становлять:

- відсутність “нульового проходження струму” (дуга не гасне сама);
- можливість тривалого іскріння при пошкодженні ізоляції;
- висока енергія DC-ланцюгів навіть при частковому освітленні панелей.

Тому обов'язковими є:

- швидке аварійне відключення (DC shut-down);
- правильне заземлення металевих конструкцій.

Вимоги до безпечної експлуатації електричної частини

- всі з'єднання виконуються тільки при знеструмленій системі;
- використання DC-автоматів і запобіжників обов'язкове;

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

- забороняється роз'єднання роз'ємів MC4 під навантаженням;
- кабелі повинні мати UV-стійку та термостійку ізоляцію.

Інвертор повинен мати захист від:

- перевантаження,
- короткого замикання,
- перегріву,
- перенапруги;
- обов'язкове заземлення корпусу інвертора.

Для приватної СЕС необхідно:

- контур заземлення з опором не більше нормативного значення (зазвичай ≤ 4 Ом);
- підключення металевих конструкцій до системи зрівнювання потенціалів;
- встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (SPD тип 1/2);
- за наявності ризику — зовнішній блискавкозахист (молнієвідвід).

5.3 Вимоги під час обслуговування

Обслуговування виконується тільки кваліфікованим персоналом. Перед роботами обов'язкове повне відключення СЕС. Забороняється проводити ремонтні роботи під час дощу, грози або сильного вітру. Ведення журналу технічного обслуговування обов'язково.

При обслуговуванні СЕС необхідно використовувати:

- діелектричні рукавички;
- ізольований інструмент;
- захисне взуття;
- окуляри при роботі з електрообладнанням;
- страховку при роботі на висоті.

Для побутових СЕС характерно:

- відсутність постійного технічного персоналу;
- експлуатація непрофесіоналами;

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

- підвищений ризик неправильного відключення системи;
- доступність обладнання для мешканців будинку.

Тому особливо важливо:

- автоматизований захист інвертора;
- прості та безпечні алгоритми відключення;
- чітка інструкція для користувача.

5.4 Пожежна безпека

Експлуатація сонячної електростанції пов'язана з підвищеним ризиком виникнення пожежі через наявність постійної напруги, силових електронних перетворювачів та великої кількості з'єднань DC-ланцюгів.

До основних факторів ризику належать:

- виникнення електричної дуги в DC-колах при поганих контактах;
- перегрів кабельних ліній при перевантаженні;
- короткі замикання у фотоелектричних ланцюгах;
- несправність інвертора або контролера;
- погіршення контактів у роз'ємах (MC4);
- вплив високої температури навколишнього середовища.

Для зниження пожежної небезпеки необхідно передбачити:

- застосування DC-автоматів захисту та запобіжників;
- встановлення захисту від дугових замикань (AFCI) в інверторі;
- використання кабелів з підвищеною термостійкістю та UV-захистом;
- правильний підбір перерізу кабелів відповідно до струму навантаження;
- мінімізацію перехідних контактів у DC-колах;
- якісний монтаж роз'ємів MC4 із контролем зусилля затиску.

Інвертор та силова електроніка повинні мати:

- температурні датчики;
- автоматичне обмеження потужності при перегріві;
- вентиляційні або активні системи охолодження;

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

- монтаж у місцях без прямого сонячного випромінювання.

У зоні розміщення інвертора та щитового обладнання необхідно передбачити:

- порошкові вогнегасники (тип ABC);
- вуглекислотні вогнегасники (для електрообладнання до 1000 В);
- вільний доступ до засобів пожежогасіння;
- заборону використання води при гасінні електроустановок.

Дотримання вимог охорони праці при експлуатації сонячної електростанції в умовах приватного будинку є обов'язковою умовою безпечної роботи системи. Основну увагу слід приділяти електробезпеці DC-ланцюгів, правильному заземленню, захисту від перенапруг та організації безпечного доступу до обладнання. Виконання зазначених заходів забезпечує мінімізацію ризиків ураження електричним струмом, пожежної небезпеки та виходу обладнання з ладу.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

ВИСНОВКИ

У роботі виконано модернізацію системи автоматичного позиціонування сонячних панелей шляхом удосконалення привода трекера кута нахилу фотоелектричної станції. Актуальність проведених досліджень обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання сонячної енергії, збільшення виробітку електроенергії та зниження експлуатаційних витрат фотоелектричних установок.

