

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка електроприводу для керування сонячними панелями

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТм-24-1



Підпис

Кисляк М.О.

Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

проф. Скиба М.Є.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

доц. Тимощук О.Г.

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.

Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10

12

202 5 р.

Хмельницький 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

10.12.2025р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Кисляк Максим Олегович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка електроприводу для керування сонячними панелями

керівник роботи проф. Скиба М.Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики сонячних панелей

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка електроприводу для керування сонячними панелями. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність електроприводу для керування сонячними панелями. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Пристрої для повороту сонячних батарей. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Система керування сонячною панелею. Схема структурна (A1). Аркуш 3. Схема керування положенням сонячної панелі. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 4. Система керування сонячною панелею. Схема кінематична (A1). Аркуш 5. Схема підключення сонячної панелі. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Алгоритм керування сонячною панелею. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

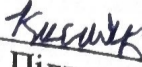
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

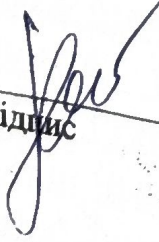
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 28.10.24р.	
2. Розробка електроприводу для керування сонячними панелями	до 15.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність електроприводу для керування сонячними панелями	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

Керівник роботи

  
Підпис

  
Підпис

М.О. Кисляк  
Ініціали, прізвище

М.Є. Скиба  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Кисляк Максим Олегович

2. Тема магістерської роботи Розробка електроприводу для керування сонячними панелями

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 85

5. Розвиток методів керування положенням сонячних панелей і впровадження електроприводів у складі трекерних систем є важливим напрямком підвищення ефективності використання сонячної енергії. Сучасні електроприводи дозволяють реалізувати точне, надійне та енергоефективне позиціонування панелей з урахуванням добових і сезонних змін положення Сонця, що безпосередньо впливає на зростання виробітку електричної енергії та стабільність роботи сонячних установок. У цьому контексті магістерська робота, присвячена розробці електроприводу для керування положенням сонячних панелей, є актуальною з наукової та практичної точок зору, оскільки спрямована на створення технічно обгрунтованих рішень для підвищення енергоефективності, надійності та адаптивності сучасних сонячних енергетичних систем.

В магістерській роботі розроблено конструкцію електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками. В першому розділі зроблено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку електроприводу для керування сонячними панелями. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність електроприводу для керування сонячними панелями.

Підпис студента Кисляк

" 10 " 12 20 25 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 29 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК добре / с / 78

Рекомендації ЕК -

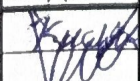




Особливі відмітки -

Технічний секретар Гуроч А.В. Дз

" 24 " 12 20 25 р.

# ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Загальні відомості про сонячні елементи	8
1.2 Суть ефекту, що використовується в сонячних елементах	11
1.3 Загальні відомості про сонячні панелі	15
1.4 Будова сонячної панелі	19
1.5 Методи підвищення ефективності роботи сонячних батарей	24
1.6 Висновки до першого розділу	27
2 Розробка електроприводу для керування сонячними панелями	29
2.1 Обґрунтування розробки електроприводу для керування сонячними панелями	29
2.2 Розробка базової структурної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю	31
2.3 Розробка структурної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю за двома осями	33
2.4 Розробка кінематичної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю	37
2.5 Розробка схеми підключення сонячної панелі	40
2.6 Розробка алгоритму роботи системи керування сонячною панеллю	43
2.7 Висновки до другого розділу	46
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність електроприводу для керування сонячними панелями	48

МРМА25.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Кисляк		
Перевір.		Скиба		
Н.контр.				
Затвер.		Неймак		
Розробка електроприводу для керування сонячними панелями Пояснювальна записка			Літера	Аркуш
			М	4
			ХНУ гр.ЕТм-24-1	
			Аркушів	85



## ВСТУП

Використання альтернативних, екологічно чистих джерел енергії на сучасному етапі розвитку енергетики є одним із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку, енергетичної безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля. Зростання споживання електроенергії, обмеженість традиційних паливно-енергетичних ресурсів та посилення екологічних вимог стимулюють активний розвиток відновлюваних джерел енергії. Серед них сонячна енергія посідає провідне місце завдяки практичній невичерпності, глобальній доступності та відсутності шкідливих викидів у процесі виробництва електроенергії. Потік сонячного випромінювання, що надходить на поверхню Землі, у багато разів перевищує сумарне світове споживання енергоресурсів, що підтверджує високий потенціал сонячної енергетики як основи майбутніх енергосистем.

Найбільш поширеним способом використання сонячної енергії є її перетворення в електричну енергію за допомогою фотоелектричних панелей. Однак ефективність таких систем істотно обмежується порівняно низьким коефіцієнтом корисної дії сонячних елементів, а також значною залежністю виробітку електроенергії від кута падіння сонячного випромінювання. Максимальна потужність сонячного модуля досягається за перпендикулярного падіння променів на його поверхню, тоді як навіть відносно невелике відхилення кута призводить до помітного зниження ККД. У реальних умовах експлуатації, з огляду на добовий і сезонний рух Сонця, фіксоване розміщення панелей не дозволяє підтримувати оптимальну орієнтацію протягом тривалого часу.

Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення енерговіддачі сонячних електростанцій є застосування систем керування положенням сонячних панелей, які забезпечують їх автоматичне орієнтування відповідно до положення Сонця. Використання таких систем дає змогу істотно збільшити кількість виробленої електроенергії без нарощування площі сонячних батарей, що особливо важливо з економічної точки зору, оскільки фотоелектричні модулі залишаються найдорожчим

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

елементом сонячних установок. Крім того, впровадження приводів орієнтації дозволяє оптимізувати використання території сонячних електростанцій та зменшити капітальні витрати на їх будівництво.

Актуальність розробки електроприводів для керування сонячними панелями зумовлена також необхідністю забезпечення високої точності, надійності та енергоефективності таких систем у різних умовах експлуатації. Електропривод повинен забезпечувати плавне переміщення панелі з малими швидкостями, витримувати змінні та переривчасті навантаження, а також працювати з мінімальним енергоспоживанням і високим ресурсом. Це вимагає обґрунтованого вибору типу двигуна, структури механічної передачі та параметрів керування.

Метою даної магістерської роботи є розробка електроприводу для керування сонячними панелями, який забезпечує ефективне, точне та надійне орієнтування панелі відносно Сонця. У межах роботи передбачається аналіз існуючих технічних рішень, вибір оптимальної структури приводу, виконання кінематичних і силових розрахунків, а також обґрунтування працездатності розробленої конструкції. Реалізація запропонованого електроприводу сприятиме підвищенню ефективності використання сонячної енергії, розвитку автономних енергетичних систем та розширенню практичного застосування відновлюваних джерел енергії.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Загальні відомості про сонячні елементи

Сонячні елементи є основним первинним перетворювальним елементом фотоелектричних енергетичних систем і призначені для прямого перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію без використання проміжних теплових або механічних ланок. Завдяки цьому фотоелектричні системи характеризуються високою надійністю, відсутністю рухомих частин у зоні генерації енергії, низькими експлуатаційними витратами та мінімальним впливом на навколишнє середовище. У сучасних умовах розвитку енергетики сонячні елементи розглядаються як один із ключових компонентів децентралізованих та автономних систем електропостачання [1-4].

Фізичною основою роботи сонячного елемента є внутрішній фотоелектричний ефект, який проявляється в напівпровідникових матеріалах під дією електромагнітного випромінювання. Коли фотони сонячного світла з енергією, що перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, поглинаються матеріалом, відбувається генерація електрон-діркових пар. У присутності внутрішнього електричного поля, сформованого р-n переходом, ці носії заряду просторово розділяються, що приводить до виникнення електрорушійної сили та появи електричного струму в зовнішньому колі при підключенні навантаження [2].

Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення сонячних елементів є кремній, який може використовуватись у монокристалічній, полікристалічній та аморфній формах. Кремній має оптимальне поєднання електрофізичних характеристик, доступності сировини та добре відпрацьованих технологій очищення і легування. Монокристалічні кремнієві сонячні елементи характеризуються найвищим коефіцієнтом корисної дії серед промислово доступних технологій, що зумо-

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

влено впорядкованою кристалічною ґраткою та меншими втратами на рекомбінацію носіїв заряду (рис.1.1). Водночас їх виробництво потребує складних і енергоємних технологічних процесів, що впливає на кінцеву вартість виробу.

Полікристалічні сонячні елементи виготовляються з кремнію, який має зернисту структуру з множинними кристалічними доменами (рис.1.1). Наявність меж зерен призводить до збільшення втрат носіїв заряду, внаслідок чого ККД таких елементів дещо нижчий порівняно з монокристалічними аналогами. Проте спрощена технологія виготовлення і нижча собівартість роблять полікристалічні сонячні елементи широко застосовуваними у промислових та побутових фотоелектричних установках [5].

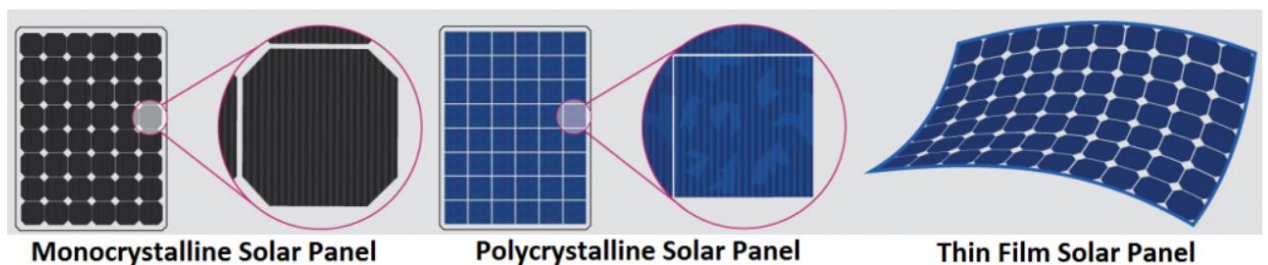


Рисунок 1.1 – Типи сонячних елементів

Окремий клас становлять тонкоплівкові сонячні елементи, у яких фотоактивний шар має товщину від кількох сотень нанометрів до кількох мікрометрів і наноситься на різні типи підкладок. До цієї групи належать елементи на основі аморфного кремнію, телуриду кадмію, селеніду міді-індію та інших складних напівпровідникових сполук. Тонкоплівкові технології дозволяють зменшити масу та матеріалоемність виробів, а також реалізувати гнучкі або напівгнучкі конструкції (рис.1.1). Разом із тим, такі сонячні елементи зазвичай мають нижчий ККД та потребують більшої площі для отримання однакової потужності порівняно з кристалічними кремнієвими панелями.

Електричні властивості сонячних елементів описуються вольт-амперними характеристиками, які залежать від рівня освітленості, температури та спектраль-

ного складу сонячного випромінювання. Основними параметрами сонячного елемента є напруга холостого ходу, струм короткого замикання, точка максимальної потужності та коефіцієнт заповнення. Ці характеристики визначають ефективність перетворення енергії та є вихідними даними для проєктування електричних і електромеханічних систем, що працюють у складі сонячних установок.

Для практичного використання окремі сонячні елементи з'єднуються між собою у модулі та панелі з метою отримання необхідних значень напруги, струму та потужності. Сонячна панель являє собою складну багатошарову конструкцію, яка включає захисне загартоване скло, фотоелектричні елементи, герметизуючі полімерні шари, струмопровідні шини та несучу раму. Така конструкція забезпечує механічну міцність, електричну ізоляцію та захист від впливу вологи, пилу, ультрафіолетового випромінювання і температурних коливань.

Ефективність роботи сонячних елементів значною мірою визначається зовнішніми умовами експлуатації. Зі зростанням температури поверхні сонячного елемента зменшується його вихідна напруга, що призводить до зниження корисної потужності. Водночас інтенсивність сонячного випромінювання та кут його падіння на поверхню панелі мають вирішальний вплив на величину генерованої електричної енергії. Максимальний виробіток досягається за умови перпендикулярного падіння сонячних променів, тоді як відхилення кута навіть на кілька десятків градусів спричиняє суттєве зменшення ефективної площі опромінення.

У реальних умовах експлуатації сонячних електростанцій положення Сонця постійно змінюється внаслідок добового обертання Землі та її руху навколо Сонця. Це призводить до того, що фіксовано встановлені сонячні панелі працюють в оптимальному режимі лише протягом обмеженого проміжку часу. З цієї причини все більшого поширення набувають системи активного орієнтування сонячних панелей, які забезпечують автоматичну зміну їх положення у просторі відповідно до поточного положення Сонця.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Застосування систем керування орієнтацією панелей дозволяє істотно підвищити сумарний добовий та річний виробіток електроенергії без збільшення кількості сонячних модулів [6-8]. При цьому сонячні елементи розглядаються як складова частина інтегрованої електромеханічної системи, у якій важливу роль відіграють електроприводи, передавальні механізми та системи автоматичного керування. Саме взаємодія фотоелектричних елементів із приводними пристроями визначає загальну ефективність та економічну доцільність використання сонячної енергії.

Таким чином, сонячні елементи є фундаментальною основою сучасних фотоелектричних установок, а їх конструктивні, електричні та експлуатаційні особливості безпосередньо впливають на вимоги до систем керування та електроприводів сонячних панелей. Ґрунтовне розуміння принципів роботи сонячних елементів, їх типів і характеристик є необхідною передумовою для подальшого аналізу існуючих технологічних і технічних рішень у сфері керування положенням сонячних панелей, що і є предметом подальших підрозділів даної магістерської роботи.

## 1.2 Суть ефекту, що використовується в сонячних елементах

Робота сонячних елементів ґрунтується на використанні фотоелектричного ефекту, який полягає у виникненні електрорушійної сили та електричного струму в напівпровідниковому матеріалі під дією сонячного випромінювання. Цей фізичний ефект є основою фотоелектричного перетворення енергії та визначає принцип функціонування всіх сучасних фотоелектричних елементів, незалежно від їх конструкції, матеріалу виготовлення та технології виробництва [9-11].

Фотоелектричний ефект у сонячних елементах належить до так званого внутрішнього фотоелектричного ефекту, на відміну від зовнішнього, який використовується, наприклад, у фотокатодах вакуумних приладів. Суть внутрішнього фотоелектричного ефекту полягає в тому, що під дією світлового випромінювання

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

в напівпровіднику відбувається зміна концентрації вільних носіїв заряду, а за наявності внутрішнього електричного поля виникає спрямований рух цих носіїв, що приводить до появи електричного струму у зовнішньому колі.

Фундаментальною передумовою виникнення фотоелектричного ефекту є квантова природа світла. Сонячне випромінювання розглядається як потік фотонів, кожен з яких має певну енергію, пропорційну частоті випромінювання. Якщо енергія фотона перевищує ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу, він може бути поглинутий, що приводить до переходу електрона з валентної зони в зону провідності. У результаті такого переходу утворюється пара вільних носіїв заряду - електрон і дірка.

У реальному напівпровіднику збуджені носії заряду можуть рекомбінувати, тобто знову з'єднуватися, не виконуючи корисної роботи. Для забезпечення корисного використання згенерованих електрон-діркових пар у сонячних елементах створюється спеціальна структура - р-n перехід (рис. 1.2). Він формується шляхом легування напівпровідника домішками, які створюють області з переважанням електронної (n-тип) або діркової (р-тип) провідності. На межі цих областей виникає внутрішнє електричне поле, яке відіграє ключову роль у процесі фотоелектричного перетворення.

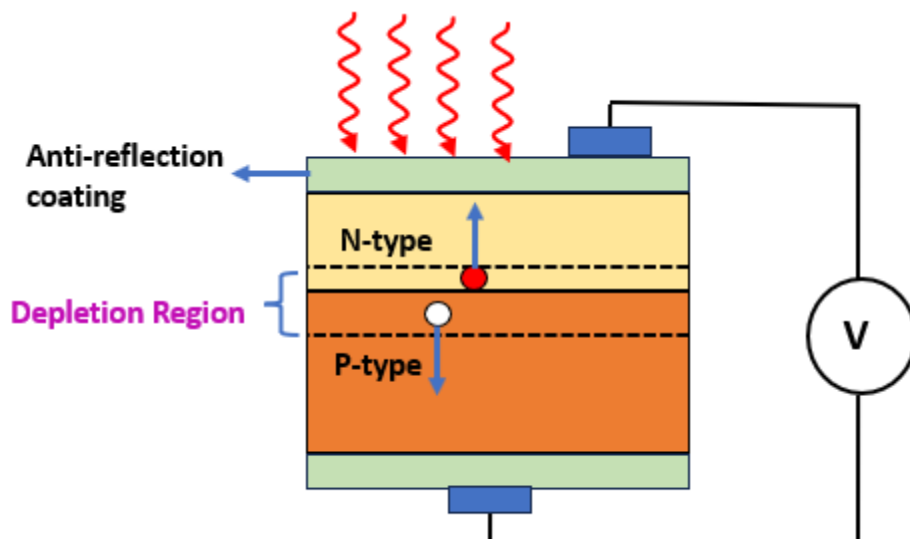


Рисунок 1.2 – Принцип роботи р-n переходу



зони, що визначає діапазон довжин хвиль сонячного випромінювання, які можуть бути ефективно використані для генерації електричної енергії. Фотони з енергією, меншою за ширину забороненої зони, не поглинаються матеріалом і не беруть участі у фотоелектричному перетворенні, тоді як фотони з надлишковою енергією втрачають її у вигляді тепла. Саме цим пояснюється обмежений коефіцієнт корисної дії одиночного сонячного елемента.

Температурні умови експлуатації також суттєво впливають на прояв фотоелектричного ефекту. З підвищенням температури зменшується напруга холостого ходу сонячного елемента, що пов'язано зі зміною електрофізичних параметрів напівпровідника. Водночас струм короткого замикання може дещо зростати, проте загальний ефект підвищення температури є негативним з точки зору вихідної потужності. Це обумовлює необхідність врахування теплових режимів під час проектування та експлуатації фотоелектричних систем.

У реальних сонячних елементах для підвищення ефективності використання фотоелектричного ефекту застосовуються додаткові конструктивні та технологічні рішення. До них належать антивідбивні покриття, що зменшують втрати світла на відбиття, оптимізація товщини фотоактивного шару, застосування багат шарових або гетероструктурних елементів, а також вдосконалення контактних систем для зменшення електричних втрат. Усі ці заходи спрямовані на максимальне використання енергії сонячного випромінювання та зменшення внутрішніх втрат.

Таким чином, суть ефекту, що використовується в сонячних елементах, полягає у квантово-механічному процесі перетворення енергії фотонів у електричну енергію за рахунок генерації та просторового розділення носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі. Фотоелектричний ефект є фундаментальною фізичною основою сонячної енергетики і визначає як можливості, так і обмеження фотоелектричних систем. Розуміння механізмів цього ефекту є необхідним для подальшого аналізу технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності роботи

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

сонячних панелей, зокрема шляхом застосування електроприводів керування їх просторовою орієнтацією.

### 1.3 Загальні відомості про сонячні панелі

Сонячні панелі є основним конструктивно завершеним елементом фотоелектричних енергетичних систем і призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з подальшим її використанням у системах електропостачання різного призначення. Вони являють собою сукупність фотоелектричних елементів, електрично з'єднаних між собою та об'єднаних у жорстку, механічно міцну і герметичну конструкцію, здатну працювати в умовах тривалого впливу навколишнього середовища. Саме сонячна панель, а не окремий сонячний елемент, є базовою одиницею практичного використання сонячної енергії в промислових, комерційних і побутових установках.

Основною функцією сонячної панелі є забезпечення стабільного та прогнозованого виробництва електричної енергії за умов змінної інтенсивності сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та кута падіння сонячних променів. Для цього панелі повинні поєднувати у собі високі електричні характеристики, тривалий ресурс роботи, механічну міцність і стійкість до кліматичних впливів. Сучасні сонячні панелі розраховані на термін експлуатації 20–30 років із допустимим поступовим зниженням вихідної потужності, що робить їх економічно доцільними джерелами електроенергії.

За типом фотоелектричних елементів, що використовуються у конструкції, сонячні панелі поділяються на монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Монокристалічні сонячні панелі виготовляються на основі сонячних елементів з монокристалічного кремнію, який характеризується впорядкованою кристалічною ґраткою та мінімальною кількістю дефектів (рис.1.4) [12-14].

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Це забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, який у сучасних промислових зразках досягає 20–23 %. Завдяки високій питомій потужності монокристалічні панелі дозволяють отримати максимальний електричний вихід з обмеженої площі, що є важливим фактором при монтажі на дахах будівель або в умовах обмеженого простору. Основним недоліком таких панелей є їх вища вартість, зумовлена складністю технологічних процесів вирощування монокристалів і виготовлення елементів.

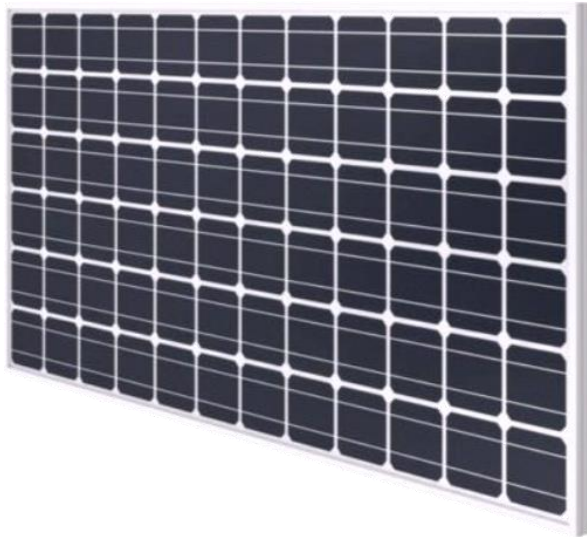


Рисунок 1.4 – Монокристалічна сонячна панель [12]

Полікристалічні сонячні панелі виготовляються з кремнію, який має багатокристалічну структуру (рис.1.5).

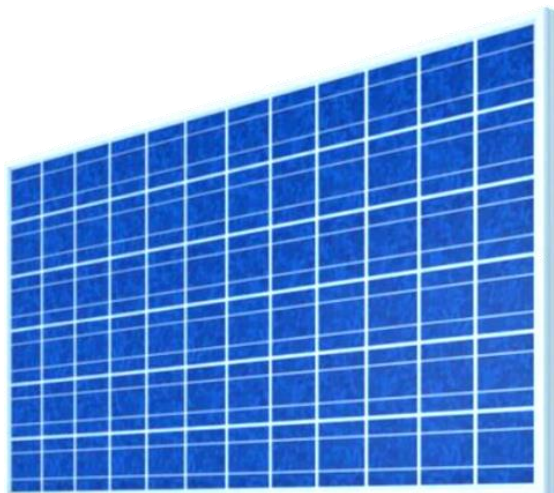


Рисунок 1.5 – Полікристалічна сонячна панель [12]

У процесі кристалізації розплаву формується матеріал з множинними кристалічними зернами, між якими існують межі, що збільшують втрати носіїв заряду. Унаслідок цього коефіцієнт корисної дії полікристалічних панелей є дещо нижчим, зазвичай у межах 16–19 %. Водночас технологія їх виробництва є простішою та менш енергоємною, що знижує собівартість готової продукції. Полікристалічні панелі широко застосовуються в наземних сонячних електростанціях, де площа розміщення не є критичним обмеженням, а визначальним фактором виступає зниження загальної вартості системи.

Тонкоплівкові сонячні панелі становлять окремий клас фотоелектричних пристроїв, у яких фотоактивний матеріал наноситься у вигляді тонкого шару на підкладку зі скла, металу або полімеру.



Рисунок 1.6 - Тонкоплівкові сонячні панелі [12]

До цієї групи належать панелі на основі аморфного кремнію, телуриду кадмію, а також сполук міді, індію та селену. Тонкоплівкові панелі відрізняються меншою масою, можливістю створення гнучких або напівгнучких конструкцій та кращою роботою за умов розсіяного освітлення і часткового затінення. Водночас їх коефіцієнт корисної дії є нижчим порівняно з кристалічними кремнієвими панелями, що потребує збільшення площі для отримання еквівалентної потужності. Це обмежує їх використання в компактних установках, але робить перспективними для інтеграції у фасади будівель або мобільні енергетичні системи.

Конструктивно сонячна панель має багатошарову будову, кожен елемент якої виконує чітко визначену функцію. Верхній шар, як правило, виготовляється із загартованого скла з антивідбивним покриттям, яке зменшує втрати світла на відбиття та підвищує механічну міцність конструкції. Під склом розміщуються фотоелектричні елементи, з'єднані струмопровідними шинами та заламіновані полімерними матеріалами, що забезпечують електричну ізоляцію, герметичність і захист від вологи. Нижній шар виконує функцію додаткового захисту, а жорстка рама з алюмінієвого сплаву забезпечує механічну стабільність панелі та можливість її монтажу на різних типах опорних конструкцій.

Електричні характеристики сонячної панелі визначаються параметрами окремих сонячних елементів і схемою їх з'єднання. Основними з них є номінальна потужність, напруга та струм у точці максимальної потужності, напруга холостого ходу і струм короткого замикання. Ці параметри наводяться для стандартних умов випробувань, які передбачають певну інтенсивність сонячного випромінювання, температуру елементів і спектральний склад світла. У реальних умовах експлуатації ці параметри можуть істотно змінюватися, що необхідно враховувати під час проектування електротехнічних і електромеханічних систем.

Ефективність роботи сонячних панелей значною мірою залежить від зовнішніх чинників, серед яких ключовими є температура, рівень освітленості, наявність забруднень на поверхні та кут падіння сонячних променів. Підвищення температури панелі призводить до зниження вихідної напруги і, відповідно, до зменшення корисної потужності. Забруднення поверхні скла пилом або снігом також знижує ефективність поглинання сонячного випромінювання. Проте найбільш суттєвим фактором є орієнтація панелі відносно Сонця, оскільки максимальний виробіток досягається лише за умови близького до перпендикулярного падіння сонячних променів.

У фіксованих системах монтажу оптимальна орієнтація забезпечується лише протягом обмеженого часу, що призводить до зменшення середньодобового та річного виробітку електроенергії. Для усунення цього недоліку застосовуються

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

системи керування положенням сонячних панелей, які дозволяють змінювати їх просторову орієнтацію відповідно до руху Сонця. Такі системи можуть бути одно- або двокоординатними та включають у себе електроприводи, механічні передачі та системи автоматичного керування. У цьому випадку сонячна панель виступає як механічне навантаження, параметри якого безпосередньо впливають на вибір типу приводу, передаточних механізмів і режимів роботи системи.

Таким чином, сонячні панелі є складними електротехнічними виробами, які поєднують у собі фотоелектричні, механічні та конструктивні елементи. Тип панелі, використані матеріали та технологія виготовлення визначають її електричні характеристики, довговічність і умови експлуатації. Розуміння загальних відомостей про сонячні панелі, їх класифікацію, конструкцію та особливості роботи є необхідною основою для подальшого аналізу існуючих технічних рішень у сфері керування положенням сонячних панелей і обґрунтування параметрів електроприводу, що розробляється в межах даної магістерської роботи.

#### 1.4 Будова сонячної панелі

Традиційні сонячні панелі, незалежно від типу використаних фотоелектричних елементів (монокристалічних, полікристалічних або тонкоплівкових), мають багат шарову конструкцію, кожен елемент якої виконує чітко визначену функцію та забезпечує надійну і довготривалу роботу панелі в реальних умовах експлуатації (рис.1.7). Основу конструкції становить алюмінієвий каркас, який надає панелі механічної жорсткості, забезпечує геометричну стабільність та слугує елементом для монтажу на опорні конструкції. Алюміній використовується завдяки малій масі, високій корозійній стійкості та достатній міцності, що є особливо важливим за тривалого впливу атмосферних факторів [15, 16].

З лицьового боку панелі розміщується загартоване скло з підвищеною механічною міцністю та стійкістю до ударних і вітрових навантажень. Таке скло ви-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

конує захисну функцію, оберігаючи фотоелектричні елементи від механічних пошкоджень, вологи, пилу та ультрафіолетового випромінювання. Часто поверхня скла має антивідбивне покриття, яке зменшує втрати сонячного світла на відбиття та підвищує загальну ефективність панелі. Висока прозорість скла забезпечує максимальне проходження сонячного випромінювання до активного шару елементів.

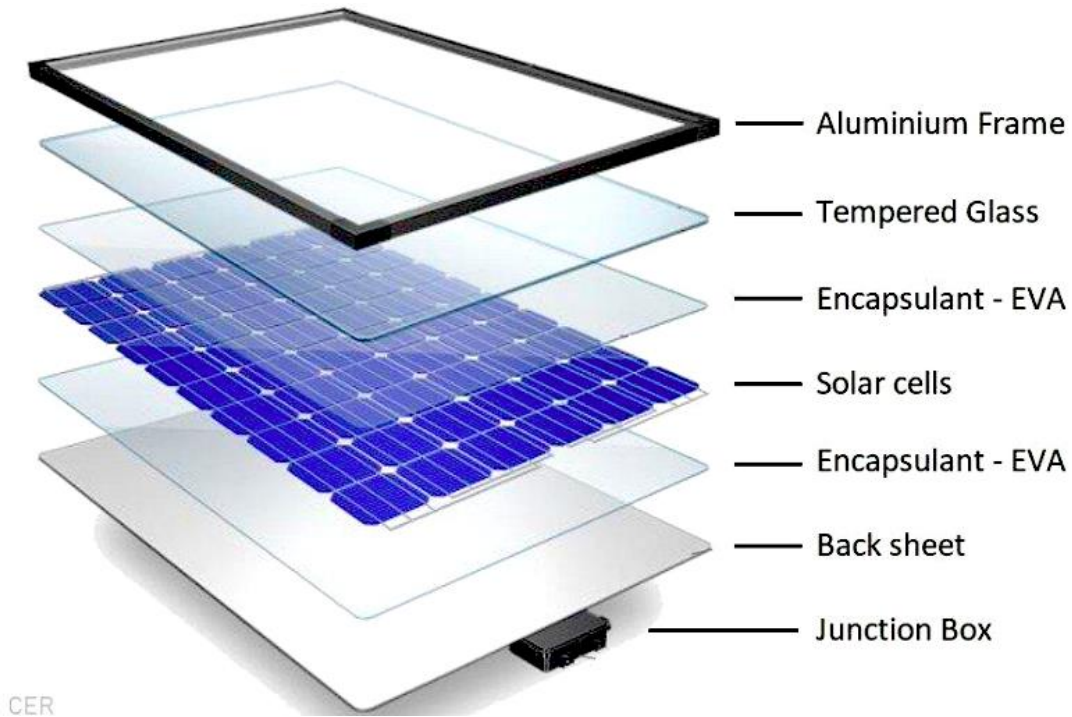


Рисунок 1.7 – Будова сонячної панелі [15]

Безпосередньо під склом розміщується шар EVA-інкапсулянту (етиленвінілацетату), який виконує роль герметизуючого та амортизуючого матеріалу. Цей шар забезпечує надійне закріплення сонячних елементів, захищає їх від проникнення вологи та компенсує механічні напруження, що виникають унаслідок температурних коливань. EVA-інкапсулянт також сприяє рівномірному розподілу навантажень по поверхні елементів і зменшує ризик утворення мікротріщин.

Центральною частиною конструкції є сонячні елементи, які безпосередньо здійснюють перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Вони електрично з'єднуються між собою струмопровідними шинами у послідовно-паралельну схему, що дозволяє отримати необхідні значення напруги та

струму на виході панелі. Якість електричних з'єднань і точність розміщення елементів мають суттєвий вплив на надійність і ефективність роботи всієї панелі.

Під сонячними елементами розміщується другий шар EVA-інкапсулянту, який разом із верхнім шаром утворює герметичну ламіновану структуру. Цей шар додатково захищає елементи від механічних впливів з тильного боку, а також забезпечує електричну ізоляцію та стабільність внутрішньої конструкції панелі протягом усього терміну експлуатації.

З тильної сторони панелі встановлюється задня плівка, яка виконує функцію бар'єра від вологи, кисню та інших агресивних чинників навколишнього середовища. Вона також забезпечує додаткову електричну ізоляцію та підвищує пожежну безпеку виробу. Задня плівка зазвичай виготовляється з багат шарових полімерних матеріалів, стійких до ультрафіолетового випромінювання та температурних перепадів.

Завершальним елементом конструкції є розподільча коробка, розташована на тильній стороні панелі. Вона призначена для підключення електричних виводів панелі до зовнішнього кола та містить діоди захисту, які запобігають зворотним струмам і втратам потужності у випадку часткового затінення або несправностей окремих елементів. Розподільча коробка також підвищує електробезпеку та надійність експлуатації сонячної панелі.

Таким чином, традиційна сонячна панель є складною багат шаровою конструкцією, у якій кожен елемент виконує важливу функцію і безпосередньо впливає на електричні, механічні та експлуатаційні характеристики виробу. Узгоджена робота всіх конструктивних шарів забезпечує ефективне перетворення сонячної енергії, високу надійність і довговічність панелі, що є критично важливим для її використання в системах керування сонячними установками.

Напівгнучкі сонячні панелі є окремим різновидом фотоелектричних модулів, конструкція яких орієнтована на зменшення маси, підвищення механічної адаптивності та можливість встановлення на поверхнях зі змінною або криволінійною геометрією. На відміну від класичних жорстких панелей із загартованим

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

склом та алюмінієвою рамою, напівгнучкі модулі мають багатошарову ламіновану структуру без жорсткого несучого каркасу, що забезпечує їм здатність до згинання без руйнування активних елементів (рис.1.8).

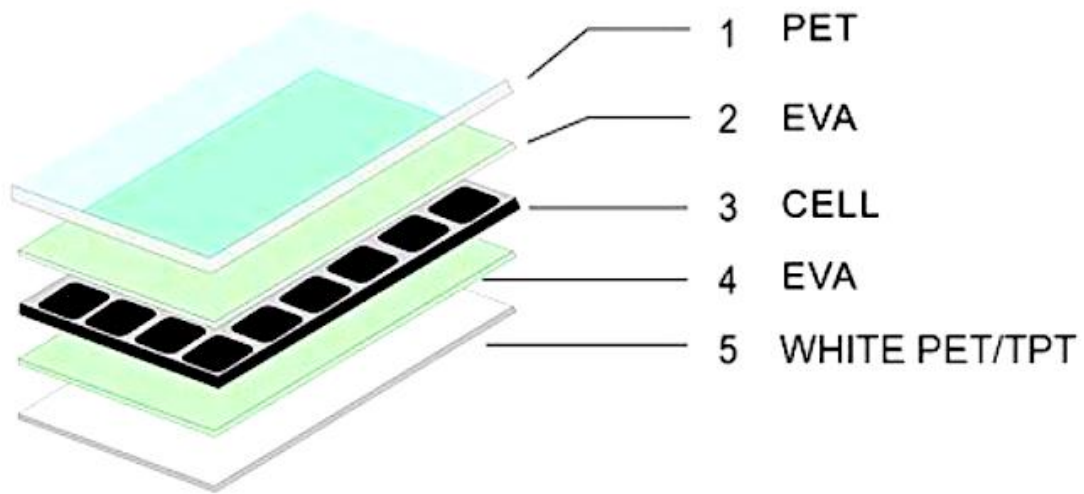


Рисунок 1.8 – Будова напівгнучкої сонячної панелі [12]

Згідно з наданим рисунком, конструкція напівгнучкої сонячної панелі складається з кількох функціональних шарів. Верхній шар (позиція 1) виконаний з прозорого поліетилентерефталату (PET) або фторполімерного матеріалу ETFE. Цей шар виконує захисну функцію, забезпечуючи механічну стійкість до подряпин, впливу ультрафіолетового випромінювання, вологи та атмосферних чинників. ETFE-покриття, порівняно з PET, характеризується підвищеною прозорістю, кращою стійкістю до ультрафіолету та довшим терміном експлуатації, що робить його доцільним для використання у зовнішніх умовах і мобільних енергетичних системах.

Другим шаром (позиція 2) є EVA-плівка (етиленвінілацетат), яка виконує роль інкапсулянту. Вона забезпечує герметичне закріплення сонячних елементів, рівномірний розподіл механічних напружень та захист від проникнення вологи і пилу. EVA-плівка також виконує амортизаційну функцію, що є особливо важливим для напівгнучких панелей, які зазнають деформацій під час монтажу або експлуатації.

Центральним елементом конструкції (позиція 3) є сонячні елементи, які безпосередньо здійснюють перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. У напівгнучких панелях можуть застосовуватися як монокристалічні, так і полікристалічні кремнієві елементи, зазвичай зменшеної товщини для підвищення гнучкості. Тонкі кремнієві осередки дозволяють панелі витримувати згинання без утворення критичних мікротріщин, які могли б призвести до деградації електричних характеристик.

Під сонячними елементами розміщується ще один шар EVA-плівки (позиція 4), який разом із верхнім інкапсуляційним шаром формує герметичний ламінований пакет. Цей шар додатково ізолює електричні з'єднання, знижує ризик механічного пошкодження елементів з тильного боку та підвищує загальну структурну цілісність панелі.

Нижній шар (позиція 5) виконується з білого PET або багат шарової плівки типу TPT (Tedlar–PET–Tedlar) і слугує задньою захисною оболонкою. Він забезпечує електричну ізоляцію, захист від вологи та кисню, а також частково виконує відбивну функцію, сприяючи зменшенню теплового навантаження на сонячні елементи. Відсутність жорсткого скла і металевої рами значно зменшує масу напівгнучкої панелі, що є суттєвою перевагою для мобільних і транспортних застосувань.

Завдяки такій конструкції напівгнучкі сонячні панелі можуть згинатися, як правило, до 20–30°, без порушення працездатності, що дозволяє встановлювати їх на криволінійні поверхні дахів, фасадів, корпусів транспортних засобів, яхт, кемперів та портативних енергетичних систем. Водночас гнучкість панелі не означає її повної еластичності, тому під час монтажу необхідно дотримуватися допустимого радіуса згину, визначеного виробником.

Слід зазначити, що напівгнучкі сонячні панелі зазвичай мають дещо нижчий коефіцієнт корисної дії та менший ресурс порівняно з класичними жорсткими модулями, що зумовлено відсутністю скляного захисту та більшою чутливістю до теплових і механічних навантажень. Проте їхні конструктивні переваги — мала

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

маса, універсальність монтажу та можливість використання на складних поверхнях - роблять такі панелі перспективними для автономних, мобільних та спеціалізованих енергетичних систем.

Таким чином, напівгнучкі сонячні панелі являють собою конструктивно оптимізовані фотоелектричні модулі з багатошаровою ламінованою структурою, у якій кожен шар виконує визначену захисну, механічну або електричну функцію. Їх застосування розширює можливості інтеграції сонячної енергетики у нові сфери та формує додаткові вимоги до систем кріплення і керування положенням панелей, що є важливим у контексті розробки електроприводів для сонячних установок.

### 1.5 Методи підвищення ефективності роботи сонячних батарей

Ефективність роботи сонячних батарей визначається кількістю електричної енергії, яку фотоелектрична система здатна виробити за одиницю часу з певної площі активної поверхні. Оскільки коефіцієнт корисної дії сонячних елементів обмежений фізичними властивостями напівпровідникових матеріалів і спектральним складом сонячного випромінювання, підвищення загальної ефективності сонячних батарей досягається шляхом застосування комплексу конструктивних, технологічних, електричних і експлуатаційних методів [17, 18]. Зазначені методи можуть реалізовуватися як на етапі виготовлення сонячних елементів і панелей, так і під час їх монтажу та експлуатації.

Одним із основних напрямів підвищення ефективності сонячних батарей є вдосконалення матеріалів і технологій виготовлення фотоелектричних елементів. Використання високоякісного кремнію з мінімальною кількістю дефектів кристалічної ґратки дозволяє зменшити втрати носіїв заряду на рекомбінацію та підвищити вихідну напругу і струм. Застосування багатошарових або гетероструктурних елементів дає змогу ефективніше використовувати ширший спектр сонячного випромінювання, що сприяє зростанню коефіцієнта корисної дії.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Важливу роль відіграють оптичні методи підвищення ефективності, спрямовані на зменшення втрат світлового потоку. До них належить застосування антивідбивних покриттів на поверхні сонячних елементів і захисного скла панелей. Такі покриття зменшують коефіцієнт відбиття сонячного світла та збільшують частку випромінювання, що проникає в фотоактивний шар. Додатково використовуються текстуровані поверхні кремнію, які сприяють багаторазовому внутрішньому відбиттю світла і підвищують ймовірність його поглинання.

Суттєвим чинником, що впливає на ефективність роботи сонячних батарей, є температурний режим. Зі зростанням температури сонячних елементів зменшується напруга холостого ходу і, відповідно, знижується вихідна потужність. Для зменшення негативного впливу температури застосовуються пасивні та активні методи охолодження. Пасивні методи включають використання вентиляційних зазорів, теплопровідних підкладок і світловідбивних матеріалів, тоді як активні методи передбачають застосування примусового повітряного або рідинного охолодження. У деяких випадках використовуються комбіновані фотоелектрично-теплові системи, у яких надлишкове тепло відводиться і може бути використане для побутових або технологічних потреб.

Важливим напрямом підвищення ефективності є оптимізація електричних режимів роботи сонячних батарей. Оскільки вольт-амперна характеристика сонячного модуля змінюється залежно від рівня освітленості та температури, максимальна потужність досягається лише в певній робочій точці. Для забезпечення роботи батареї в цій точці застосовуються системи відстеження точки максимальної потужності (MPPT), які автоматично регулюють параметри навантаження або перетворювача. Використання MPPT-контролерів дозволяє підвищити корисний вихід електроенергії на 10–30 % порівняно з простими схемами підключення.

Значний вплив на ефективність роботи сонячних батарей має правильний вибір місця встановлення та орієнтації панелей. Для фіксованих систем важливим є оптимальний кут нахилу відносно горизонту та правильна орієнтація за азиму-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

том, що дозволяє максимізувати середньорічний рівень поглинання сонячного випромінювання. У цьому випадку кут нахилу зазвичай обирається залежно від географічної широти місцевості та сезонних умов експлуатації.

Найбільш ефективним методом підвищення енерговіддачі сонячних батарей є застосування систем активного стеження за Сонцем.

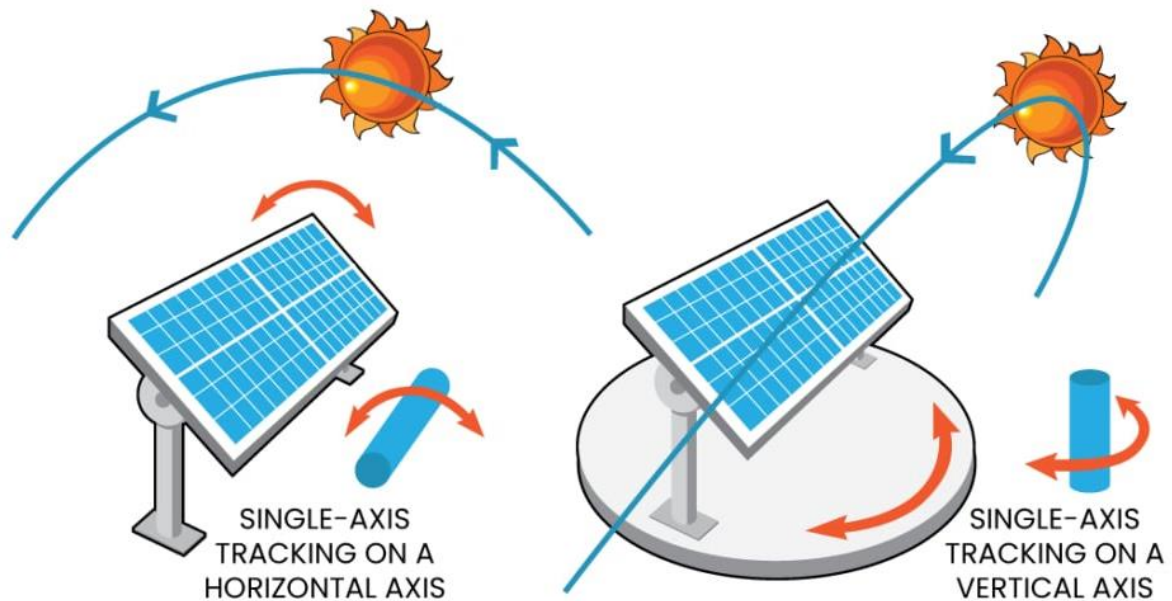


Рисунок 1.9 – Сонячна трекерна система [19]

Такі системи забезпечують автоматичну зміну положення сонячних панелей у просторі відповідно до добового та сезонного руху Сонця. Використовуються одноосьові та двоосьові трекери, які дозволяють підтримувати близький до оптимального кут падіння сонячних променів протягом усього світлового дня. Застосування систем стеження може збільшити річний виробіток електроенергії на 20–40 % залежно від кліматичних умов і типу трекера, що особливо актуально для промислових сонячних електростанцій. Конструкції трекерних систем наведено на кресленні [МРМА25.00.00.000ДО].

Окрему увагу приділяють зменшенню втрат, пов'язаних із частковим затіненням сонячних батарей. Навіть незначне затінення окремих елементів може

призвести до суттєвого зниження вихідної потужності всього модуля. Для мінімізації цього ефекту використовуються байпасні діоди, оптимізується схема з'єднання елементів і модулів, а також застосовуються мікроінвертори або оптимізатори потужності, які дозволяють незалежно керувати роботою окремих панелей або їх частин.

Не менш важливими є експлуатаційні методи підвищення ефективності, до яких належить регулярне очищення поверхні панелей від пилу, бруду, снігу та інших забруднень. Забруднення поверхні скла зменшує прозорість і призводить до зниження рівня поглинання сонячного випромінювання. Регламентне технічне обслуговування, контроль електричних з'єднань і своєчасне виявлення несправностей також сприяють підтриманню високого рівня ефективності фотоелектричної системи протягом усього терміну експлуатації.

Таким чином, підвищення ефективності роботи сонячних батарей досягається шляхом комплексного застосування матеріалознавчих, конструктивних, електричних та експлуатаційних методів. Особливе значення серед них мають оптимізація орієнтації панелей і використання систем активного стеження за Сонцем, які безпосередньо пов'язані з темою даної магістерської роботи та обґрунтовують доцільність розробки електроприводів для керування положенням сонячних панелей.

## 1.6 Висновки до першого розділу

першому розділі виконано огляд та аналіз сучасних технологічних і технічних рішень у сфері сонячної енергетики, зокрема будови, принципу дії та класифікації сонячних елементів і панелей. Розглянуто фізичну суть фотоелектричного ефекту, який є основою перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію, а також проаналізовано основні типи сонячних панелей — монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові, їх конструктивні особливості, переваги та обмеження.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Показано, що ефективність роботи сонячних батарей суттєво залежить від умов експлуатації, зокрема температури, рівня освітленості, забруднення поверхні та, особливо, кута падіння сонячних променів. Проаналізовані методи підвищення ефективності підтверджують, що одним із найбільш результативних шляхів збільшення виробітку електроенергії є оптимізація орієнтації сонячних панелей у просторі за допомогою систем стеження за Сонцем.

Встановлено, що застосування одноосьових і двоосьових систем позиціонування дозволяє суттєво підвищити енерговіддачу сонячних установок без збільшення площі панелей, однак водночас висуває підвищені вимоги до надійності, точності та енергоефективності електроприводів. Отримані в розділі результати обґрунтовують актуальність і доцільність подальших досліджень, спрямованих на розробку електроприводу для керування положенням сонячних панелей, що і є предметом даної магістерської роботи.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

### 2.1 Обґрунтування розробки електроприводу для керування сонячними панелями

Ефективність перетворення сонячної енергії в електричну суттєво залежить від умов опромінення фотоелектричної поверхні, насамперед від кута падіння сонячних променів. За відхилення панелі від оптимальної орієнтації зменшується проєкція сонячного потоку на активну площу, унаслідок чого знижується вихідна потужність і погіршується енергетичний баланс установки. Оскільки положення Сонця змінюється протягом доби та залежить від пори року, стаціонарно встановлена сонячна панель не здатна підтримувати максимально ефективний режим роботи впродовж усього світлового дня. Це зумовлює необхідність застосування керованих систем орієнтації, які забезпечують наближення площини панелі до оптимального положення відносно напрямку сонячного випромінювання.

Розробка електроприводу для керування сонячними панелями є доцільною з огляду на можливість підвищення виробітку електроенергії без збільшення площі або кількості фотомодулів. Такий підхід особливо актуальний для автономних і гібридних систем електропостачання, де обмежені монтажні площі, а вартість фотоелектричних модулів і акумулявальних засобів суттєво впливає на економічні показники. Керована орієнтація дозволяє ефективніше використовувати встановлену потужність панелей, зменшувати втрати генерації у ранкові та вечірні години, а також покращувати стабільність енергопостачання в умовах змінної інсоляції.

З технічної точки зору електропривод керування положенням панелі повинен забезпечувати повільні та точні кутові переміщення, високу повторюваність позиціонування і надійне утримання заданого положення під дією зовнішніх на-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вантажень. До основних збурювальних факторів належать вітрові впливи, інерційні моменти під час пуску та зупинки, а також похибки, пов'язані з люфтами й пружними деформаціями елементів механізму. Тому при створенні такого приводу важливо передбачити достатній запас крутного моменту, раціональний вибір передавальних механізмів і застосування зворотного зв'язку за положенням, який підвищує точність та забезпечує корекцію відхилень.

Особливістю роботи систем керування сонячними панелями є переважно переривчастий режим переміщень: протягом дня панель багаторазово змінює орієнтацію на невеликі кути, а між переміщеннями тривалий час перебуває у фіксованому положенні. Це зумовлює підвищені вимоги до енергоефективності та надійності електроприводу, оскільки небажаними є зайві втрати енергії під час утримання положення, перегрів виконавчого двигуна та прискорений знос механічних елементів. Відповідно, електропривод має забезпечувати мінімальне споживання у паузах, плавність руху під час позиціонування та достатню механічну жорсткість і стабільність конструкції.

Важливим аспектом обґрунтування розробки електроприводу є забезпечення функціональної сумісності з енергетичною частиною сонячної установки. Керування орієнтацією панелі впливає на рівень і стабільність генерованої потужності, а отже - на режими роботи накопичувальних пристроїв та споживачів. Підвищення генерації за рахунок оптимальної орієнтації дозволяє зменшити глибину розряду акумуляторів, підвищити ресурс системи енергозбереження та покращити якість електропостачання навантаження в умовах змінної інсоляції. Таким чином, електропривод керування положенням панелі слід розглядати як важливий елемент комплексної сонячної енергосистеми, що безпосередньо впливає на її техніко-економічні характеристики.

Отже, необхідність розробки електроприводу для керування сонячними панелями обумовлена потребою підвищення ефективності використання сонячного випромінювання шляхом оптимізації орієнтації фотомодулів, забезпечення

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

точного позиціонування та утримання положення в умовах зовнішніх збурень, реалізації енергоефективного переривчастого режиму роботи, а також підвищення надійності та стабільності функціонування сонячної енергетичної установки загалом.

## 2.2 Розробка базової структурної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю

Структурна схема дозволяє наочно представити принцип роботи електроприводу, узгодити функції окремих блоків і створює основу для подальшого проектування електричної, алгоритмічної та конструктивної частин системи [20, 21]. Крім того, вона є необхідною для формування вимог до елементів керування, вибору типу електродвигуна та розробки алгоритмів керування.

Відповідно до рис. 2.1, електропривод керування сонячною панеллю за однією віссю складається з таких основних функціональних блоків: блоку живлення, блоку управління, контролера, датчиків положення, електродвигуна, механізму керування та сонячної панелі як об'єкта керування. Кожен із зазначених елементів виконує визначену функцію та бере участь у формуванні замкненої системи автоматичного керування.

Блок живлення призначений для забезпечення електричною енергією всіх елементів системи електроприводу, зокрема контролера, блоку управління, датчиків положення та електродвигуна. Як джерело живлення може використовуватися як зовнішня електрична мережа, так і автономна система на основі акумуляторної батареї, зарядженої від сонячних панелей. До основних вимог до блоку живлення належать стабільність вихідних напруг, наявність захисту від перевантажень і коротких замикань, а також мінімальні втрати енергії, що є особливо важливим для автономних сонячних установок.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Блок управління виконує функцію формування загальних керувальних команд для електроприводу. Він забезпечує вмикання та вимикання системи, задання режимів роботи, а також обробку зовнішніх сигналів, зокрема команд на початок або завершення переміщення сонячної панелі. У блоці управління можуть реалізовуватися логічні функції, пов'язані з вибором алгоритму стеження за Сонцем, часовими інтервалами відпрацювання переміщень, а також функції захисту системи від аварійних і нештатних режимів роботи.

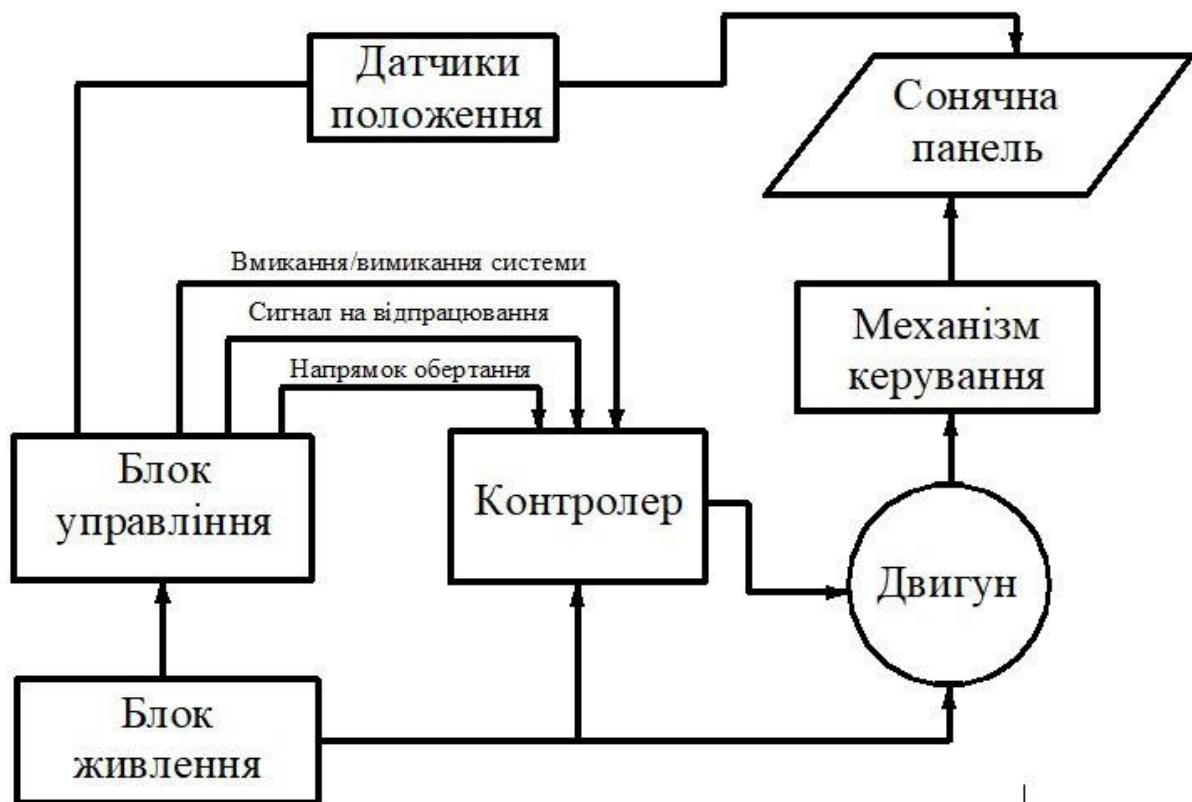


Рисунок 2.1 - Структурна схема електроприводу для керування сонячною панеллю

Центральним елементом структурної схеми є контролер, який здійснює безпосереднє керування роботою електродвигуна. Контролер приймає сигнали від блоку управління, а також інформацію від датчиків положення, після чого формує керувальні сигнали для двигуна. Залежно від реалізованого алгоритму керування

контролер визначає напрямок обертання, тривалість роботи або кількість керувальних імпульсів, забезпечуючи необхідне кутове переміщення сонячної панелі навколо заданої осі. У разі використання крокового електродвигуна контролер додатково виконує функцію генерації послідовності імпульсів, що відповідають заданому режиму роботи приводу.

Датчики положення забезпечують зворотний зв'язок у системі керування та передають інформацію про фактичне положення сонячної панелі або окремих ланок механізму керування. Сигнали від датчиків надходять до контролера або блоку управління, що дозволяє здійснювати корекцію руху, запобігати виходу панелі за допустимі межі та підвищувати точність позиціонування. У системах керування сонячними панелями як датчики положення можуть застосовуватися кінцеві вимикачі, інкрементні або абсолютні енкодери, а також інші датчики кутового переміщення.

Електродвигун є виконавчим елементом електроприводу та перетворює електричну енергію в механічний обертальний рух. У розроблюваній одновісній системі двигун отримує керувальні сигнали від контролера і забезпечує обертання вихідного вала з необхідною швидкістю та крутним моментом. З урахуванням специфіки задачі керування сонячною панеллю електродвигун працює в переривчастому режимі з малими швидкостями та тривалими паузами між переміщеннями, що зумовлює підвищені вимоги до його надійності, енергоефективності та здатності утримувати положення без додаткових гальмівних пристроїв.

Механізм керування виконує функцію передавання та перетворення обертального руху вала електродвигуна у кутове переміщення сонячної панелі навколо однієї осі. До складу механізму входять редуктори, зубчасті, черв'ячні або рейкові передачі, які забезпечують необхідне передаточне число, підвищення крутного моменту та, за потреби, ефект самогальмування системи. Завдяки механізму керування досягається плавне та точне позиціонування сонячної панелі відносно Сонця.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Сонячна панель у структурній схемі розглядається як об'єкт керування, положення якого змінюється під дією електроприводу. Її маса, габаритні розміри та аеродинамічні навантаження безпосередньо впливають на вибір параметрів електродвигуна, механічної передачі та алгоритмів керування.

Таким чином, розроблена структурна схема електроприводу для керування сонячною панеллю за однією віссю є замкненою системою автоматичного керування, у якій реалізовано взаємодію між блоком живлення, блоком управління, контролером, датчиками положення, виконавчим електродвигуном і механічною частиною. Запропонована структура є базовою та може бути використана для подальшого розширення системи до двовісного керування шляхом додавання другого аналогічного каналу електроприводу.

### 2.3 Розробка структурної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю за двома осями

Структурна схема електроприводу для керування сонячною панеллю за двома осями є логічним розвитком одновісної системи, розглянутої в пункті 2.2, і призначена для забезпечення просторової орієнтації панелі як за азимутом, так і за кутом нахилу [20]. Така система дозволяє максимально точно відстежувати добовий і сезонний рух Сонця, підтримуючи оптимальний кут падіння сонячних променів на поверхню панелі та, відповідно, підвищуючи ефективність вироблення електричної енергії.

Розроблювана структурна схема, наведена на рис. 2.2, реалізує двокоординатну систему автоматичного керування, у якій кожна вісь повороту сонячної панелі має власний канал електроприводу. При цьому загальні принципи побудови системи, склад функціональних блоків і логіка керування зберігаються аналогічними до одновісного варіанта, що забезпечує уніфікацію та спрощує подальше проектування.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

До складу двовісного електроприводу входять блок живлення, блок управління, два контролери керування приводами, датчики положення, два електродвигуни ( $D_1$  і  $D_2$ ), відповідні механізми керування, а також сонячна панель як об'єкт керування. Усі елементи взаємодіють між собою в межах замкненої системи автоматичного керування з використанням зворотних зв'язків за положенням.

Блок живлення забезпечує електричною енергією всі компоненти системи, зокрема блок управління, обидва контролери, датчики положення та електродвигуни. Як і в одновісній системі, джерелом живлення може бути зовнішня електрична мережа або автономна акумуляторна система, заряджена від сонячних панелей. Умови автономної роботи зумовлюють підвищені вимоги до стабільності напруги та енергоефективності живлення.

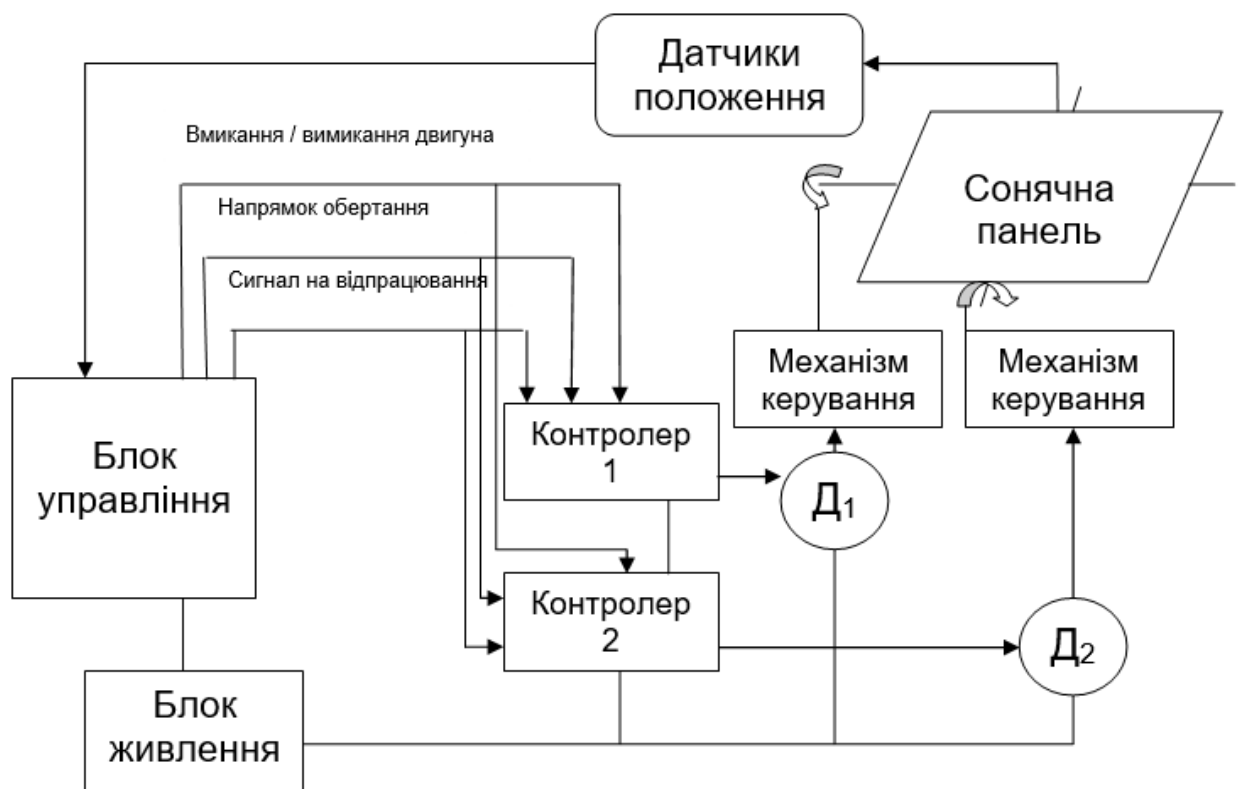


Рисунок 2.2 - Структурна схема електроприводу для керування сонячною панеллю за двома осями

Блок управління виконує координуючу функцію в системі та формує загальні керувальні сигнали для обох каналів електроприводу. Він забезпечує вмикання та вимикання системи, задання режимів роботи, формування команд на відпрацювання переміщень, а також визначення напрямків обертання двигунів. У блоці управління реалізується логіка взаємодії між двома осями, що дозволяє здійснювати як незалежне керування кожною віссю, так і їх узгоджену роботу відповідно до заданого алгоритму стеження за Сонцем.

Контролер 1 і контролер 2 призначені для безпосереднього керування електродвигунами  $D_1$  і  $D_2$ , які відповідають за поворот сонячної панелі навколо першої та другої осей відповідно. Кожен контролер приймає сигнали від блоку управління та інформацію від датчиків положення, після чого формує керувальні сигнали для відповідного електродвигуна. Такий підхід дозволяє реалізувати незалежні контури керування для кожної осі, підвищити точність позиціонування та спростити алгоритмічну реалізацію системи.

Датчики положення забезпечують зворотний зв'язок у двовісній системі керування та передають інформацію про фактичне положення сонячної панелі за кожною координатою. Сигнали від датчиків надходять до контролерів або блоку управління, що дозволяє здійснювати корекцію руху, синхронізацію роботи приводів, обмеження кутів повороту та захист механічної частини від перевантажень і виходу за допустимі межі.

Електродвигуни  $D_1$  і  $D_2$  є виконавчими елементами електроприводу та перетворюють електричну енергію в механічний рух, який через відповідні механізми керування передається на сонячну панель. Кожен двигун працює у переривчастому режимі з малими швидкостями та тривалими паузами між переміщеннями, що є характерним для систем стеження за Сонцем. Незалежність роботи двигунів дозволяє виконувати корекцію положення панелі лише за тією віссю, за якою виникає відхилення.

Механізми керування забезпечують передавання та перетворення обертального руху валів електродвигунів у кутове переміщення сонячної панелі навколо

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

відповідних осей. До складу механізмів можуть входити редуктори, черв'ячні, зубчасті або рейкові передачі, які забезпечують необхідне передаточне число, підвищення крутного моменту та самогальмування системи. Наявність двох окремих механізмів керування дозволяє реалізувати просторову орієнтацію панелі з високою точністю та стабільністю.

Сонячна панель у двовісній структурній схемі виступає як об'єкт керування, положення якого змінюється у двох взаємно перпендикулярних площинах. Її маса, габаритні розміри та аеродинамічні навантаження визначають вимоги до параметрів електродвигунів, механічних передач і алгоритмів керування, а також впливають на енергоефективність і надійність усієї системи.

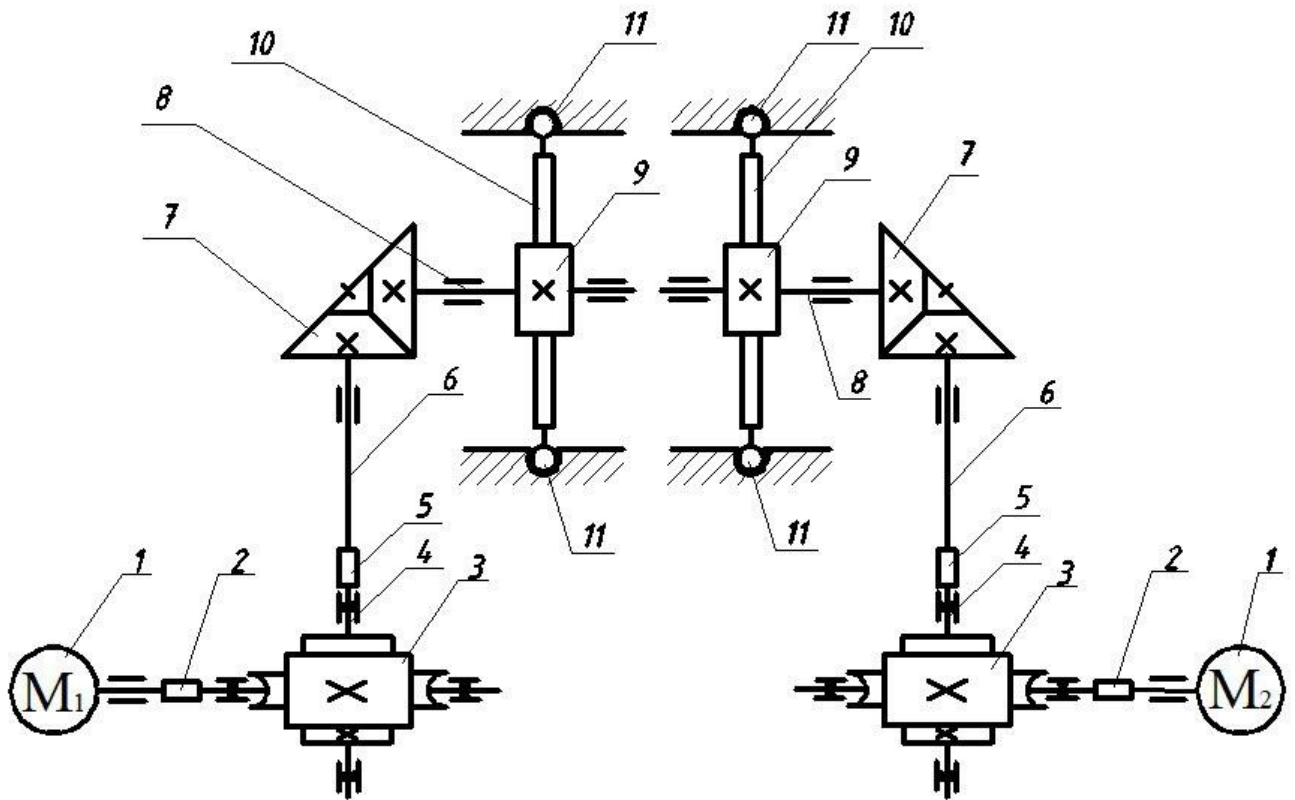
Таким чином, розроблена структурна схема електроприводу для керування сонячною панеллю за двома осями є замкненою багатоканальною системою автоматичного керування, у якій реалізовано незалежні, але узгоджені контури керування для кожної осі повороту. Запропонована структура забезпечує високу точність позиціонування, надійність роботи та можливість подальшого вдосконалення алгоритмів керування, що є необхідною передумовою для реалізації ефективних систем стеження за Сонцем.

#### 2.4 Розробка кінематичної схеми електроприводу для керування сонячною панеллю

Кінематична схема електроприводу визначає послідовність та характер передавання механічного руху від електродвигуна до сонячної панелі, а також взаємозв'язок між окремими ланками механічної системи. Її розробка є необхідною для забезпечення заданих кутових переміщень панелі, узгодження швидкостей і моментів на валах, а також для подальшого виконання кінематичних і силових розрахунків електроприводу.

Відповідно до схеми (рис.2.3), електропривод керування сонячною панеллю реалізований за двокоординатною кінематичною структурою, що дозволяє

здійснювати поворот панелі у двох взаємно перпендикулярних площинах. Така схема забезпечує орієнтацію сонячної панелі як за азимутом, так і за кутом нахилу, що дає змогу підтримувати оптимальний кут падіння сонячних променів протягом усього світлового дня.



1-електродвигун; 2-муфта; 3-червячний редуктор; 4-вал; 5-муфта; 6-вал; 7-конічна передача; 8-апд; 9-червячне колесо; 10-зубчаста рейка; 11-шарова опора

Рисунок 2.3 – Кінематична схема електроприводу для керування сонячною панеллю

Сонячна панель закріплюється на шаровій опорі, розташованій у її геометричному центрі. Застосування шарової опори забезпечує можливість вільного кутового повороту панелі в будь-якому напрямку, зменшує згинальні навантаження в конструкції та сприяє рівномірному розподілу сил, що виникають під дією вла-

сної ваги панелі та зовнішніх факторів, зокрема вітрових навантажень. Таке конструктивне рішення підвищує надійність механічної системи та знижує вимоги до жорсткості окремих елементів приводу.

Кінематична схема включає два незалежні електроприводи, кожен з яких відповідає за переміщення панелі за відповідною координатою. У нижній частині схеми розташовані електродвигуни  $M_1$  і  $M_2$ , які є первинними джерелами механічної енергії. Обертальний рух від кожного двигуна передається через муфту на вхідний вал редуктора. Муфти виконують функцію компенсації можливих перекосів валів і зменшення динамічних навантажень, що виникають під час пуску та зупинки двигунів.

Редуктори, встановлені після електродвигунів, забезпечують значне зниження частоти обертання та відповідне збільшення крутного моменту, необхідного для повороту сонячної панелі. У кінематичній схемі передбачено використання редукторів із високим передаточним числом, що дозволяє реалізувати повільний, плавний і точний рух панелі, а також забезпечує ефект самогальмування, який запобігає самовільному зміненню положення панелі під дією зовнішніх навантажень.

Вихідний рух редукторів передається через вертикальні вали та проміжні з'єднання до конічних зубчастих передач. Конічні передачі змінюють напрямок обертального руху на  $90^\circ$ , що є необхідним для компоновки приводу та узгодження напрямків дії сил у механізмі керування. Використання конічних передач дозволяє компактно розмістити елементи приводу та зменшити габаритні розміри всієї конструкції.

Далі обертальний рух передається на механізм керування, який безпосередньо взаємодіє з сонячною панеллю. Через систему валів і опорних вузлів з підшипниками рух перетворюється у кутове переміщення панелі навколо шарової опори. Підшипникові опори забезпечують зниження втрат на тертя, стабільність руху та довговічність кінематичної схеми.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Кожна кінематична гілка приводу працює незалежно, що дозволяє здійснювати як окреме керування за кожною координатою, так і їхню узгоджену роботу відповідно до заданого алгоритму стеження за Сонцем. Такий підхід спрощує систему керування та підвищує точність позиціонування, оскільки корекція положення панелі може здійснюватися лише за тією координатою, за якою виникає відхилення.

Запропонована кінематична схема забезпечує реалізацію малих кутових переміщень сонячної панелі з високою точністю, що є необхідним для ефективного стеження за Сонцем. Наявність багатоступеневих механічних передач дозволяє використовувати електродвигуни з відносно невеликим номінальним моментом, водночас забезпечуючи достатній крутний момент на виконавчому органі. Крім того, схема є придатною для роботи в переривчастому режимі з тривалими інтервалами між переміщеннями, що характерно для систем керування сонячними панелями.

Таким чином, розроблена кінематична схема електроприводу, заснована на використанні двох незалежних приводів, шарової опори в центрі сонячної панелі та багатоступеневої системи передач, забезпечує необхідну функціональність, точність і надійність роботи. Вона створює основу для подальших кінематичних і силових розрахунків, а також для обґрунтування вибору елементів електроприводу в наступних підрозділах магістерської роботи.

## 2.5 Розробка схеми підключення сонячної панелі

Для забезпечення максимальної ефективності роботи сонячної енергетичної системи сонячна панель повинна працювати у складі керованої електромеханічної та електричної системи [22, 23]. Керування просторовим положенням сонячної панелі здійснюється за допомогою спеціалізованого блоку керування, який

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

реалізує алгоритм стеження за Сонцем і забезпечує оптимальний кут падіння сонячних променів на фотоелектричну поверхню. Такий підхід дозволяє підвищити виробіток електричної енергії без збільшення площі сонячних модулів.

З електричної точки зору сонячна панель є джерелом постійної напруги, величина якої залежить від рівня сонячного випромінювання та температури фотоелектричних елементів. Для накопичення виробленої електричної енергії панель підключається до акумуляторної батареї, яка виконує функцію енергетичного буфера. Акумулятор забезпечує стабільне живлення споживачів у періоди недостатньої сонячної активності, а також компенсує нерівномірність вироблення електроенергії протягом доби.

Оскільки більшість побутових та промислових електроприладів розраховані на живлення від мережі змінного струму з напругою 220 В і частотою 50 Гц, у схемі передбачено використання інвертора напруги. Інвертор перетворює постійну напругу акумуляторної батареї у змінну напругу стандартних параметрів, придатну для живлення електричних споживачів. Крім того, сучасні інвертори забезпечують стабілізацію напруги, захист від перевантажень і коротких замикань, а також контроль якості вихідної електроенергії.

Для забезпечення безперервного електропостачання споживачів у випадках, коли енергії, накопиченої в акумуляторній батареї, недостатньо, схема передбачає можливість підключення до зовнішньої електричної мережі. Це підключення реалізується через автоматичний блок управління (АБУ), основною функцією якого є автоматичне перемикання режимів живлення. У разі зниження рівня заряду акумуляторів нижче допустимого значення АБУ здійснює перехід на живлення від мережі змінного струму, забезпечуючи безперебійну роботу підключених електроприладів.

У протилежному режимі, коли сонячна панель виробляє більше електричної енергії, ніж споживається навантаженням і може бути накопичено в акумуляторах, АБУ забезпечує передачу надлишкової електроенергії в зовнішню електромережу. Такий режим роботи характерний для гібридних або мережевих сонячних

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

енергетичних систем і дозволяє підвищити загальну енергоефективність установки та скоротити втрати невикористаної енергії.

Для обліку електричної енергії, що споживається з мережі та повертається до неї, у схемі передбачено встановлення електролічильника на виході автоматичного блоку управління. Лічильник повинен бути здатним вести облік електроенергії у чотирьох квадрантах, оскільки система працює як у режимі споживання електроенергії з мережі, так і у режимі генерації та віддачі електроенергії в мережу. Це забезпечує коректний енергетичний облік і можливість реалізації режимів взаєморозрахунків із постачальником електроенергії.

Схема підключення також передбачає використання силового трансформатора, який забезпечує узгодження рівнів напруги між елементами системи або мережею за потреби, а також підвищує електробезпеку експлуатації. Усі елементи системи - сонячна панель, акумуляторна батарея, інвертор, автоматичний блок управління, трансформатор і споживачі - з'єднані у єдину функціональну схему, що забезпечує гнучку та надійну роботу системи електропостачання.

Загальна схема підключення керованої сонячної панелі до системи енергопостачання наведена на рисунку 2.4. Запропоноване схемне рішення забезпечує ефективне використання сонячної енергії, безперервне живлення споживачів, можливість акумуляування та повернення надлишкової електроенергії в мережу, а також створює необхідні умови для інтеграції електроприводу керування положенням сонячної панелі в загальну енергетичну систему.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

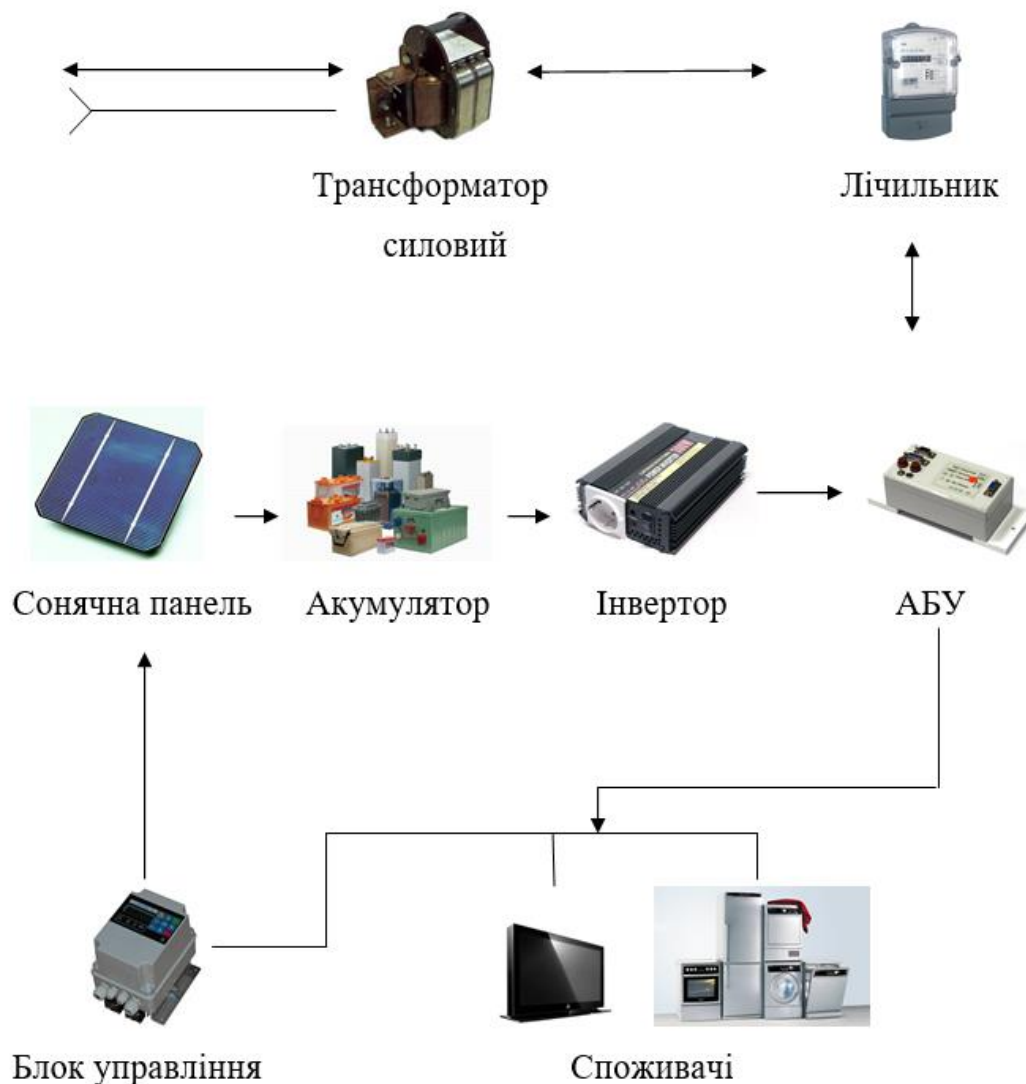


Рисунок 2.4 - Схема підключення сонячної батареї

## 2.6 Розробка алгоритму роботи системи керування сонячною панеллю

Під час проєктування систем керування на основі програмованих контролерів ключовим етапом є коректний вибір і формалізація алгоритму роботи, за яким функціонуватиме пристрій. Алгоритм повинен забезпечувати узгоджену взаємодію електричної, електронної та механічної частин системи, а також гарантувати надійне й точне позиціонування сонячної панелі протягом усього циклу роботи. Запропонований алгоритм керування положенням сонячної панелі подано у вигляді структурної схеми на рисунку 2.5.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Робота системи керування розпочинається з ініціалізації, яка передбачає приведення сонячної панелі у початкове (нульове) положення. Це положення є базовим і використовується як відлікова точка для подальшого позиціонування. Після завершення процедури ініціалізації контролер переходить до етапу перевірки поточних значень дати та часу, отриманих від вбудованого таймера або зовнішнього модуля реального часу.

На основі визначених дати та часу здійснюється вибір відповідного програмно заданого графіка руху сонячної панелі. Графік являє собою набір контрольних точок, що визначають кутове положення панелі впродовж світлового дня. Для кожного календарного дня графік є індивідуальним і формується з урахуванням пори року, тривалості світлового дня, а також часу сходу й заходу Сонця. У межах обраного алгоритму передбачається, що панель повертається дискретно, наприклад з інтервалом 20 хвилин, при цьому кожен крок відповідає зміні кута орієнтації на  $5^\circ$ . Необхідна кількість імпульсів керування для такого повороту визначається заздалегідь у процесі розрахунку системи керування.

Після вибору графіка контролер очікує моменту часу, що відповідає першій контрольній точці. Коли поточний час співпадає з часом відпрацювання заданої точки, контролер формує керувальний сигнал і передає його до блоку керування двигунами. У результаті відповідний привід здійснює поворот сонячної панелі до запланованого положення. Подальша робота системи впродовж дня відбувається аналогічно: у визначені моменти часу контролер послідовно відпрацьовує всі контрольні точки згідно з обраним графіком.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



рухомо, а інша - на рухомих елементах механізму та переміщується разом із панеллю. За умови правильної роботи системи замикання відповідних контактів відбувається у строго визначений час, що підтверджує досягнення панеллю необхідного положення.

У разі виявлення невідповідності між фактичним і запланованим положенням система переходить у режим корекції. Логіка корегування базується на аналізі вже пройдених контрольних точок. Якщо на момент перевірки контакт, що відповідає поточній точці, ще не замикався, панель додатково повертається у напрямку руху Сонця. Якщо ж контакт вже був замкнений раніше, але у поточний момент відсутній, виконується корекційний поворот у протилежному напрямку. Таким чином забезпечується компенсація можливих похибок, спричинених люфтами в механізмі, зовнішніми навантаженнями або похибками приводу.

Якщо в результаті перевірки встановлено, що фактичне положення панелі відповідає заданому графіку, корекція не виконується, і система переходить до очікування наступної контрольної точки. Такий підхід дозволяє підтримувати високу точність орієнтації панелі без безперервного руху приводу, що сприяє зменшенню енергоспоживання та зносу механічних елементів.

Після відпрацювання останньої контрольної точки денного графіка контролер формує сигнал завершення активного циклу роботи. Далі здійснюється аналіз графіка положень для наступного дня, і залежно від часу відпрацювання першої точки нового циклу контролер встановлює таймер автоматичного увімкнення системи. Як правило, момент увімкнення задається на декілька хвилин раніше (наприклад, на 5 хвилин) від часу першої контрольної точки, після чого система переходить у режим очікування і вимикається.

Контролер управління, таким чином, виконує комплекс функцій: вибір і реалізацію добового графіка руху панелі, керування роботою приводів, перевірку та корекцію положення, а також загальне вмикання і вимикання системи. Приведення сонячної панелі в рух здійснюється за допомогою двох електродвигунів, один з яких відповідає за керування положенням панелі за координатою нахилу, а

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

другий - за поворот по азимуту. Обидва двигуни керуються блоком керування двигунами відповідно до сигналів, сформованих контролером.

Запропонований алгоритм забезпечує надійну, адаптивну та енергоефективну роботу системи керування сонячною панеллю, а також створює передумови для подальшої реалізації більш складних алгоритмів стеження за Сонцем у двох координатах.

## 2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано розробку електроприводу для керування положенням сонячної панелі з урахуванням специфіки її експлуатації та вимог до енергоефективності й точності позиціонування. Обґрунтовано доцільність застосування керованого електроприводу як ефективного засобу підвищення виробітку електроенергії за рахунок оптимальної орієнтації панелі відносно Сонця.

Розроблено базову структурну схему електроприводу для керування сонячною панеллю за однією віссю, визначено функціональне призначення основних блоків та принцип їх взаємодії у замкненій системі автоматичного керування. На основі одновісної структури сформовано структурну схему двовісного електроприводу, що забезпечує просторову орієнтацію панелі за азимутом і кутом нахилу та створює умови для більш точного стеження за рухом Сонця.

Запропоновано кінематичну схему електроприводу з використанням багатоступеневих механічних передач і шарової опори, яка забезпечує необхідне передаточне число, підвищення крутного моменту та можливість плавних і малих кутових переміщень панелі. Розроблено схему підключення сонячної панелі до системи енергопостачання з урахуванням акумуляування енергії, перетворення напруги та взаємодії з електричною мережею.

Також сформовано алгоритм роботи системи керування, який забезпечує дискретне позиціонування сонячної панелі за заданим добовим графіком, конт-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

роль фактичного положення та корекцію відхилень. Запропоновані структурні, кінематичні та алгоритмічні рішення створюють цілісну основу для подальшого виконання розрахунків, що підтверджують працездатність і надійність розроблюваного електроприводу.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

### 3.1 Загальні відомості

Для забезпечення керованого переміщення сонячної панелі в розроблюваному електроприводі передбачається використання комбінованої механічної передачі, що включає черв'ячний редуктор, конічну косозубу зубчасту передачу та зубчасто-рейкову прямозубу передачу, які в сукупності забезпечують необхідне передавальне відношення, підвищення крутного моменту та надійну передачу руху до виконавчого органу панелі.

Вихідними даними для проведення розрахунків електроприводу є навантаження механічної системи, яке становить 30 кг·см, а також переривчастий режим навантаження електродвигуна, що зумовлює необхідність урахування пускових режимів, циклічності роботи та теплової стійкості приводу під час подальших інженерних розрахунків.

Характеристики двигуна наведено в табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Характеристики двигуна

Найменування	Значення
Кутовий крок	1,8°
Похибка кутового кроку	±5% (повний крок, без навантаження)
Похибка опору	±10%
Похибка індуктивності	±20%
Підвищення температури	80°С Max (робочий струм, 2 фази)
Робоча температура	-20°С ~ +50°С
Радіальне биття вала	0,02 Max
Осьове биття вала	0,08 Max

Обертний момент на валу –  $34 \text{ кг}\cdot\text{см} = 3335,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Розміри сонячної панелі:  $1580 \text{ мм} \times 798 \text{ мм} \times 35 \text{ мм}$ .

Вага сонячного модуля  $15 \text{ кг}$ .

Матеріал рами: анодований алюміній.

Потрібно змінювати кут на  $5^\circ$  за  $20 \text{ хв}$ , тобто на  $0,25^\circ$  за хвилину.

Потрібна вихідна частота обертання  $0,00069 \text{ об/хв}$ .

### 3.2 Кінематичний розрахунок приводу

Кінематичний розрахунок приводу починаємо з визначення загального коефіцієнта корисної дії, який враховує втрати енергії в елементах передачі руху.

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (3.1)$$

де  $\eta_m = 0,99$  – ККД муфти;

$\eta_{пп} = 0,995$  – ККД однієї пари підшипників;

$\eta_{чп} = 0,92$  – ККД черв'ячної передачі;

$\eta_{прп} = 0,98$  – ККД прямозубої рейкової передачі;

$\eta_{кп} = 0,96$  – ККД конічної передачі.

Тоді:

$$\eta = \eta_m^2 \cdot \eta_{пп}^4 \cdot \eta_{прп} \cdot \eta_{кп} \cdot \eta_{чп} = 0,99^2 \cdot 0,995^4 \cdot 0,98 \cdot 0,96 \cdot 0,92 = 0,835 \quad (3.2)$$

Потужність на вихідному валу приводу визначається:

$$N_{\text{вих}} = N_{\text{дв}} \cdot \eta = 11 \cdot 0,835 = 9,185 \text{ Вт}. \quad (3.3)$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.1 подано габаритні розміри крокового двигуна FL86STH65-2808A, після чого визначається загальне передаточне число приводу [24].

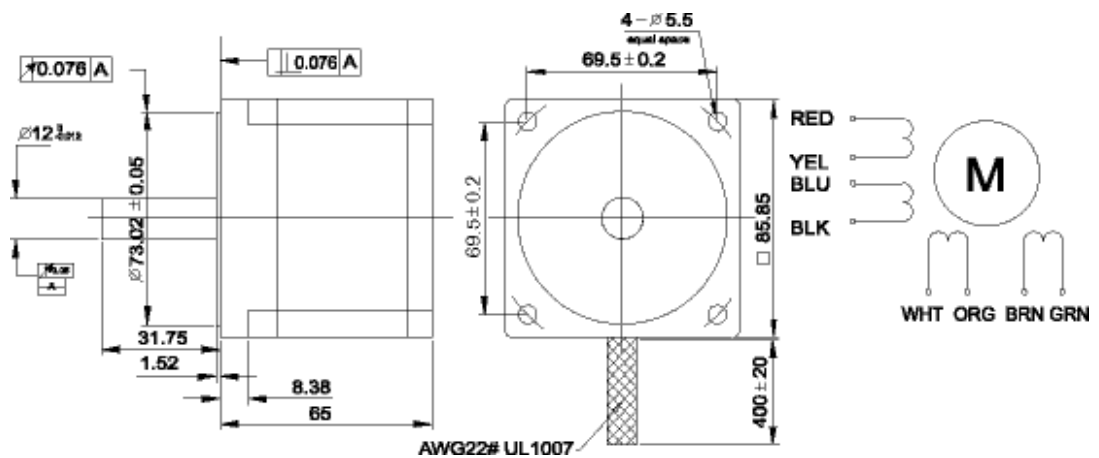


Рисунок 3.1 - Габаритні розміри крокового двигуна  
FL86STH65-2808A

Загальне передаточне число приводу:

$$n = n_{\text{дв}} / n_{\text{вих}} = 0,5 / 0,00069 = 724,6. \quad (3.4)$$

Загальне передаточне число розподіляємо між ступеннями приводу, приймаючи:

- для черв'ячної передачі  $u_1 = 15$ ,
- $u_2 = 3,15$  для конічної передачі,
- для зубчасто-рейкової передачі  $u_3 = 15,34$ .

Далі визначаємо потужність на кожному валу.

$$N_1 = N_{\text{дв}} = 0,011 \text{ кВт},$$

$$N_2 = N_1 \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{пш}} \cdot \eta_{\text{чп}} = 11 \cdot 0,99 \cdot 0,995 \cdot 0,92 = 0,009969 \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$N_3 = N_2 \cdot \eta_{\text{шп}} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{кп}} = 9,969 \cdot 0,995 \cdot 0,99 \cdot 0,96 = 0,009427 \text{ кВт}, \quad (3.6)$$

$$N_4 = N_3 \cdot \eta_{\text{шп}} \cdot \eta_{\text{рп}} = 9,427 \cdot 0,995 \cdot 0,98 = 0,009192 \text{ кВт}. \quad (3.7)$$

Число обертів на кожному валу визначається:

$$n_1 = n_{\text{дв}} = 0,5 \text{ об / хв},$$

$$n_2 = n_1 / u_1 = 0,5 / 15 = 0,03333 \text{ об / хв}, \quad (3.8)$$

$$n_3 = n_2 / u_2 = 0,033 / 3,15 = 0,01059 \text{ об / хв}, \quad (3.9)$$

$$n_4 = n_3 / u_3 = 0,01059 / 15,34 = 0,0006898 \text{ об / хв}. \quad (3.10)$$

Крутний момент на кожному валу знаходимо:

$$T_1 = 3335,4 \cdot N_1 / n_1 = 3335,4 \cdot 0,011 / 0,5 = 73,3788 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3.11)$$

$$T_2 = 3335,4 \cdot N_2 / n_2 = 3335,4 \cdot 0,009969 / 0,03333 = 997,6178398 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3.12)$$

$$T_3 = 3335,4 \cdot N_3 / n_3 = 3335,4 \cdot 0,009427 / 0,01059 = 2969,104419 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3.13)$$

$$T_4 = 3335,4 \cdot N_4 / n_4 = 3335,4 \cdot 0,009192 / 0,0006898 = 44446,21166 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (3.14)$$

Результати розрахунків наведено в табл.3.2.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 3.2 - Результати розрахунків

№ вала	Потужність, кВт	Число обертів, хв <sup>-1</sup>	Крутний момент, Н·м
1	0,011	0,5	73
2	0,009969	0,03333	998
3	0,009427	0,01059	2969
4	0,009192	0,0006898	44446

### 3.3 Розрахунок черв'ячної передачі

Приймаємо число заходів черв'яка  $Z_1=2$ .

При цьому число зубців черв'ячного колеса визначаємо за залежністю:

$$Z_2 = U \cdot Z_1, \quad (3.15)$$

$$Z_2 = 15 \cdot 2 = 30.$$

Марка матеріалу черв'ячного колеса визначається швидкістю ковзання, яку в першому наближенні оцінюємо для подальшого вибору матеріалу:

$$U_s = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot n_1 \cdot \sqrt[3]{T_2}, \quad (3.16)$$

$$U_s = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot \sqrt[3]{2969} = 0,00323 \text{ (м/с)}.$$

Відповідно до рекомендацій [25-28] для черв'ячного колеса приймаємо алюмінієву бронзу БрАЖ9-4, виготовлену литтям у піщану форму, а для черв'яка - сталь 45х, загартовану до твердості 45HRC<sub>э</sub> з подальшим шліфуванням робочих поверхонь витків. За даними [25] визначаємо допустиме контактне напруження

$[\sigma_H] = 140 \text{ МПа}$  та, прийнявши коефіцієнт навантаження  $K=1$ , виконуємо розрахунок поперечної міжосьової відстані:

$$a = 6100 * \sqrt[3]{KT^2 * 10^6 / [\sigma_H]^2}, \quad (3.17)$$

$$a = 6100 * \sqrt[3]{1 * 2969 / (140 * 10^6)^2} = 0,2421(\text{м}) = 242,1 \text{ (мм)}.$$

Визначення модуля зачеплення

Модуль зачеплення визначаємо із формули:

$$m = 2a / (q + Z2), \quad (3.18)$$

де  $q$  – коефіцієнт діаметра черв'яка.

Відповідно:

$$q = Z2/4, \quad (3.19)$$

$q = 30/4 = 7,5$  – відповідає стандартному значенню,

$$m = 2 * 242,1 / (7,5 + 30) = 12,912 \text{ (мм)}.$$

Згідно з ГОСТ 2144–66 найближчим стандартним значенням модуля є  $m = 12,5$ , після чого уточнюємо значення міжосьової відстані.

Тоді:

$$A = 0,5 * m * (q + Z2), \quad (3.20)$$

$$a = 0,5 * 12,5 * (7,5 + 30) = 234 \text{ (мм)}.$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Оскільки розраховуваний редуктор не призначений для серійного виробництва, відповідно до рекомендацій ГОСТ 2144–66 остаточну міжосьову відстань приймаємо рівною 234 мм, після чого визначаємо ділительний кут підйому лінії витка:

$$\operatorname{tgy} = Z_1 / q, \quad (3.21)$$

$$\operatorname{tgy} = 2 / 7,5 = 0,267.$$

Тоді  $\gamma = 11^\circ 18' 36''$ .

Ділительний діаметр черв'яка визначається за формулою:

$$d_1 = m * q, \quad (3.22)$$

$$d_1 = 12,5 * 7,5 = 93,75(\text{мм}) = 0,094 \text{ м.}$$

Відповідно до рекомендацій [25-28] для даної передачі призначаємо 8-й ступінь точності, після чого визначаємо еквівалентне число зубців колеса:

$$Z_U = Z_2 / \cos^3 \gamma, \quad (3.23)$$

$$Z_U = 40 / \cos^3 11^\circ 18' 36'' = 42,5.$$

Знайдемо коефіцієнт форми зуба  $Y_{F2} = 1,515$ .

Знайдемо допустимі напруження згину при нереверсивному навантаженні  $N_{Flim} = 10^6$  циклів:

$$[\sigma_{F0}] = 78 \text{ МПа.}$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перевіряємо напруження згину:

$$\sigma_F = 1,5 K T_2 Y_{F2} \cos \gamma / (m^3 q Z_2), \quad (3.24)$$

$$\sigma_F = 1,5 \cdot 1 \cdot 2969 \cdot 1,515 \cdot \cos 11^\circ 18' 36'' / (12,5 \cdot 7,5 \cdot 30) = 0,01506 \text{ (МПа)},$$

Якщо Т.к.  $\sigma_F = 0,01506 \text{ (МПа)} \ll [\sigma_F] = 78 \text{ (МПа)}$  – міцність колеса забезпечена.

Основні геометричні розміри черв'яка та черв'ячного колеса визначаємо за прийнятими параметрами передачі та результатами попередніх розрахунків.

Черв'як (рис.3.2) [29]:

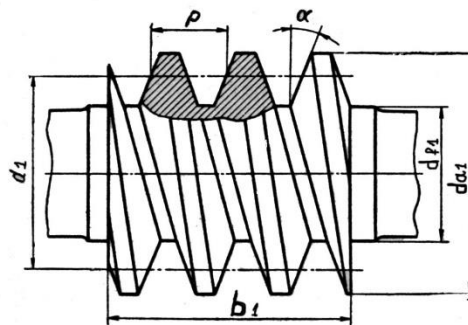


Рисунок 3.2 - Черв'як

Діаметр зовнішніх витків визначається із виразу:

$$d_{a1} = 140 + 2 * 14 = 168 \text{ мм.}$$

Діаметр впадин знахлдиться наступним чином:

$$d_{f1} = d_1 - 2,4 * m, \quad (3.25)$$

$$d_{f1} = 140 - 2,4 * 14 = 106,4 \text{ мм.}$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Довжина нарізаної частини черв'яка (при кількості заходів  $Z_1=2$ ) визначається:

$$b_1 \geq (11 + 0,06 * Z_2) * m, \quad (3.26)$$

$$b_1 \geq (11 + 0,06 * 40) * 14 = 187,6 \text{ мм.}$$

Так як черв'як шліфований - приймаємо наступне:

$$b_1 = 187,6 + 35 = 222,6 \text{ мм.}$$

Черв'ячне колесо (рис.3.3):

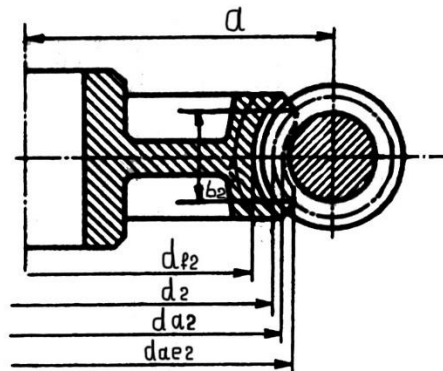


Рисунок 3.3 - Черв'ячне колесо

Ділильний діаметр:

$$d_2 = m * Z_2, \quad (3.27)$$

$$d_2 = 14 * 40 = 560 \text{ мм.}$$

Діаметр вершин зубів в середньому січенні визначається:

$$d_{a2} = d_2 + 2 * m, \quad (3.28)$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

57

$$d_{a2} = 560 + 2 * 14 = 588 \text{ мм.}$$

Діаметр впадин в середньому січенні визначається:

$$d_{j2} = d_2 - 2,4 * m, \quad (3.29)$$

$$d_{j2} = 560 - 2,4 * 14 = 532 \text{ мм.}$$

Найбільший діаметр черв'ячного колеса знаходимо:

$$D_{ac2} \leq d_{ac2} + 6 * m / (Z_1 + 2), \quad (3.30)$$

$$d_{ac2} \leq 560 + 6 * 14 / (2 + 2) = 609 \text{ мм.}$$

Ширина вінця знаходимо:

$$b_2 \leq 0,75 * d_{a1}, \quad (3.31)$$

$$b_2 \leq 0,75 * 168 = 126 \text{ мм.}$$

Відповідно до рекомендацій [29] черв'ячне колесо виготовляємо складальним: вінець і центр - литі, при цьому вінець виконуємо з бронзи, а центр - із чавуну СЧ15-32. З'єднання вінця з центром здійснюється шляхом відливання бронзового вінця у ливарну форму з попередньо встановленим чавунним центром колеса.

Розрахунок сил, що діють в зачепленні черв'ячної передачі (рис.3.4):

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

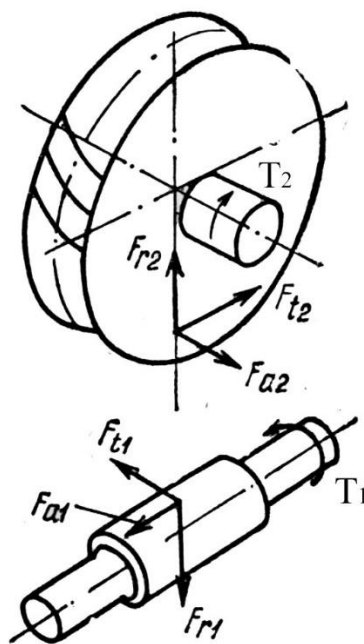


Рисунок 3.4 - Сили, що діють в зачепленні черв'ячної передачі

Під час розрахунку сил у зачепленні черв'ячної передачі визначаємо осьову  $F_a$  та радіальну  $F_r$  складові, а також крутні моменти  $T_1$  на черв'яку і  $T_2$  на черв'ячному колесі. При цьому окружна сила на черв'яку  $F_{t1}$  чисельно дорівнює осьовій силі на черв'ячному колесі  $F_{a2}$ :

$$F_{t1} = F_{a2} = 2T_1/d_1, \quad (3.32)$$

$$F_{t1} = 2 * 73,3788 / 0,14 = 1048,3 \text{ Н.}$$

Осьова сила на черв'яку  $F_{a1}$ , чисельно рівна окружній силі на черв'ячному колесі  $F_{t2}$ :

$$F_{t2} = F_{a1} = 2T_2/d_2, \quad (3.33)$$

$$F_{t2} = 2 * 997,618 / 0,56 = 3562,92 \text{ Н.}$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Радіальну силу  $F_r$ , яка діє в зачепленні та розсуває черв'як і черв'ячне колесо, визначаємо за відповідною розрахунковою залежністю:

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{a1} \operatorname{tg} \alpha,$$

де  $\alpha$  – кут профіля витка черв'яка в осьовому перерізі:  $\alpha = 20^\circ$ ,

$$F_{r1} = 13587,6 * \operatorname{tg} 20^\circ = 4945,5 \text{Н.} \quad (3.34)$$

### 3.4 Розрахунок валів

#### Тихохідний вал

Тихохідний вал розраховуємо на міцність, при цьому за рекомендаціями [29] для врахування напружень згину та інших впливів у розрахунку приймаємо знижене значення допустимих напружень кручення, а діаметр вала визначаємо з умови міцності:

$$d = \sqrt[3]{T / (0,2 [\tau_e])} \quad (3.35)$$

де  $T$  - крутний момент на валу,

$[\tau_e]$  - допустиме напруження кручення.

Відповідно до рекомендацій [29] для вихідного вала редуктора приймаємо матеріал - сталь 45, після чого задаємо допустимі напруження для подальшого розрахунку.

Тоді:

$$[\tau_e] \approx 25 \text{ МПа.}$$

Тоді:

$$d = \sqrt[3]{3562,92 / (0,2 * 25 * 10^6)} = 0,089 \text{ (м)} = 89 \text{ мм.}$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Отримане розрахункове значення округляємо до найближчого стандартного з ряду Ra40, у результаті чого приймаємо:

$d_{2i}=90$  мм - діаметр вала в місці посадки підшипника,

$d_{2o}=95$  мм - діаметр вала в місці посадки шестерні;

$d_{2\phi}=85$  мм - діаметр вала в місці посадки зірочки.

Довжину ступиці визначаємо з урахуванням умов міцності з'єднання та забезпечення необхідної посадкової поверхні на валу:

$$l_{2cm} = (1,2..1,8) * d_{2o}, \quad (3.36)$$

$$l_{2cm} = (1,2..1,8) * 100 = 114..171 \text{ мм.}$$

Тоді приймаємо  $l_{2cm} = 150$  мм

Відповідно до рекомендацій [25-28] попередньо приймаємо довжину вихідного кінця тихохідного вала  $l_{вих}=180$  м.

Відстань між точками прикладання реакцій підшипників тихохідного вала визначаємо з урахуванням компоновки редуктора та прийнятої довжини вала:

$$l_2 = 2a_2 = 240 \text{ мм.}$$

Виконуємо спрощений перевірочний розрахунок відповідно до рекомендацій [28] за наведеними розрахунковими залежностями:

$$M_{ux} = F_{r2} * a^2 / l_2 + F_{a2}d_{2a} / 2l, \quad (3.37)$$

$$M_{uy} = F_t * a^2 / l_2, \quad (3.38)$$

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2 + M_K^2}, \quad (3.39)$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$d_p = \sqrt[3]{M_{\text{экв}} / (0,1 * [\sigma_{-1N}]}) \quad (3.40)$$

За результатами попередніх розрахунків отримано такі значення сил у зачепленні:

- окружна сила  $F_{t2}=3562,92 \text{ Н}$ ,
- осьова сила  $F_{a2}=1048,3 \text{ Н}$ ,
- радіальна сила  $F_{r2}=4945,5 \text{ Н}$ .

Тоді:  $T_2=997,62 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $a_1=a_2=120 \text{ мм}$ ,  $d_2=560 \text{ мм}$ .

Відповідно:

$$M_{ux} = 4945,5 \cdot 0,12^2 / 0,24 + 1048,3 \cdot 0,56 \cdot 0,12 / (2 \cdot 0,24) = 484,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{uy} = 3562,92 \cdot 0,12^2 / 0,24 = 213,8 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{484,5^2 + 213,8^2 + 73,3^2} = 534,62 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Приймаємо допустимі напруження  $[\sigma_{-1U}] = 60 \text{ МПа}$ .

Відповідно:

$$d_p = \sqrt[3]{3970,4 / (0,1 * 60 * 10^6)} = 0,087 \text{ (м)} = 87 \text{ мм}.$$

Оскільки в зоні посадки шестерні на валу передбачається шпоночний паз, розрахунковий діаметр збільшуємо на 10% і отримуємо  $d_p=95 \text{ мм}$ . Порівняння показує, що  $d_p=90 \text{ мм} < d_{\text{ш}}=95 \text{ мм}$ , отже опір втомному руйнуванню вала забезпечено з достатнім запасом. Далі визначаємо основні розміри швидкохідного вала (черв'яка); за попередніми даними відстань між центрами прикладання реакцій опор підшипників становить  $l_1=560 \text{ мм}$ , а діаметр впадин черв'яка  $d_{f1}=106,4 \text{ мм}$ .

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для підвищення міцності приймаємо виконання черв'яка за одноцілою схемою з валом [27]. Діаметр у зоні черв'яка приймаємо  $d_{1в} \approx d_{f1} = 105$  мм, а діаметр вала в місці посадки підшипників -  $d_{1п} = 100$  мм. За рекомендаціями [28] діаметр вихідного кінця вала черв'яка приймаємо в межах  $0,8 \dots 1,20$  діаметра вала двигуна, тобто  $9,6 \dots 14,4$  мм; у роботі прийнято  $d_{1вих} = 12$  мм, а довжину вихідного кінця -  $l_{вих} = 30$  мм. Відповідно до [26] для передачі призначаємо 8-й ступінь точності.

### 3.5 Компоновка і попередні розміри

Після визначення розмірів основних деталей виконуємо ескізну компоновку черв'ячної передачі, розміщуючи черв'як і черв'ячне колесо симетрично відносно опор та визначаючи відповідні компоновочні розміри (рис.3.5):

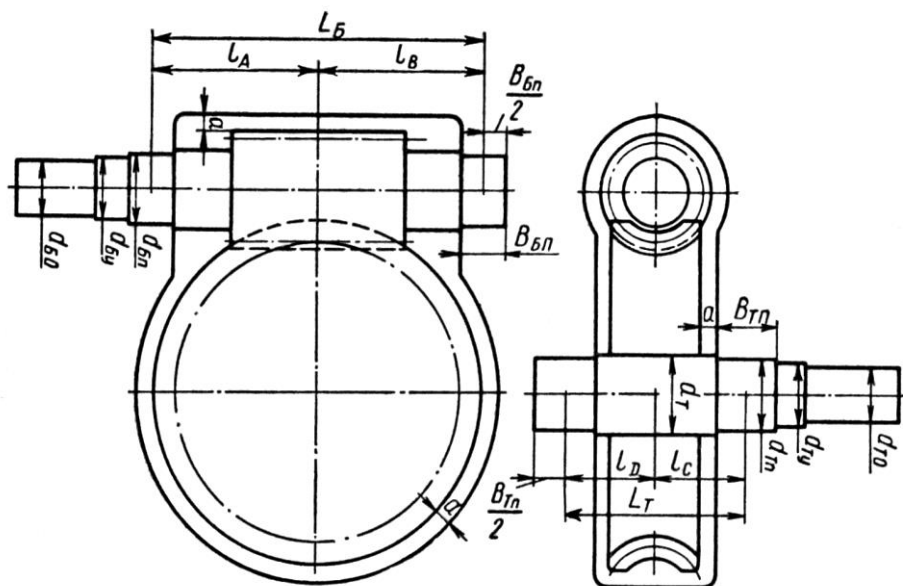


Рисунок 3.5 - Попередні розміри черв'ячної передачі

$d_т = 100$  мм;  $d_{тп} = 95$  мм;  $d_{тв} = 95$  мм;  $d_{т0} = 90$  мм;  $d_{бп} = 100$  мм;  
 $d_{бу} = 100$  мм;  $d_{б0} = 70$  мм;  $L_б = 560$  мм;  $L_а = L_б = 280$  мм)  $a^1 = 20$  мм;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

$V_{БП}=100$  мм;  $V_{ТП}=95$  мм;  $L_T=240$  мм;  $L_D=L_C=120$  мм;  $L_{ступ}=150$  мм;  $L_{1П} = 100$  мм;  $L_{2П} = 95$  мм;

Відповідно до рекомендацій [25] приймаємо діаметр вала під ущільнення для підшипників: для швидкохідного вала  $d_{БУ}=100$  мм, для тихохідного вала  $d_{ТУ}=95$  мм.

Зазор між черв'ячним колесом, а також іншими деталями передачі і корпусом приймаємо з урахуванням умов монтажу, теплових деформацій та забезпечення нормальної роботи редуктора:

$$a^I = (0,045 * a) + 3,$$

$$a^I = (0,045 * 242,1) + 3 = 14 \text{ мм},$$

прийmemo  $a^I = 15$  мм.

Ширина підшипників попередньо буде дорівнювати їх діаметру  $l_{1П} = 95$  мм, та  $l_{1П} = 90$  мм.

### 3.6 Розрахунок конічної прямозубої передачі

Вихідні дані (рис.3.6):

- $n = 0,01059$ ;
- $T = 2969$  Н\*м;
- $U = 3,15$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64

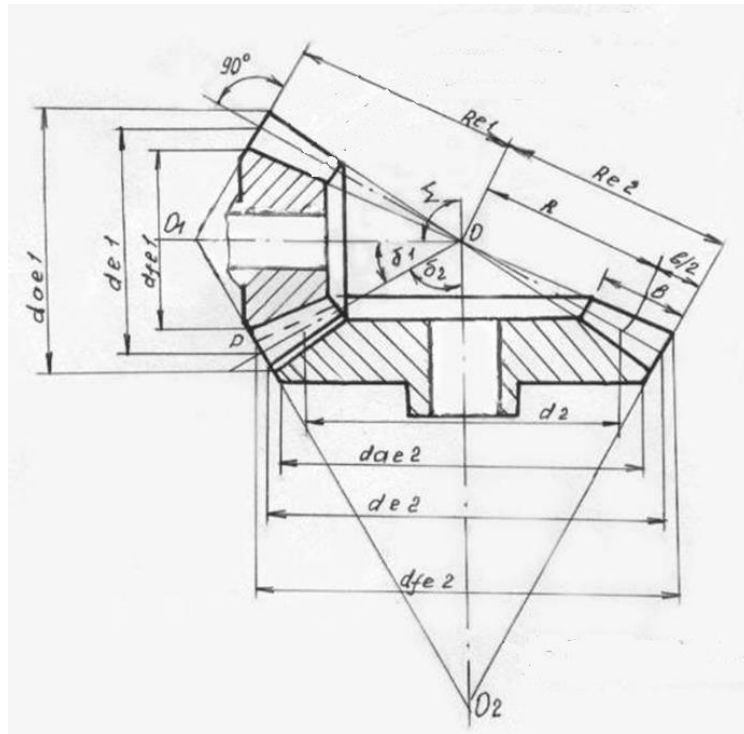


Рисунок 3.6 - Зубчаста конічна передача

Вибір матеріалу і термічної обробки здійснюємо за таблицею 3.3 [28]:

Таблиця 3.3 – Властивості матеріалів зубчастих коліс

					Механічні властивості після обробки		
	Марка сталі	ГОСТ	Термо- обробка	Розмір пере- різу	Тверд. НВ	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа
Шестерня	Сталь45	1050-74	Покращ.	$\leq 100$	192 - 240	750	450
Колесо	Сталь45	1050-74	Нормалі	$\leq 80$	170 - 217	600	340

Визначення допустимих напружень:

Для шестерні було вибрано НВ = 230; HRC = 22.

Для колеса було прийнято НВ = 210; HRC = 20.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

65

Тоді:

$$\sigma_{H \text{ limb}_1} = 20\text{HRC} + 70 = 20 \cdot 22 + 70 = 510 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{H \text{ limb}_2} = 20\text{HRC} + 70 = 20 \cdot 20 + 70 = 470 \text{ МПа}.$$

Тоді допустимі контактні напруження будуть дорівнювати:

$$[\sigma]_{H1} = 510/1,1 = 463,64 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{H2} = 470/1,1 = 427,27 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{HR} = 0,45([\sigma]_{H1} + [\sigma]_{H2}) = 0,45(463,64 + 427,27) = 400,91 \text{ МПа}.$$

Оскільки  $[\sigma]_{HR} < [\sigma]_{H2}$ , за розрахункове значення приймаємо  $[\sigma]_{HR} = 427,27 \text{ МПа}$ .

Максимально допустимі контактні напруження  $[\sigma]_{Hmax}$  визначаємо з урахуванням властивостей матеріалів елементів зачеплення та умов їх роботи:

$$[\sigma]_{Hmax} = 2,8\sigma_T,$$

$$[\sigma]_{Hmax1} = 2,8 \cdot 450 = 1260 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{Hmax2} = 2,8 \cdot 340 = 952 \text{ МПа}.$$

Допустимі напруження згину будуть дорівнювати:

$$\sigma_F \text{ limb} = 18 \text{ HRC},$$

$$\sigma_F \text{ limb}_1 = 18 \cdot 22 = 396 \text{ МПа},$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_F \text{ limb}_2 = 18 \cdot 20 = 360 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{F1} = 396 / 1,75 = 226,29 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{F2} = 360 / 1,75 = 205,71 \text{ МПа}.$$

Визначаємо максимально-допустимі напруження згину  $[\sigma]_{\text{max}}$ :

$$[\sigma]_{F\text{max}} = 27.4 \text{ HRC},$$

$$[\sigma]_{F\text{max}1} = 27.4 \cdot 22 = 602.8 \text{ МПа},$$

$$[\sigma]_{F\text{max}2} = 27.4 \cdot 20 = 548 \text{ МПа}.$$

Результати розрахунків наведені в табл.

Таблиця 3.4 - Результати розрахунків

	$[\sigma]_H$ , МПа	$[\sigma]_{H\beta}$ , МПа	$[\sigma]_{H\text{max}}$ , МПа	$[\sigma]_F$ , МПа	$[\sigma]_{F\text{max}}$ , МПа
Шестерня	463,64	400,91	1260	226,29	602,8
Колесо	427,27	400,91	952	205,71	548

Мінімальний зовнішній ділительний діаметр кінцевого колеса визначаємо за умовою забезпечення міцності та заданого передаточного числа передачі:

$$D_{ezmin} = K_d^3 \sqrt{T_{1H} K_{H\beta} u^2 / (K_{be} (1 - K_{be}))} [\sigma]_H^2 \text{ мм} \quad 3.41$$

де  $K_{be} = 0.27$  – коефіцієнт ширини зубчастих вінців [27];

Тоді:

$$K_{bd} = K_{be} u / (2 - K_{be}) = 0.273.15 / (2 - 0.27) = 0.49 \quad (3.42)$$

Приймаємо  $K_{H\beta} = 1.04$  - коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по ширині зубця вінця [28], а також  $K_d = 100$  МПа - допоміжний коефіцієнт [28], після чого визначаємо мінімальний зовнішній дільний діаметр конічного колеса:

$$D_{ezmin} = K_d \sqrt[3]{T_{1H} K_{H\beta} u^2 / (K_{be} (1 - K_{be}))} [\sigma]_{H}^2, \quad (3.43)$$

$$D_{ezmin} = 100 \sqrt[3]{131.149 * 1.04 * 3.15^2 / (0.27(1 - 0.27) * 500^2)} = 59.3 \text{ мм.}$$

Визначимо число зубців шестерні:

$$z_1 = 20,$$

$$z_2 = u * z_1, \quad (3.44)$$

$$z_2 = 3.15 * 20 = 63.$$

Модуль зубців буде дорівнювати:

$$M_e = d_{e2min} / z_2, \quad (3.45)$$

$$M_e = 59.3 / 63 = 0.94 \text{ мм.}$$

За ГОСТ 9563 – 60 [28] приймаємо  $M_e = 1$  мм.

Попередні значення деяких параметрів передач дорівнюють:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$d_{e1} = Me * z_1 = 1 * 20 = 20 \text{ мм}, \quad (3.46)$$

$$d_{e2} = Me * z_2 = 1 * 63 = 63 \text{ мм}.$$

Зовнішня конічна відстань буде дорівнювати:

$$Re = 0.5Me \sqrt{(z_1)^2 + (z_2)^2}, \quad (3.47)$$

$$Re = 0.5 * 1 \sqrt{20^2 + 63^2} = 33 \text{ мм},$$

$$B = b_1 = b_2 = K_{be} Re, \quad (3.48)$$

$$b = 0.27 * 33 = 8.91 \text{ мм}.$$

де  $b$  - ширина зубчастих вінців, після чого визначаємо середню конусну відстань.

Середня конусна відстань :

$$Rm = Re - 0.5b = 33 - 0.5 * 8.91 = 28.55 \text{ мм}. \quad (3.49)$$

Середній модуль зубців буде дорівнювати:

$$Mm = MeRm/Re = 1 * 28.55/33 = 0.87 \text{ мм}, \quad (3.50)$$

$$D_{m1} = Mm * z_1 = 0.87 * 20 = 17.3 \text{ мм}, \quad (3.51)$$

$$D_{m2} = Mm * z_2 = 0.87 * 63 = 54.81 \text{ мм}. \quad (3.52)$$

Кути при вершинах ділительних конусів шестерні та колеса визначаємо з урахуванням передаточного числа та геометричних параметрів конічної зубчастої передачі:

$$\delta_1 = \arctg (z_1/ z_2 ) = \arctg (20/63) = 17.6125^0 = 17^0 36^I 14^{II}, \quad (3.53)$$

$$\delta_2 = 90-\delta_1 = 72^{\circ}24^I 46^{II}, \quad (3.54)$$

Колова швидкість зубчастих коліс визначається з наступного виразу:

$$V = 0.5 \omega_1 d_{m1} = 0.5 \pi n^* d_{m2} /30, \quad (3.55)$$

$$V = 0.5 * 3.14 * 0,01059 * 54,81 / 30 = 0,03 \text{ м/с.}$$

За даними [28] вибираємо 9-й ступінь точності ( $n_c = 9$ ).

Еквівалентні числа зубців конічних зубчастих коліс розраховуються за формулою:

$$z_{v1} = (z_1 \sqrt{1 + u^2})/u, \quad (3.56)$$

$$z_{v1} = (20\sqrt{1 + 3.15^2})/3.15 = 20.98,$$

$$z_{v2} = (z_2 \sqrt{1 + u^2}), \quad (3.57)$$

$$z_{v2} = 63 \sqrt{1 + 3.15^2} = 208.21.$$

Коефіцієнт торцевого перекриття знаходимо так:

$$E_{\alpha} = 1.88 - 3.2 (1/ z_{v1} + 1/z_{v2} ), \quad (3.58)$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\alpha} = 1.88 - 3.2(1/20.98 + 1/208.21) = 1.71.$$

Колова сила буде дорівнювати:

$$F_t = F_{Ht} = F_F = 2T_1 / dm_1, \quad (3.59)$$

$$F_t = 2 * 998 / 17,3 = 115,4 \text{ Н.}$$

Розрахунок активних поверхонь зубців на контактну втому здійснюється за наступною формулою::

$$\sigma_H = z_M * z_H * z_E \sqrt{(\omega_{Ht} / d_{m1}) (\sqrt{1 + u^2} / u)}, \quad (3.60)$$

де  $z_m = 275 \text{ МПа}^{-1/2}$  – це коефіцієнт механічної властивості матеріалів;

$$z_m = 168,$$

$$z_E = \sqrt{(4 - E_{\alpha})/3} = \sqrt{(4 - 1.71)/3} = 0.87 \quad (3.61)$$

Приймаємо  $K_{H\alpha}=1$  - коефіцієнт розподілу навантаження між зубцями,  $K_{H\beta}=1,04$  та  $K_{Hv}=1,08$  - коефіцієнт динамічного навантаження [28], після чого визначаємо питомий розподіл колової сили.

Тоді:

$$\omega_{Ht} = F_{Ht} * K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{Hv} / 0.85b, \quad (3.62)$$

$$\omega_{Ht} = 115,4/0.85*8,91*1*1.04*1.08 = 13,58 \text{ Н/мм.}$$

Розраховуем контактне навантаження:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_H = z_M * z_H * z_E \sqrt{(\omega_{Ht}/d_{m1})} (\sqrt{(1 + u^2)/u}), \quad (3.63)$$

$$\sigma_H = 275 * 1.68 * 0.87 * \sqrt{(13,58 / 17,3)} * \sqrt{(1+3.15^2)}/3.15 = 314 \text{ МПа},$$

$$\sigma_H = 314 \text{ МПа} < [\sigma_H] = 427,27 \text{ МПа}.$$

Розраховуємо контактну міцність активних поверхонь зубців:

$$\sigma_{Hmax} = \sigma_H \sqrt{T_{1max} / T_1} = 314 \sqrt{2} T_1 / T_1 = 593,94 \text{ МПа}, \quad (3.64)$$

$$\sigma_{Hmax} = 593,94 \text{ МПа} < [\sigma]_{Hmax} = 952 \text{ МПа}.$$

Розрахунок зубців на втому при згині здійснюємо за наступним виразом:

$$\sigma_F = Y_F Y_E Y_\beta \omega_{Ft} / Mm, \text{ МПа}, \quad (3.65)$$

Приймаємо  $Y_{F1}=4,08$  - коефіцієнт форми зубця шестерні.

Вибираємо  $Y_{F2}=3,62$  коефіцієнт форми зубця колеса.

Приймаємо  $Y_E=1$  - коефіцієнт, що враховує умови контакту та тертя зубців.

Вибираємо  $Y_\beta=1$  - коефіцієнт нахилу зубців.

Приймаємо  $K_{F\alpha}=1$  - коефіцієнт розподілу навантаження між зубцями.

Після прийняття наведених коефіцієнтів виконуємо питомий розрахунок колової сили:

$$\omega_{Ft} = F_{Ft} * K_{F\alpha} * K_{F\beta} K_{Fv} / 0.85b, \quad (3.66)$$

$$\omega_{Ft} = 115,4 * 1 * 1.04 * 1.06 / 0.85 * 8,91 = 16.7 \text{ Н/мм},$$

$$\sigma_{F1} = Y_{F1} Y_E Y_{\beta} \omega_{Ft} / H_m,$$

$$\sigma_{F1} = 4.08 * 1 * 1 * 88.24 / 4.32 = 83.34 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F2} = Y_{F2} Y_E Y_{\beta} \omega_{Ft} / H_m,$$

$$\sigma_{F2} = 3.62 * 1 * 1 * 88.24 / 4.32 = 73.94 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F1} = 83.34 \text{ МПа} < [\sigma]_{F1} = 226,29 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F2} = 73.94 \text{ МПа} < [\sigma]_{F2} = 205,71 \text{ МПа}.$$

Розрахунок зубців на міцність при згині здійснюємо за формулою:

$$\sigma_{F1max} = \sigma_{F1} (T_{1max} / T_1), \quad (3.67)$$

$$\sigma_{F1max} = 267.43 * 2 = 534.86 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F2max} = \sigma_{F2} (T_{1max} / T_1), \quad (3.68)$$

$$\sigma_{F2max} = 246.86 * 2 = 493.72 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F1max} = 534.86 < 602,8 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{F2max} = 493.72 < 548 \text{ МПа}.$$

Розраховуємо параметри параметрів конічної передачі:

$h_{ae} = m_e = 0,94 \text{ мм}$  – зовнішній виступ головного зубця;

$h_{fe} = 1.2 m_e = 1.2 * 0,94 = 1,128 \text{ мм}$  – це зовнішній виступ ніжки зубця;

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$h_e = 2.2 m_e = 2.2 * 0,94 = 2,068$  мм – це зовнішній виступ зубця;

$C = 0.2 m_e = 0.2 * 0,94 = 0,188$  мм – це радіальний зазор;

$\alpha = 20^0$  - це кут провідного зуба;

$\delta_1 = 17^0 36' 14''$ ;

$\delta_2 = 72^0 24' 46''$ ;

$d_{e1} = 20$  мм;

$d_{e2} = 63$  мм.

Зовнішній діаметр вершин зубців знаходимо наступним чином:

$$D_{ae1} = d_{e1} + 2 m_e \cos \delta_1, \quad (3.69)$$

$$d_{ae1} = 20 + 2 * 0,94 * \cos 17^0 = 21,80 \text{ мм},$$

$$d_{ae2} = d_{e2} + 2 m_e \cos \delta_2,$$

$$d_{ae2} = 63 + 2 * 0,94 * \cos 72^0 = 62,58 \text{ мм}.$$

Зовнішній діаметр впадин визначається із виразу:

$$D_{fe1} = d_{e1} - 2.4 m_e \cos \delta_1, \quad (3.70)$$

$$d_{fe1} = 20 - 2.4 * 0,94 * \cos 17^0 = 17,84 \text{ мм},$$

$$d_{fe2} = d_{e2} - 2.4 m_e \cos \delta_2, \quad (3.71)$$

$$d_{fe2} = 63 - 2.4 * 0,94 * \cos 72^0 = 62,30 \text{ мм},$$

$$R_e = 33 \text{ мм},$$

$$R_m = 28,55 \text{ мм},$$

$$M_m = 0,87 \text{ мм},$$

$$d_{m1} = 17,3 \text{ мм},$$

$$d_{m2} = 54,81 \text{ мм}.$$

Кут головки та ніжки зубців знаходимо із виразу:

$$\text{tg } \theta_a = h_{ae} / R_e = 4.79/165.25, \quad (3.72)$$

$$\text{tg } \theta_a = 0.02899,$$

$$\theta_a = 1.6603^\circ,$$

$$\theta_a = 1^\circ 42' 2''$$

$$\text{tg } \theta_f = h_{fe} / R_e,$$

$$\text{tg } \theta_f = 5.75/165.25 = 0.0348,$$

$$\theta_f = 1.9928^\circ,$$

$$\theta_a = 1^\circ 59' 15''.$$

Кути косинуса вершин визначаємо із залежності:

$$\delta_{a1} = \delta_1 + \theta_a,$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\delta_{a1} = 17^{\circ} 36' 14'' + 1^{\circ} 42' 2'' = 19^{\circ} 18' 16'',$$

$$\delta_{a2} = \delta_2 + \theta_a,$$

$$\delta_{a2} = 72^{\circ} 24' 46'' + 1^{\circ} 42' 2'' = 74^{\circ} 06' 48''.$$

Кути косинуса впадин дорівнюють:

$$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_f,$$

$$\delta_{f1} = 17^{\circ} 36' 14'' - 1^{\circ} 59' 15'' = 15^{\circ} 37' 59'',$$

$$\delta_{f2} = \delta_2 - \theta_f,$$

$$\delta_{f2} = 72^{\circ} 24' 46'' - 1^{\circ} 59' 15'' = 70^{\circ} 25' 31''.$$

Сили в зачепленні зубців конічної передачі визначаємо шляхом розкладання навантаження на колову, радіальну та осьову складові відповідно до геометрії передачі та діючого крутного моменту. Тоді:

$$F_t = 115,4 \text{ Н.}$$

Радіальна сила на шестерні знаходиться із залежності:

$$F_{r1} = F_{a2} = F_t \operatorname{tg} a \cos \delta_1, \quad (3.73)$$

$$F_{r1} = 115,4 * \operatorname{tg} 20 \cos 17^{\circ} 36' 14'' = 40 \text{ Н.}$$

Осьова сила знаходиться:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$F_{a1} = F_{r2} = F_t \operatorname{tg} \alpha \cos \delta_2, \quad (3.74)$$

$$F_{a1} = 115,4 * \operatorname{tg} 20 \cos 72^{\circ} 24' 46'' = 331,88 \text{ Н.}$$

### 3.7 Розрахунок зубчастої рейкової передачі

Для забезпечення повороту сонячної панелі на заданий кут  $180^{\circ}$  дуга зубчастої рейки також має становити  $180^{\circ}$ , тобто рейка виконується у вигляді півкола з діаметром, що дорівнює відстані між точками її кріплення на панелі. За габаритів панелі  $1580 \times 798 \times 35$  мм відстань між крайніми точками кріплення по більшій стороні приймаємо  $D=1570$  мм, після чого визначаємо довжину дуги:

$$L = \frac{1}{2} C, \quad (3.75)$$

$$C = \pi * d, \quad (3.76)$$

$$d = 1570 \text{ мм,}$$

$$C = 3,14 * 1570 = 4929,8 \text{ мм,}$$

$$L = 2464,9 \text{ мм.}$$

Визначаємо число зубців шестерні:

Число зубців шестерні визначаємо з урахуванням прийнятого модуля та ділильного діаметра шестерні, який забезпечує необхідну кінематику взаємодії з рейкою. Відповідно:

$$z_1 = 20,$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$z_2 = u \cdot z_1, \quad (3.77)$$

$$z_2 = 15,34 \cdot 20 = 306,8$$

Модуль зубців визначаємо з урахуванням довжини дуги:

$$M_e = L/z_2, \quad (3.78)$$

$$M_e = 2464,9 / 306,8 = 8 \text{ мм.}$$

Відповідно до ГОСТ 9563–60 [28] приймаємо модуль зачеплення  $m_e=8$  мм, після чого задаємо попередні значення параметрів передачі:

$$d_{e1} = M_e \cdot z_1 = 8 \cdot 20 = 160 \text{ мм,}$$

$$d_{e2} = M_e \cdot z_2 = 8 \cdot 306,8 = 2454 \text{ мм.}$$

Зовнішню відстань визначаємо за геометричними параметрами передачі з урахуванням прийнятого модуля та числа зубців:

$$R_e = 0,5 M_e \sqrt{(z_1)^2 + (z_2)^2}, \quad (3.79)$$

$$R_e = 0,5 \cdot 8 \sqrt{20^2 + 306,8^2} = 153,7 \text{ мм,}$$

$$B = b_1 = b_2 = K_{be} R_e, \quad (3.80)$$

$$b = 0,27 \cdot 153,7 = 41,5 \text{ мм,}$$

де  $b$  – це ширина зубчастих вінців.

Середня відстань дорівнює:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$R_m = R_e - 0.5b = 153,7 - 0,5 * 41,5 = 132,95 \text{ мм.} \quad (3.81)$$

Середній модуль зубців знаходиться наступним чином:

$$M_m = M_e R_m / R_e = 1 * 132,95 / 153,7 = 0,87 \text{ мм,} \quad (3.82)$$

$$d_{m1} = M_m * z_1 = 0,87 * 20 = 17,3 \text{ мм,}$$

$$d_{m2} = M_m * z_2 = 0,87 * 306,8 = 266,9 \text{ мм.}$$

Кути при вершинах ділительних конусів шестерні та колеса визначаємо з урахуванням передаточного числа та геометричних співвідношень конічної зубчастої передачі. Тоді:

$$\delta_1 = \arctg (z_1 / z_2) = \arctg (20 / 306,8) = 3.7298^\circ = 3^\circ 43' 59'', \quad (3.83)$$

$$\delta_2 = 90 - \delta_1 = 86^\circ 17' 01''.$$

Колову швидкість зубчастих коліс визначаємо за кутовою швидкістю обертання та ділительним діаметром відповідних коліс:

$$V = 0.5 \omega_1 d_{m1} = 0.5 \pi n * d_{m2} / 30, \quad (3.84)$$

$$V = 0.5 * 3.14 * 0,0006898 * 266,9 / 30 = 0,00963 \text{ м/с.}$$

За даними [28] приймаємо 9-й ступінь точності ( $n_c=9$ ), після чого визначаємо еквівалентні числа зубців конічних зубчастих коліс:

$$Z_{v1} = (z_1 \sqrt{1 + u^2}) / u, \quad (3.85)$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 79
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$z_{v1} = (20\sqrt{1 + 15,34^2}) / 15,34 = 20,$$

$$z_{v2} = (z_2 \sqrt{1 + u^2}), \quad (3.86)$$

$$z_{v2} = 306,8 \sqrt{1 + 15,34^2} = 4716.$$

Тоді колова сила визначається із виразу:

$$F_t = F_{Ht} = F_F = 2T_3 / dm_2, \quad (3.87)$$

$$F_t = 2 * 44446 / 266,9 = 333 \text{ Н},$$

$$333 \text{ Н} = 333 / 9,8 = 33,9 \text{ кг*см.}$$

Отже, необхідний крутний момент для приведення в рух сонячної панелі становить 33,9 кг·см, а не 30 кг·см, як це було попередньо прийнято. Оскільки вибір здійснювався серед крокових двигунів серії FL86STH з діапазоном крутних моментів від 34 до 122 кг·см, обраний двигун повністю відповідає вимогам розроблюваної системи приводу.

### 3.8 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано розрахунки, які підтверджують працездатність електроприводу керування сонячними панелями та правильність прийнятої структурної схеми з черв'ячною, конічною і зубчасто-рейковою передачами. Визначено загальний ККД приводу, загальне передаточне число та його розподіл між ступенями, а також розраховано потужності, частоти обертання і крутні моменти на валах, що забезпечує задану повільну

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

швидкість повороту панелі. Обґрунтовано вибір матеріалів і ступенів точності передач, визначено сили в зачепленнях та перевірено міцність елементів за контактними напруженнями і напруженнями згину. Проведено розрахунок валів і попередню компоновку редуктора, прийнято конструктивні розміри з урахуванням посадок, зазорів і шпоночних пазів, що забезпечує надійність роботи вузла. За результатами уточнення навантаження встановлено необхідний крутний момент 33,9 кг·см, який відповідає можливостям обраного крокового двигуна серії FL86STH, тому електропривод задовольняє вимоги системи та має достатній запас працездатності.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з підвищенням ефективності використання сонячної енергії шляхом розробки електроприводу для керування положенням сонячних панелей. Актуальність теми зумовлена зростаючою роллю відновлюваних джерел енергії, необхідністю раціонального використання сонячного випромінювання та підвищенням енерговіддачі фотоелектричних установок без збільшення їхньої площі й вартості.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану сонячної енергетики, розглянуто фізичні основи фотоелектричного перетворення, конструкцію та класифікацію сонячних елементів і панелей. Показано, що ефективність роботи сонячних батарей істотно залежить від кута падіння сонячних променів, а також від умов експлуатації, що обґрунтовує доцільність застосування систем стеження за Сонцем. Аналіз існуючих технічних рішень підтвердив перспективність одноосьових і двоосьових систем позиціонування та сформував вихідні вимоги до електроприводу керування.

У другому розділі розроблено електропривод для керування положенням сонячної панелі. Обґрунтовано доцільність використання керованого електроприводу як ефективного засобу підвищення виробітку електроенергії. Сформовано базову структурну схему одновісного електроприводу та на її основі розроблено двовісну систему керування, що забезпечує просторову орієнтацію панелі за азимутом і кутом нахилу. Запропоновано кінематичну схему з використанням багатоступеневих механічних передач і шарової опори, а також розроблено схему підключення сонячної панелі до системи енергопостачання з урахуванням акумулювання енергії, перетворення напруги та взаємодії з електричною мережею. Сформовано алгоритм роботи системи керування, який забезпечує дискретне позиціонування панелі за добовим графіком, контроль фактичного положення та корекцію відхилень.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі виконано комплекс розрахунків, що підтверджують працездатність і надійність розробленого електроприводу. Визначено загальний коефіцієнт корисної дії приводу, загальне передаточне число та його раціональний розподіл між ступенями. Розраховано потужності, частоти обертання і крутні моменти на валах, виконано розрахунок черв'ячної, конічної та зубчасто-рейкової передач, а також перевірено міцність елементів за контактними та згинальними напруженнями. Проведено розрахунок валів і попередню компоновку редуктора з урахуванням конструктивних вимог.

Загалом результати виконаної роботи підтверджують, що розроблений електропривод забезпечує точне, надійне та енергоефективне керування положенням сонячної панелі, дозволяє суттєво підвищити енерговіддачу сонячної установки та може бути використаний у складі автономних і гібридних систем електропостачання. Отримані структурні, кінематичні, алгоритмічні та розрахункові рішення мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем стеження за Сонцем для сонячних енергетичних установок.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Колонтаєвський Ю.П. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю.П. Колонтаєвський, Д.В. Тугай, С.В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.

2. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Курс лекцій / С.О. Кудря, В.І. Будько. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 387 с.

3. Яковчук П.Є., Цяпа В.Б., Комаров В.І., Національний університет «Львівська політехніка», СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/30762/1/35.pdf>.

4. Розділ 12. Альтернативні та поновлювальні джерела енергії [Електронний ресурс] – Режим доступу: [eprints.kname.edu.ua/533/12/Розділ\\_12.doc](http://eprints.kname.edu.ua/533/12/Розділ_12.doc).

5. Види сонячних батарей. Як обрати? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://soncedim.com.ua/blog/vidi-soniachnih-batarei-iak-obrati?srsltid=Afm-BOor5UZ3RCKdlr48CtGGt4WNOG6NEqFIPXFGYpZrRJwobKUetpUJb>.

6. Системи керування сонячних трекерів [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36450/2/MNPK\\_2021v1\\_Honcharenko\\_O\\_R-Solar\\_tracker\\_control\\_90.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36450/2/MNPK_2021v1_Honcharenko_O_R-Solar_tracker_control_90.pdf).

7. Значення трекерів для СЕС [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://repozitory.zhatk.zt.ua/bitstream/123456789/725/1/%D0%97%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%B8%D1%80%D1%96%D0%B2%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%A1%D0%95%D0%A1.pdf>.

8. Сонячні трекери для електростанцій (динамічні системи кріплення сонячних панелей) [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://220volt.com.ua/storage/catalog\\_products/169558/instruction/738.pdf?srsltid=AfmBOopW52CY6JEhWkG\\_g1xutw7WMRRTF20qZgbM5F4BKgS7lrSCpZDm](https://220volt.com.ua/storage/catalog_products/169558/instruction/738.pdf?srsltid=AfmBOopW52CY6JEhWkG_g1xutw7WMRRTF20qZgbM5F4BKgS7lrSCpZDm).

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

9. Що таке фотоелектричний ефект у напівпровіднику [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.basengreen.com/uk/what-is-photovoltaic-effect-in-semiconductor/>.

10. Як працюють сонячні батареї [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.mojo.ua/ua/news/kak\\_rabotayut\\_solnechnye\\_batarei\\_ikh\\_aktualnost\\_v\\_ukraine\\_v\\_2022\\_godu.html?srsltid=AfmBOoqCx5X1-hyU\\_XOS9nbzYqk9eX8PWjtyOhL7bqWAriqtOMevjOq1](https://www.mojo.ua/ua/news/kak_rabotayut_solnechnye_batarei_ikh_aktualnost_v_ukraine_v_2022_godu.html?srsltid=AfmBOoqCx5X1-hyU_XOS9nbzYqk9eX8PWjtyOhL7bqWAriqtOMevjOq1)

11. Як працює сонячна батарея [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://sun-energy.com.ua/statti/yak\\_pratsyuye\\_sonyachna\\_panel?srsltid=AfmBOor4nOKXU-gy-\\_3eZt8K15uu3dBtEoc15-\\_HL7qVqv-8FQ\\_OvuXW](https://sun-energy.com.ua/statti/yak_pratsyuye_sonyachna_panel?srsltid=AfmBOor4nOKXU-gy-_3eZt8K15uu3dBtEoc15-_HL7qVqv-8FQ_OvuXW)

12. Розуміння різних типів сонячних панелей: всебічний посібник [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://energy.ironws.com/uk/panels/understanding-different-types-of-solar-panels/>

13. Мисак Й.С. Сонячна енергетика. – Львів: Видавництво: Львівська політехніка, 2014. – 340с.

14. Гальчак В.П. Сонячна енергія та інсоляція. – К.: Магнолія, 2024. – 242 с.

15. З чого зроблена сонячна батарея [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://joule.net.ua/ua/articles/z-chogo-zroblena-sonyachna-batareya>.

16. Як влаштована сонячна батарея [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eenergy.com.ua/baza-znan/yak-vlashtovana-sonyachna-batareya/>.

17. Підвищення ефективності роботи сонячних панелей при використанні МРРТ – контролера [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/download/3222/1135>.

18. ККД сонячних панелей [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://sunsayenergy.com/technology/efektivnist-kkd-sonyachnih-batarey>.

19. Solar tracking system without Arduino [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=fCeQrjjJWQI>.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 85
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

20. Розробка структури слідкуючого електропривода сонячної фотоелектричної станції [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/viewFile/13115/11038>.

21. Електропривод. Структура і загальні відомості [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/metod/esa/teoriya\\_elektroprivoda/konspekt\\_lekciy.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/metod/esa/teoriya_elektroprivoda/konspekt_lekciy.pdf).

22. Схеми та способи підключення сонячних батарей [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/shemi-ta-sposobi-pidklyuchennya-sonyachnih-batarej-yak-pravilno-provesti-montazh-sonyachnoyi-paneli-n/>.

23. Підключення сонячних батарей: схеми та способи [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://journal.vencon.ua/ua/kakoe-byvaet-soedinenie-solnechnyh-panelej>.

24. Крокові двигуни Fulling Motor [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://techcom.kh.ua/ua/g102093281-shagovye-dvigateli-fulling?srsId=AfmBOoo9CiF-yDXBn9Gic2mmydgY5niKs4SE7N63p1rQazkJtDSfcmz1>.

25. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А.В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с.

26. Деталі машин. Розрахунок та конструювання : підручник / Г.В. Архангельський, М.С. Воробйов, В.С. Гапонов, О.І. Дубинець, О.І. Пилипенко, А.В. Гайдамака, С.Л. Панов, А.С. Столбовий. – Київ : Талком, 2014. – 684 с.

27. Курмаз Л. В. Основи конструювання деталей машин : навч. Посібник / Л. В. Курмаз. – Харків : Видавництво «Підручник НТУ ХП», 2010. – 532 с.

28. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник / В.Т. Павлице. – Львів : Афіша, 2003. – 560 с.

29. Герасименко В. В. Моделювання зубчастих коліс та валів : навч. посібник / В.В. Герасименко, Д.Ю. Бородін, І.М. Белих. – Харків : ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ», 2019. – 164 с.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		