У ході виконання роботи проведено аналіз сучасних фотоелектричних систем та принципів функціонування сонячних трекерів, досліджено особливості одновісних і двовісних систем позиціонування, а також визначено фактори, що впливають на ефективність орієнтації сонячних модулів відносно Сонця. Встановлено, що застосування систем автоматичного стеження дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт використання сонячної радіації та збільшити річний виробіток електроенергії.

У межах модернізації запропоновано замінити існуючий мотор-редукторний привод на безколекторний двигун постійного струму (BLDC) із електронним контролером керування та енкодером зворотного зв'язку. Запропоноване технічне рішення забезпечує більш високу точність позиціонування, плавність регулювання швидкості, зменшення механічних навантажень на конструкцію трекера та підвищення надійності системи в цілому. Виконано вибір контролера керування, енкодера положення, опорно-поворотного пристрою.

Виконано аналіз режимів роботи модернізованого трекера кута нахилу сонячних панелей на основі розрахункових залежностей зміни кута повороту протягом світлового дня. Отримані результати підтвердили працездатність запропонованого технічного рішення та можливість забезпечення необхідної точності позиціонування фотоелектричних модулів. Отримані результати підтвердили працездатність запропонованої системи та можливість

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

забезпечення необхідної точності орієнтації панелей протягом усього світлового дня. Побудовані графічні залежності кута повороту, швидкості переміщення та циклів роботи привода показали стабільний характер функціонування модернізованої системи.

Економічний аналіз продемонстрував, що впровадження системи автоматичного позиціонування дозволяє збільшити генерацію електричної енергії порівняно зі стаціонарним розміщенням фотоелектричних модулів. Додатковий виробіток електроенергії сприяє зменшенню витрат на електропостачання підприємства та підвищує загальну ефективність використання існуючої сонячної електростанції без необхідності встановлення додаткових фотоелектричних модулів.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута, а всі поставлені завдання виконані. Запропонована модернізація трека кута нахилу сонячних панелей забезпечує підвищення енергетичної ефективності фотоелектричної станції, покращення точності позиціонування, зменшення механічного зношування обладнання та створює передумови для подальшого впровадження інтелектуальних систем керування відновлюваними джерелами енергії. Отримані результати можуть бути використані під час проектування, модернізації та експлуатації сонячних електростанцій малого та середнього рівня потужності.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко, В. В. Сонячна енергетика: принципи, технології, перспективи /В. В. Бойко. – Київ: Наукова думка, 2020. – 315 с.
2. Визначення оптимального кута нахилу сонячних батарей. [Електронний ресурс]: – 2018 р. – Режим доступу до ресурсу: <http://ecoelectrics.com.ua/novosti/iakii-kut-nahilu-soniachnih-batarei-optimalnii>.
3. Особливості проектування сонячних електростанцій [Електронний ресурс]: – 2018 р. – Режим доступу до ресурсу: <https://rent techno.ua/ua/blog/bipv-design.html>
4. Гончаренко, П. В. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності сонячних електростанцій / П. В. Гончаренко // Технічні інновації. – 2019. – № 6. – С. 34–41
5. Жолубак І. М., Матвієць В. Ю. Трекер для сонячних електростанцій. Комп'ютерні системи та мережі. 2022. Вип. 4, № 1. С. 37–46. DOI: 10.23939/csn2022.01.037.
6. Данко В. М., Смутко С. В., Поліщук О. С. Розробка конструкції трекерної системи для сонячних панелей. Хмельницький національний університет. 2023. URL: <https://maees.khmn u.edu.ua/Statti-patenti>
7. Сонячна енергетика: теорія та практика : монографія / Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал ; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с.
8. Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювана енергетика. Підручник / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, І.О. Сінчук, О.М. Ялова, - Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. – 218 с.
9. Електричні машини: підручник / М. А. Яцун ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2011. – 461, с.
10. Електропривод : підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. - К. : «Ліра-К», 2009. - 504 с.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

11. АЕЕ. Інститут сталих технологій – Гляйсдорф. Київ, 2015. 23. Прокіп А. В., Дудюк В. С., Колісник Р. Б. Організаційні та еколого-економічні засади використання відновлюваних енергоресурсів : монографія. Львів : ЗУКЦ, 2015. 337 с. 451

12. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломної роботи для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укладачі: Л.В. Тимошенко, Н.В. Дементьєва - Дніпро: НГУ, 2018. - 15 с.

13. Методичні вказівки до виконання розділу „Охорона праці“ в дипломних проектах (роботах) бакалаврів інституту електроенергетики / В.І. Голінько, В.Ю. Фрундін, Ю.І. Чеберячко, М.Ю. Іконніков. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2012. – 8 с.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата