

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка системи керування електроприводом сучасних
сонячних фотоелектричних станцій»**

**«Development of an electric drive control system for modern
solar photovoltaic power plants»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу групи
АК-23 М-2 (1,4)

174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

_____ Ратушний Д.В.

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи

к.т.н, професор

_____ Каліч В.М.

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент

_____ 2024 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	
1 Призначення та область застосування системи керування електроприводом сучасних сонячних фотоелектричних станцій.....	
1.1 Перспективи використання нетрадиційних джерел енергії на основі Сонячної енергії.....	
1.2 Визначення середніх місячних значень енергії Сонця, яка потрапляє на поверхню Землі	
1.2.1 Імовірнісна оцінка тривалості сонячного саява.....	
1.2.2 Потенціал сонячної енергії Кіровоградської області	
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови системи керування електроприводом сучасних СФС	
2.1 Огляд існуючих систем сонячних електростанцій	
2.2 Підходи до збільшення коефіцієнта корисної дії сонячних електростанцій.....	
2.3 Розробка і уточнення вимог до системи керування електроприводом сучасних СФС	
2.3.1 Обґрунтування застосування електроприводу в системі керування електроприводом сучасних СФС	
2.3.2 Електроприводи, які застосовуються в сучасних системах керування	
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень системи автоматичної керування електроприводом сучасних СФС	
3.1 Основні режими роботи системи автоматичної керування електроприводом сучасних СФС	
3.2 Схема слідкуючого електроприводу системи керування та особливості роботи.....	
3.3 Сонячні батареї, які використовують в геліоустановках	
3.4 Система наведення сонячної фотоелектричної станції	

3.5	Застосування динамічного гальмування при поверненні панелі у початковий стан
3.6	Опис датчиків наведення на Сонце
3.7	Розрахунок реверсивного мостового підсилювача з транзисторами в ключовому режимі
3.8	Мікроконтролерна система керування сонячним трекером
3.9	Вибір та обґрунтування електродвигуна
3.10	Обґрунтування основної структури слідкуючого електроприводу сонячних фотоелектричних станцій
3.11	Оцінка стійкості розробленої системи
4	Дослідження системи керування електроприводом сучасних СФС
4.1	Дослідження слідкуючого електроприводу системи орієнтації
4.2	Розрахунок ефективності використання електроприводу в системі керування.....
	Висновок.....
	Література.....
	Додаток А. Охорона праці.....

ВСТУП

Однією з актуальних проблем сучасності є пошук і розвиток альтернативних джерел енергії. Людство стрімко виснажує природні запаси органічного палива, що накопичувалися протягом сотень мільйонів років. Наразі близько 90% світового енергоспоживання забезпечується завдяки викопним ресурсам, таким як нафта, природний газ і вугілля [1]. У зв'язку з цим усе більше уваги приділяється відновлювальним джерелам енергії, зокрема геотермальній енергії, енергії вітру та сонячному випромінюванню. Особливу перспективу має технологія прямого перетворення сонячного світла в електроенергію за допомогою напівпровідникових фотоелектричних елементів, які об'єднуються у сонячні модулі (solar modules). Цей підхід сприяє ефективному використанню екологічно чистих джерел енергії, зменшуючи залежність від викопного палива.

Стаціонарні системи, такі як сонячні батареї, геліосистеми для нагрівання води, концентратори, геліостати (дзеркала), радіовимірювальні сенсори та інші подібні пристрої, здобули значну популярність завдяки своїй ефективності. Основним призначенням цих систем є трансформація сонячної енергії у різні види, зокрема електричну чи теплову. Дослідження показали, що постійна орієнтація обладнання на джерело світла під оптимальним кутом, близьким до 90 градусів, дає змогу збільшити ефективність виробництва енергії. Порівняння показало, що слідкуючі системи перевершують стаціонарні за обсягом виробленої енергії на 30–40%, незалежно від пори року.

Одним із ключових завдань сучасного етапу розвитку енергетики є впровадження комплексу заходів, спрямованих на підвищення конкурентоспроможності енергетичних установок, що працюють на базі відновлюваних джерел енергії. Особливу увагу приділяють аналізу та впровадженню передових технологій використання ВДЕ, а також їх ефективним комбінаціям. Застосування таких рішень у конкретних регіональних умовах

доводить свою економічну доцільність, технічну ефективність і соціальну значимість, сприяючи сталому розвитку енергетичного сектору.

Застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) розглядається як невід’ємна та природна складова стратегії сталого розвитку територій. Це сприяє формуванню основних напрямків модернізації інженерної інфраструктури регіонів, а також пропонує ефективні підходи до вирішення актуальних завдань.

Аналізуючи зазначені аспекти, можна передбачити можливий дефіцит енергетичних ресурсів, що разом із супутніми економічними викликами може вплинути на стабільність розвитку України.

Тому необхідні комплексні дії:

- організація і модернізація промисловості;
- Розробка нових джерел енергії, зокрема альтернативних методів генерації, у поєднанні із застосуванням сучасних технологій енергозбереження;
- зниженням викидів парникових газів.

Основною метою дослідження є підвищення енергоефективності слідкуючого електроприводу шляхом розробки системи керування, яка буде стійкою до змін параметрів самої системи та сприятиме зменшенню споживання електроенергії, необхідної для компенсації зовнішніх збурювань. Для досягнення цієї мети були сформульовані ключові завдання, які стали основою випускної кваліфікаційної роботи:

- Визначення ключових вимог до слідкуючого електроприводу, що використовується в сучасних сонячних фотоелектричних станціях.
- Розробка методології оцінки енергетичної ефективності слідкуючого електроприводу для сонячних фотоелектричних систем.
- Обґрунтування та створення підходу до розрахунку потужності слідкуючого електроприводу з урахуванням специфічних кліматичних умов певного регіону.
- Моделювання одноконтурних і двоконтурних систем слідкуючих електроприводів із визначенням оптимальних параметрів для кожної моделі.
- Проведення аналізу, розробка рекомендацій і визначення параметрів для ефективного функціонування слідкуючих електроприводів.

Для реалізації поставлених завдань було застосовано широкий спектр методів, включаючи математичний аналіз, принципи теорії електроприводів, основи електроніки та мікросхемотехніки. Крім того, використовувалися концепції автоматизованого керування, а також підходи до математичного та комп'ютерного моделювання, що дозволило забезпечити точність і ефективність вирішення науково-технічних задач.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- Створено принципову схему для системи управління електроприводом постійного струму, що враховує особливості роботи обладнання.
- Розроблено рівняння, які описують одноконтурну та двоконтурну структуру системи слідкуючого електропривода СФЕС, забезпечуючи їх оптимальну роботу.
- Запропоновано математичний опис системи замкненого слідкування (СЗС), що демонструє стійкість до змін параметрів керування, підвищуючи її надійність та адаптивність.

Обґрунтованість та надійність наукових висновків і запропонованих рекомендацій підтверджуються аналізом експериментально отриманих даних, які були зібрані в процесі дослідно-експлуатаційних випробувань. Додаткову впевненість у правильності результатів забезпечує співставлення теоретичних розрахунків із показниками, отриманими за допомогою комп'ютерного моделювання, що дозволяє оцінити їхню точність та ефективність.

На захист виносяться:

- Представлена схема керування електроприводом для системи ДПС.
- Запропоновані нові рівняння для одноконтурної та двоконтурної конфігурацій системи СЕП СФЕС.
- Розроблено рівняння системи наведення, яка має змінну структуру та інтегрований датчик стеження.
- Отримані результати досліджень роботи СФЕС із системою електроприводу можуть бути застосовані в процесі проєктування геліотехнічних установок.

Практична значущість проведеної роботи включає наступне:

- Отримані аналітичні дані можуть використовуватися під час розробки та вдосконалення режимів функціонування СЕП СФЕС різної потужності.

- Створена система придатна для експлуатації в ізольованих регіонах, віддалених від централізованих електромереж, а також для забезпечення роботи сигнальних базових станцій і GSM-ретрансляторів.

1 Призначення та область застосування системи керування електроприводом сучасних сонячних фотоелектричних станцій

1.1 Перспективи використання нетрадиційних джерел енергії на основі Сонячної енергії

Одним із ключових завдань у сучасних реаліях є впровадження комплексу заходів, спрямованих на суттєве підвищення конкурентоспроможності енергетичних установок, що працюють на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Важливо також визначити найбільш перспективні технології використання ВДЕ та оптимальні їх комбінації, адже їх впровадження в конкретному регіоні може бути обґрунтованим з економічної, технічної та соціальної точок зору. При цьому роль ВДЕ розглядається як невід'ємний і важливий компонент програми сталого розвитку територій, який визначає стратегічні напрями модернізації інженерної інфраструктури регіону та пропонує ефективні шляхи вирішення актуальних завдань.

На основі викладеного вище можна зробити висновок про ймовірний енергетичний дефіцит, а також виникнення низки економічних труднощів в Україні.

Для запобігання цим проблемам необхідно здійснити цілісний підхід, що включатиме активізацію процесів модернізації промислових об'єктів, розробку та впровадження нових джерел енергії, зокрема альтернативних. Водночас важливо забезпечити широкомасштабне застосування енергоощадних технологій, скорочення обсягів викидів парникових газів та підвищення ефективності використання ресурсів.

Серед ключових принципів, які сприяють комплексному підвищенню ефективності систем енергопостачання, варто виділити наступні:

а) застосування системного підходу для покращення показників енергоефективності;

б) впровадження енергоощадних стандартів у процесі проектування;

в) інтеграція сучасних автономних систем енергопостачання, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та вторинних енергетичних ресурсів, які поєднують економічність із екологічною безпечністю.

Енергетичні комплекси, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), найбільшою мірою відповідають зазначеним вище критеріям. Сьогодні впровадження альтернативних та поновлюваних джерел енергії стає все більш актуальним через низку важливих чинників:

- створення можливостей для забезпечення енергією віддалених, екологічно вразливих та важкодоступних регіонів;

- зменшення потреби у будівництві нерентабельних і технічно складних ліній електропередач, особливо в ізолюваних районах;

- сприяння ефективнішому плануванню графіків завантаження обладнання на електростанціях, враховуючи сезонні коливання попиту на енергію;

- зниження рівня шкідливих викидів, таких як CO₂ і NO₂, що відкриває можливості фінансування будівельних проєктів через залучення коштів за рахунок квот на викиди.

Серед усіх існуючих джерел енергії сонячна радіація виділяється завдяки значним ресурсам, екологічній безпечності та доступності в усіх регіонах світу, що робить її однією з найбільш перспективних. За рік на поверхню Землі потрапляє близько $1,05 \times 10^{18}$ кВт·год сонячної енергії. Без завдання шкоди навколишньому середовищу можливо ефективно використовувати близько 1,5% цієї енергії, що становить приблизно $1,62 \times 10^{16}$ кВт·год на рік. Це відповідає близько 2×10^{12} тонн умовного палива. Для енергетичних установок, що використовують сонячну енергію, основними параметрами є коефіцієнт корисної дії (ККД) при перетворенні енергії в електрику та її економічна доступність. Одним з ключових шляхів підвищення ефективності роботи таких геліоустановок

є вдосконалення систем слідкуючих електроприводів, які забезпечують безперервне орієнтування на Сонце для максимального збору енергії.

Дослідження енергетичних характеристик різних видів двигунів та аналіз втрат потужності у залежності від ключових параметрів електроприводів дали змогу виявити системи, які найкраще адаптовані до заданих навантажень. Проте чинні системи управління електроприводами не забезпечують необхідного рівня точності та якості перехідних процесів. Варто також зазначити, що реалізація технічних рішень для систем стеження в електроприводах часто супроводжується низкою технологічних і конструктивних труднощів.

1.2 Визначення середніх місячних значень енергії Сонця, яка потрапляє на поверхню Землі

Щосекунди Сонце випромінює на Землю значну кількість енергії, частина якої досягає поверхні планети. Кількість цієї енергії, що припадає на 1 м² площі, орієнтованої перпендикулярно до напрямку сонячних променів, є відносно стабільною і протягом року змінюється не більше ніж на ±3,4%.

Для Кіровоградського регіону інтенсивність сонячного випромінювання на поверхню землі становить приблизно 1000–1100 Вт/м². В Україні функціонує мережа метеорологічних станцій, які здійснюють моніторинг і реєстрацію тривалості сонячного освітлення, що дозволяє оцінювати потенціал використання сонячної енергії для різних потреб.

З використанням спеціального розрахункового методу, який базується на аналізі проміжних параметрів, зареєстрованих метеорологічними станціями, можливо визначати кількісні показники сонячної енергії. Для території України основним параметром, який використовується у цих обчисленнях, є тривалість періодів сонячного сяйва.

Для непрямого розрахунку існує цілий ряд емпіричних формул

$$Q = Q_0 \cdot [1 + (1 - a) \cdot S / S_0], \quad (1.1)$$

$$Q = a + b \cdot S, \quad (1.2)$$

$$Q = Q_0 \cdot (a \cdot \cos \varphi + b(S / S_0)), \quad (1.3)$$

$$Q = Q_0 \cdot (a + b \cdot (S / S_0)) \quad (1.4)$$

Визначення виразу, який найбільш точно відображає взаємозв'язок між загальною кількістю сонячної енергії та тривалістю сонячного випромінювання, можливе лише на основі аналізу статистичних даних. Ці дані були зібрані на актинометричних станціях регіону з глибиною опрацювання протягом 2-3 років. Використовуючи формулу (1.4) та відповідні коефіцієнти a і b , було здійснено розрахунок величин загальної сонячної енергії для Кіровоградської області. Для цього застосовувалися усереднені показники тривалості сонячного сьйва, отримані з даних метеорологічних станцій області за період, що охоплює 5-10 років.

Наведені результати експериментів базуються на ретельному аналізі значного обсягу даних, що дає підстави вважати їх надійними у відображенні змін сумарної сонячної енергії в досліджуваному регіоні. Отримані показники дозволяють зробити початкові висновки щодо перспективності використання сонячної енергії як джерела. Водночас, для більш обґрунтованих висновків необхідно мати точну інформацію про ймовірну тривалість сонячного випромінювання протягом кожної доби в різні місяці року.

1.2.1 Імовірнісна оцінка тривалості сонячного сьйва

Тривалість сонячного випромінювання визначається шляхом аналізу часу, протягом якого спостерігається це явище у певні часові проміжки. Застосування імовірнісних методів дозволяє виявити найбільш характерні години, коли можна очікувати появу сонячного випромінювання. Досвід використання таких підходів демонструє, що на основі багаторічних спостережень можна доволі точно прогнозувати цей показник на сучасний період. Для проведення імовірнісної оцінки тривалості сонячного сьйва були проаналізовані дані метеорологічних

спостережень, накопичені за 5–10 років на території Кіровоградської області. Осереднені значення цих показників (табл.1.1), із врахуванням допустимої статистичної похибки, дають змогу достовірно відобразити можливу залежність тривалості сонячного випромінювання в цьому регіоні.

Результати аналізу свідчать, що протягом усіх місяців найвища ймовірність появи сонячного саява спостерігається приблизно в обідній час. Протягом доби тривалість сонячного освітлення розподіляється відносно рівномірно з максимальною інтенсивністю біля середини дня. У період з жовтня по січень, який припадає на осінньо-зимові місяці, ймовірність появи сонячного випромінювання не перевищує 50%, що свідчить про зниження сонячної активності в цей сезон.

Таблиця 1.1 – Ймовірність тривалості сонячного випромінювання в кліматичних умовах Кіровоградського регіону

Місяці	Розподіл сонячного саява на добу по годинах													
	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Січень			0,08	0,23	0,41	0,46	0,5	0,48	0,46	0,25				
Лютий		0,06	0,31	0,48	0,62	0,63	0,62	0,63	0,55	0,43	0,18			
Березень	0,04	0,25	0,43	0,56	0,67	0,67	0,68	0,7	0,68	0,58	0,44	0,16		
Квітень	0,54	0,55	0,63	0,62	0,7	0,71	0,72	0,72	0,68	0,66	0,63	0,52	0,26	
Травень	0,64	0,67	0,68	0,74	0,72	0,74	0,73	0,69	0,67	0,63	0,59	0,56	0,45	0,21
Червень	0,65	0,68	0,68	0,72	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,67	0,64	0,55	0,5	0,28
Липень	0,65	0,68	0,68	0,72	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,67	0,64	0,55	0,5	0,28
Серпень	0,43	0,61	0,67	0,68	0,72	0,72	0,72	0,72	0,68	0,65	0,61	0,54	0,35	0,2
Вересень	0,25	0,48	0,57	0,63	0,64	0,65	0,66	0,64	0,62	0,56	0,51	0,28		
Жовтень		0,18	0,31	0,4	0,41	0,44	0,46	0,41	0,38	0,33	0,24			
Листопад			0,18	0,32	0,38	0,42	0,38	0,4	0,36	0,22				
Грудень			0,05	0,26	0,32	0,37	0,41	0,38	0,37	0,13				

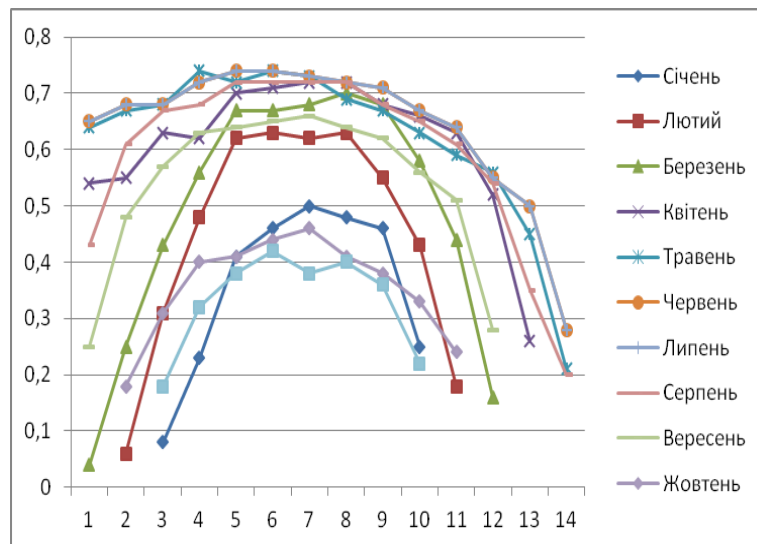


Рисунок 1.1 – Вірогідність тривалості сонячного випромінювання для умов Кіровоградської області

Стислий аналіз ймовірної тривалості періодів сонячного випромінювання для Кіровоградської області демонструє значний потенціал геліоенергетичних ресурсів цього регіону України. Ці ресурси відкривають широкі перспективи для використання у вирішенні практичних завдань, пов'язаних із розвитком відновлюваних джерел енергії, зокрема технологій, які базуються на використанні сонячної енергії.

1.2.2 Потенціал сонячної енергії Кіровоградської області

Виходячи з наведеного вище, кількість загальної енергії Сонця, яка надходить на горизонтальну поверхню протягом доби, можна обчислити за формулою (1.5). Для визначення сумарної сонячної енергії, що накопичується на горизонтальній поверхні протягом усього сезону або року, використовується метод простого підсумовування величин $Q_{\text{міс}}$. Щоб розрахувати обсяг енергії, яку безпосередньо генерує електроустановка, слід застосувати відповідне рівняння.

$$Q_{\text{пол}} = Q_i \cdot R \cdot \eta, \quad (1.5)$$

де Q_i – сумарна сонячна енергія за певний період (день, місяць, сезон, рік); R – коефіцієнт, що визначає співвідношення між сонячною енергією, яка досягає

горизонтальної площини, та енергією, що надходить на нахилену поверхню, залежить від параметрів розташування приймача. До таких параметрів належать географічне місце встановлення та кут нахилу, під яким розміщено поверхню для поглинання сонячного випромінювання; η – сумарний ККД сонячної установки.

Загальна кількість сонячної енергії, яка протягом місяця надходить на горизонтально розташовану поверхню, розраховується за наступним рівнянням:

$$Q_{\text{міс}} = Q_{\text{доб}} \cdot N \cdot p(\tau), \quad (1.6)$$

де $Q_{\text{міс}}$ – сумарна сонячна енергія, що потрапляє протягом місяця Дж/м²; $Q_{\text{доб}}$ – те ж протягом доби даного місяця (визначається за формулою 1.6); N – число днів у місяці; $p(\tau)$ – забезпеченість (імовірність) сонячного випромінювання в даному місяці.

Обсяг сонячної енергії визначався відповідно до використаних формул. Дані про фактичну тривалість сонячного освітлення були взяті на основі багаторічних метеорологічних спостережень, зібраних у зазначеному регіоні (табл. 1.2). Для зручності подальших обчислень кількість сонячної енергії переводилася в одиниці кіловат-годин, де 1 кВт·год відповідає 3,6 МДж.

Таблиця 1.2 – Параметри питомої сонячної енергії за період одного року

Параметри сонячної радіації	Місяці											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Qдоб Вт/м2	290	550	870	1300	1560	1890	1830	1570	1100	500	230	160
Qміс кВт/м2	13,15	36,7	80	148,9	201,1	242,2	241,8	194	103	29,7	9	5

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови системи керування електроприводом сучасних СФС

2.1 Огляд існуючих систем сонячних електростанцій

Обладнання, призначене для трансформації сонячного випромінювання в електричну енергію, отримало назву геліоустановок. Ці системи забезпечують ефективне використання відновлюваних джерел енергії, що сприяє зменшенню залежності від традиційних енергоресурсів і знижує негативний вплив на навколишнє середовище.

Сонячна батарея являє собою пристрій, призначений для виробництва альтернативної енергії, який перетворює сонячне світло на електричну енергію. Найбільш проста конструкція сонячної панелі складається з набору сонячних елементів, які об'єднані з напівпровідниковим фотоелектричним генератором. Принцип роботи таких елементів базується на використанні внутрішнього фотоелефекту, що дозволяє ефективно перетворювати світлову енергію на електричний струм. У результаті експлуатації сонячна батарея виробляє постійний струм, який може бути безпосередньо використаний для живлення різних пристроїв, збережений у акумуляторних батареях для подальшого застосування

або перетворений на змінний струм з напругою 220 В для роботи побутових приладів.

Конструкції цього типу дозволяють створювати установки практично будь-якої потужності (рис. 2.1), які, до того ж, вирізняються простотою обслуговування. Основним недоліком фотоелектричних перетворювачів є їх висока вартість та невисокий коефіцієнт корисної дії. Фотоелектричний ефект виникає в сонячних панелях під час їх освітлення світловими хвилями, близькими до інфрачервоного спектра. У напівпровідникових елементах, виготовлених на основі кремнію, енергія поглинутих фотонів перетворюється на електричну за рахунок р-п переходу. Для підвищення ефективності часто застосовують елементи, створені з арсеніду галію та алюмінію, які дозволяють досягати коефіцієнта корисної дії до 35%. Проте, такі матеріали значно дорожчі порівняно з кремнієвими аналогами.

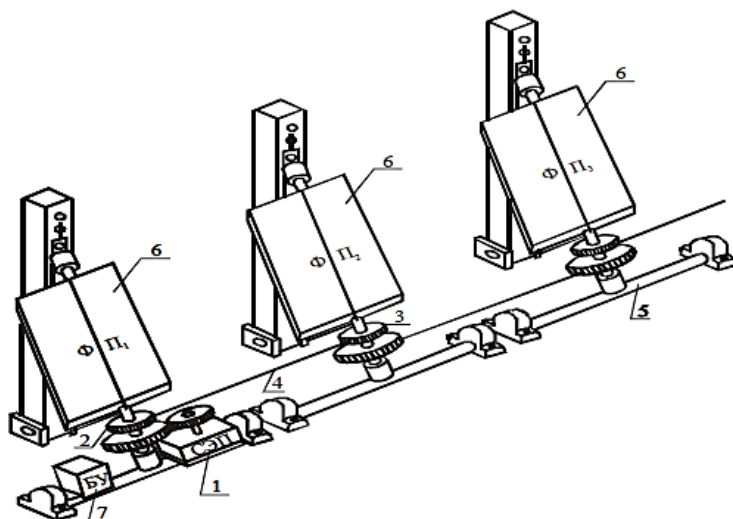


Рисунок 2.1 – Конструкція модульної енергетичної фотоелектричної станції

На сьогоднішній день ефективність перетворення сонячної енергії фотоелементами, виготовленими на основі монокристалічного кремнію, становить приблизно 15–17%. Проте витрати на створення геліосистем, навіть якщо врахувати лише виробництво самих фотоелементів, залишаються значно вищими у порівнянні з витратами на будівництво атомних, теплових або гідроелектростанцій. Це зумовлено тим, що сонячне випромінювання має низьку щільність, що вимагає збору енергії з великих площ, покритих дорогими

напівпровідниковими матеріалами. Як наслідок, собівартість отриманої електроенергії значно перевищує ту, що виробляється традиційними методами.

З плином часу спостерігається поступове зниження ціни на сонячні елементи, що головним чином відбувається завдяки здешевленню напівпровідникових матеріалів. У зібраному вигляді вартість фотоелектричних геліосистем становить від 1 до 3 доларів за ват потужності, тоді як ціна однієї кіловат-години отриманої енергії досягає приблизно 0,25 долара.

Одним із перспективних методів зменшення вартості сонячної електроенергії є використання спеціальних концентраторів випромінювання. Завдяки цьому підходу можна істотно скоротити площу сонячних елементів, а відповідно й витрати на їх виробництво. Вартість системи зменшується пропорційно до ступеня концентрації сонячного випромінювання, яке досягається за допомогою дзеркальних або лінзових структур, що фокусують світло на меншій активній поверхні.

Однак у процесі використання концентраторів виникає низка складнощів. Перш за все, збільшення інтенсивності випромінювання призводить до зростання щільності фотоструму, що потребує вдосконалення конструкції сонячних елементів для зменшення омичних втрат. Другою важливою проблемою є підвищення теплового навантаження на сонячні модулі, що вимагає розробки високоефективної системи відведення тепла. Третім викликом стає необхідність забезпечення максимально точного орієнтування панелей на Сонце. У зв'язку з цим доцільність використання концентраторів повинна оцінюватися як баланс між економією завдяки зменшенню площі фотоперетворювачів і додатковими витратами на вирішення зазначених технічних завдань.

На сьогоднішній день сонячні електростанції (СЕС), що використовують теплові двигуни, здебільшого реалізуються у форматі баштових установок або турбогенераторних систем. У конструкціях баштового типу застосовується центральний приймач енергії, оточений полем геліостатів, які забезпечують високу концентрацію сонячного світла. Контроль та керування такими

установками здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що працює на базі персонального комп'ютера.

На електростанціях модульного типу використовується велика кількість модулів, кожен із яких складається з приймача сонячної енергії та концентратора випромінювання. Такі станції виявляються значно економічно вигіднішими, ніж баштові, особливо при відносно невеликій потужності.

У більшості випадків у модульних сонячних електростанціях застосовуються лінійні концентратори енергії сонця, як це проілюстровано на рис.2.2–2.4. Подібна конструкція забезпечує оптимальну ефективність використання сонячного випромінювання, сприяючи зменшенню витрат і підвищенню рентабельності станцій.

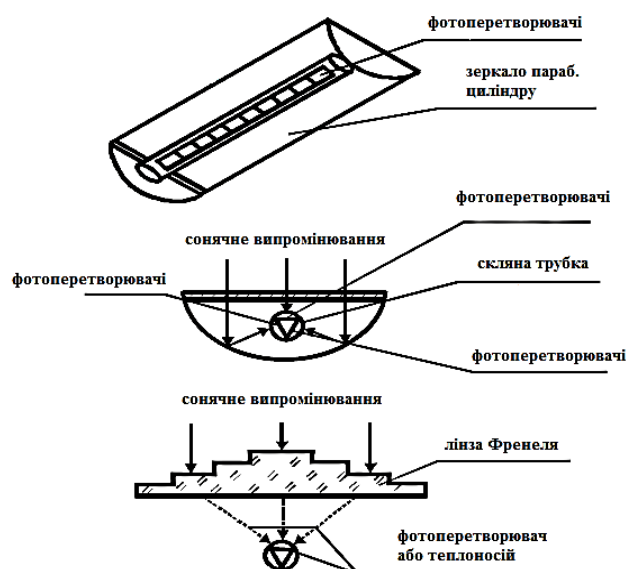


Рисунок 2.2 – Оптичні концентратори сонячної енергії

За умов достатнього рівня сонячної радіації система автоматично орієнтується на Сонце за рахунок живлення від акумуляторної батареї енергозабезпечення (НЕ). Електрична енергія, яку генерує фотоелектрична станція (ФЕС), подається на статичний електронний перетворювач енергії (ПРЕ). Цей пристрій розподіляє отриману енергію між блоком акумуляування енергії (БАУ), системою накопичення та споживання (СНС), енергетичними установками (ЕУ), кінцевими споживачами та резервними джерелами. Теплова енергія, що відводиться від ФЕС (рідинна або повітряна), також використовується для задоволення потреб користувачів. У разі зникнення видимого диска Сонця

система автоматично припиняє роботу та залишається в останньому робочому положенні, очікуючи на відновлення сонячного освітлення. Як тільки Сонце знову з'являється, установка автоматично орієнтується на нього й відновлює роботу.

Якщо швидкість вітру перевищує 15 м/с, система ДВН активує САС, незалежно від рівня радіаційного фону. У такій ситуації зупинена установка переходить у режим очікування, доки сила вітру не зменшиться до допустимого рівня, після чого відбувається автоматичне відновлення її роботи.

Після орієнтування концентратора на Сонце система подає сигнали до пускового механізму турбосистеми та одночасно до регулятора її робочих режимів. Електричний стартер, що отримує енергію від незалежного джерела, приводить турбіну в рух. У цей момент екран регулятора відкривається, забезпечуючи надходження сонячної енергії до приймача випромінювання. Таким чином, здійснюється запуск турбіни й активація всієї системи.

Після орієнтування концентратора на Сонце система подає сигнали до пускового механізму турбосистеми та одночасно до регулятора її робочих режимів. Електричний стартер, що отримує енергію від незалежного джерела, приводить турбіну в рух. У цей момент екран регулятора відкривається, забезпечуючи надходження сонячної енергії до приймача випромінювання. Таким чином, здійснюється запуск турбіни й активація всієї системи.

Розігріте робоче середовище спрямовується через систему лопаток турбіни, приводячи її в обертальний рух із швидкістю, що може досягати кількох десятків тисяч обертів за одну хвилину.

Генератор, встановлений на спільному валу з турбіною, генерує електроенергію, яка надходить до перетворювача-розподільника. Цей пристрій забезпечує подальший розподіл отриманої енергії до споживачів, зокрема до блоків автоматичного управління (БАУ), РРТС, СНС, а також до обладнання для виробництва водневого палива за допомогою електролізу. Невикористана електрична енергія спрямовується до накопичувачів енергії для збереження або подальшого використання.

РРТС забезпечує підтримку оптимальних параметрів роботи турбосистеми, таких як швидкість обертання і температура, шляхом регулювання збудження генератора та положення захисного екрану, що перекриває приймач випромінювання. У випадку, коли рівень радіації падає нижче допустимих меж, екран автоматично закривається, а турбіна припиняє свою роботу. Після появи сонячного світла система відновлює цикл функціонування. Увечері, коли пристрій досягає кінцевої точки, він повертається у вихідне положення, що відповідає ранковому часу, і відключається до наступного світанку, забезпечуючи ефективність і безперервність роботи.

Окрім виробництва електроенергії, установка також генерує теплову енергію. Газ, який виходить із турбіни після завершення робочого циклу, має температуру приблизно 3000°C . Цей гарячий відпрацьований газ спрямовується до теплового обмінника (ТОН), де його енергія використовується для нагрівання води та приготування їжі. Такий підхід дозволяє ефективно поєднувати процеси виробництва електрики та тепла, забезпечуючи раціональне використання ресурсів.

Одночасно з турбінною системою функціонує фотогальванічна електростанція (ФЕС), яка забезпечує подачу струму в підключений розподільний елемент (ПРЕ) навіть за умов низького рівня радіації, коли ефективність турбінної установки знижується. Завдяки такій взаємодії, сонячно-газотурбінна енергетична система здатна виконувати низку завдань: генерувати електроенергію, забезпечувати теплову енергію для нагрівання води, приготування їжі, а також виробляти водневе паливо, яке може використовуватися для живлення двигунів внутрішнього згоряння або роботи нагрівальних пристроїв.

До основних недоліків систем електричних установок (СЕУ) можна віднести їхню складну конструкцію та високу вартість. Крім того, такі системи характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії, що для турбін з малою потужністю (у діапазоні $0,5\text{--}1\text{ кВт}$) становить лише близько 6%. До цього додаються підвищені вимоги до якості підшипників та ретельного балансування, що суттєво ускладнює їхнє використання і технічне обслуговування.

Основними параметрами є вихідна потужність P і коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{\phi} = \frac{P_{MAX}}{P_{CB}}, \quad (2.1)$$

де P_{max} – максимальна потужність, яку можна отримати від фотоелемента, Вт; P_{CB} – потужність потоку випромінювання, падаючого на фотоелемент, Вт.

2.2 Підходи до збільшення коефіцієнта корисної дії сонячних електростанцій

У цій магістерській роботі основну увагу приділено аналізу прямого способу перетворення енергії Сонця в електричну із застосуванням кремнієвих сонячних панелей. Для підвищення коефіцієнта корисної дії батареї було використано результати досліджень, які враховують особливості сонячного випромінювання в різні сезони, зокрема влітку та взимку.

У роботі також представлено структурну схему, що ілюструє процес аналізу сонячного випромінювання (рис. 2.5).

Сонячний орієнтуючий пристрій оснащений рухомою основою, яка забезпечує обертання навколо вертикальної осі в діапазоні від 0° до 270° і навколо горизонтальної осі в межах від 0° до 90° . Для досягнення положення, при якому сонячний промінь падає перпендикулярно до поверхні модуля (позначеного як елемент 2), необхідно використовувати спеціальний механізм наведення, оснащений фотодатчиками (позначений як елемент 3). Цей механізм забезпечує точне налаштування орієнтації модуля відносно Сонця. Потужність, яку генерує модуль, вимірюється за допомогою спеціального приладу – ватметра (позначеного як елемент 4).

Дослідження підтвердили, що різниця у показниках між слідкуючою та стаціонарною системами за умов хмарності нижче 70% коливається в межах 27–35%.

Для забезпечення перпендикулярного кута падіння сонячних променів на панель, який становить 90° , застосовують кілька методів наведення:

Метод 1 – ручне регулювання. Це простий і найнадійніший підхід, при якому оператор самостійно здійснює сезонну орієнтацію трекера. Незважаючи на найнижчу ефективність порівняно з іншими способами, відсутність складної вимірювальної апаратури та мінімальна кількість рухомих елементів забезпечують високу надійність цього методу. Поломки механічних компонентів у такій системі трапляються вкрай рідко.

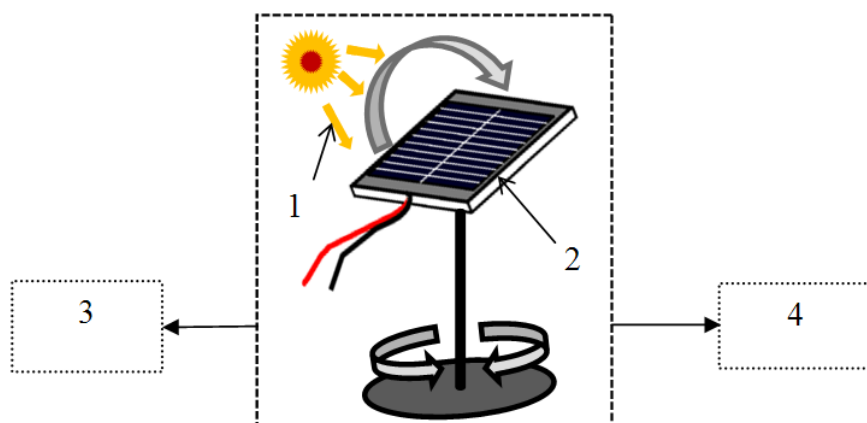


Рисунок 2.5 – Структурна схема вимірювального пристрою

Метод 2 – використання фотодатчиків. Це досить популярний підхід, який базується на інтеграції чотирьох фотоелектричних сенсорів, розташованих по краях панелі або з перегородкою між ними. Сенсори встановлені в спеціальних оболонках, що забезпечують сприйняття лише вузького пучка світла. У ситуації, коли площа сонячної панелі розташована перпендикулярно до променів сонця, кожен датчик отримує однаковий рівень освітлення, і, відповідно, генерується рівна напруга. Якщо положення сонця змінюється, сенсори фіксують різницю в напрузі, що активує систему управління. Привод автоматично коригує орієнтацію панелі до досягнення рівномірного значення напруги на всіх сенсорах, забезпечуючи максимальну ефективність роботи панелі.

Система управління, що використовує фотодатчики, має два основні недоліки:

- По-перше, схильність датчиків до забруднення, що призводить до збоїв у їх роботі та потреби в регулярному калібруванні. Одним із рішень може бути встановлення датчиків у захисних колбах для зменшення впливу забруднень.

- По-друге, для цього типу приводу характерні часті механічні несправності, що впливають на надійність роботи всієї системи.

Альтернативний підхід, третій за способом реалізації, полягає у застосуванні програмного методу. Автономна система управління сонячними панелями налаштовується відповідно до циклічних рухів сонця. Такий підхід дозволяє оперативно змінювати програму, а за необхідності виконувати корекцію віддалено, що підвищує ефективність і зручність експлуатації.

На рис.2.6 показані вже існуючі трекери:

а) – із застосуванням ходового гвинта в поєднанні з повзунковою головкою, що має інтегрований редуктор для забезпечення вертикального переміщення, а також поворотної платформи, яка виконує горизонтальний рух.

б) – з використанням гідравлічної системи.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Двокоординатні системи для орієнтації на Сонце, які працюють на основі:

а) механізму ходового гвинта; б) гідравлічної привідної системи.

Головні переваги:

- Підвищення коефіцієнта корисної дії виробленої енергії;
- Спрощена структура електричної складової, що виключає потребу у використанні програматора, контролера та написанні програмного забезпечення;
- Повністю автоматизована система, яка працює без участі персоналу;

- Для управління будь-якою кількістю аналогічних установок (наприклад, масив сонячних панелей) достатньо лише одного датчика наведення разом із єдиним електронним блоком;

- Виробництво енергії з використанням екологічно безпечних технологій.

До недоліків відноситься:

- потреба у застосуванні альтернативного джерела енергії, наприклад, сонячної панелі. У такій системі енергоживлення періодично забезпечується за рахунок акумулятора, що накопичує енергію протягом світлового дня.

- набагато складніша система, порівняно зі стаціонарною.

2.3 Розробка і уточнення вимог до системи керування електроприводом сучасних СФС

Велика кількість установок з автономними джерелами живлення базується на системах електроприводів (СЕП), до яких висуваються особливо високі вимоги. Ці вимоги стосуються не лише їхньої надійності та енергетичної ефективності, але й забезпечення стабільності та якості функціонування як динамічних, так і статичних процесів.

Особливістю сучасних систем електроприводу (СЕП) є їх робота від автономних джерел живлення, що створює додаткові виклики при забезпеченні високих показників якості регулювання. Основною складністю є обмежений ресурс енергопостачання, що висуває вимоги до мінімізації енергетичних втрат, підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) та забезпечення якісного протікання динамічних процесів у таких системах. Для досягнення цих цілей необхідно створювати високодинамічні електроприводи, які мають широкий діапазон регулювання швидкості при плавному її змінюванні. Додатковою особливістю є те, що в деяких випадках автономні джерела живлення забезпечують знижену напругу. У таких умовах використання стандартної мережевої напруги 220/380 В є технічно недоцільним або навіть забороненим через потребу гарантування безпеки персоналу під час експлуатації обладнання у польових умовах. Зокрема, це

стосується ситуацій, коли захист від ураження електричним струмом у разі аварій є неможливим. До систем цього класу належать мобільні пристрої, які живляться від акумуляторних батарей з робочою напругою в межах 12–144 В, переносні електроінструменти, пересувні енергетичні комплекси, механізми для космічних і глибоководних операцій. Окрему групу становлять пристрої, що функціонують за умов значних динамічних навантажень і потребують широкого діапазону регулювання швидкості. До таких пристроїв відносяться радіолокаційні комплекси, системи стеження і наведення, а також високодинамічні механізми, що використовуються в морських, наземних, повітряних та космічних об'єктах. Виконавчі механізми таких пристроїв потребують СЕП із високими енергетичними характеристиками, компактними розмірами, підвищеним рівнем надійності, низьким рівнем шуму і вібрацій. Крім того, важливими є забезпечення електромагнітної сумісності з джерелом живлення та стійкість до значних динамічних навантажень, таких як часті реверси, велика кількість ввімкнень за годину або відпрацювання ступінчастих керуючих сигналів. Усе це визначає специфіку роботи систем електроприводу, які використовуються у високодинамічних виконавчих механізмах сучасних установок.

Вимоги до автономних систем електроприводу (ЕП) можна умовно розділити на дві основні категорії:

1. Загальні вимоги, які визначаються специфікою технологічного процесу. До них належать: діапазон регулюваних швидкостей, точність у статичному та динамічному режимах, межі змін крутного моменту та прискорення, ширина частотного діапазону, а також максимальний час, необхідний для здійснення регулювання та стабілізації параметрів.

2. Спеціалізовані вимоги, що залежать від техніко-економічних характеристик обладнання. Сюди включають такі показники, як компактність і маса, вартість виготовлення, енергетична ефективність, рівень надійності, а також інші критерії, які визначають економічну доцільність і експлуатаційні особливості пристроїв.

Однією з ключових вимог до СЕП СФЕС є максимальне зменшення її маси та габаритів. Це обумовлено необхідністю компактного розміщення всієї потрібної апаратури в обмеженому просторі, забезпеченням зручного компонування двигуна і перетворювача частоти, а також підвищенням енергоефективності самої станції. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання простору, покращити технічні характеристики і знизити споживання ресурсів, що є особливо важливим для сучасних енергетичних систем.

Для забезпечення необхідного ресурсу працездатності обладнання важливо враховувати вимоги, спрямовані на підвищення його стійкості до негативного впливу факторів навколишнього середовища. Зокрема, це стосується захисту від впливу атмосферних опадів, проникнення вологи, потрапляння води, пилу чи бруду, дії високої вологості, різких перепадів тиску, недопустимих температурних режимів, а також роботи в умовах розрідженого чи іонізованого середовища. Однак ці вимоги нерідко суперечать необхідності оптимізації масогабаритних характеристик обладнання. Тому для досягнення балансу між зменшенням ваги і розмірів та забезпеченням високого рівня захищеності слід здійснювати комплексний пошук рішень у двох напрямках: вдосконалення масогабаритних параметрів і підвищення стійкості до впливу несприятливих умов експлуатації.

У процесі створення системи електропривода сонячної фотоелектричної станції (СЕП СФЕС) особливу увагу приділяють прийняттю рішень, які спрямовані на підвищення надійності силової частини електромеханічної системи. Одним із ключових аспектів для вдосконалення таких систем є використання напівпровідникових статичних перетворювачів, що активно застосовуються у сучасних рішеннях.

Це забезпечує оптимізацію енергоспоживання, стабільність роботи обладнання та підвищення ефективності системи загалом.

Електронні компоненти телекомунікаційного обладнання характеризуються високою чутливістю до впливу електромагнітних завад і вимагають стабільності параметрів живлячої напруги. Навіть незначні відхилення від номінальних значень

можуть призвести до негативних наслідків у роботі системи через недостатню стійкість до електромагнітних перешкод.

Серед ключових техніко-економічних вимог, які висуваються до СЕП СФЕС, можна виділити такі:

- забезпечення високої потужності та значного моменту на валу виконавчого двигуна за умов мінімізації ваги та розмірів конструкції;
- здатність приводу працювати з підвищеними перевантаженнями в режимах короткочасної або повторно-короткочасної експлуатації.
- висока ремонтпридатність;
- мала енергоємність;
- уніфікація вузлів та елементів;
- економічність і низька вартість.

Оскільки реалізувати повне поєднання всіх технічних вимог в межах одного пристрою практично неможливо, під час проектування конкретного СЕП СФЕС доводиться віддавати перевагу одним параметрам, жертвуючи іншими. При цьому технічні характеристики системи підтверджують доцільність створення високодинамічних рішень, які здатні забезпечити необхідний рівень продуктивності та відповідати ключовим критеріям ефективності.

- діапазон потужностей виконавчого електродвигуна 0,1-30кВт;
- діапазон зміни швидкості в межах до 50: 1 - 1000: 1;
- смуга пропускання частот 30-1000 Гц;
- короткочасне перевантаження по моменту кратністю до 2,5-3,0 і вище.

2.3.1 Обґрунтування застосування електроприводу в системі керування електроприводом сучасних СФС

На сьогодні у всіх країнах, що активно впроваджують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема сонячні фотоелектричні станції (СФЕС), широко використовуються технології стеження за положенням Сонця. Для цього

застосовують кілька основних типів електроприводів, що забезпечують точність і ефективність роботи системи. Серед таких рішень виділяють:

- Кроковий електропривод із програмним керуванням, який працює під управлінням обчислювальних машин.
- Кроковий слідкуючий електропривод, що функціонує в режимі автоматичного супроводу, керованого сигналами від датчика неузгодженості.
- Кроковий електропривод із годинниковим механізмом, який управляється задаючим генератором імпульсів (застосовується виключно в однокоординатних, або екваторіальних, системах).
- Електропривод постійного струму, що забезпечує безперервний автоматичний супровід Сонця.
- Релейний слідкуючий електропривод постійного струму, який працює в режимі покрокового автосупроводу.

Крокові електроприводи вважаються надмірно складними та дорогими для використання в геліоустановках. Окрім того, їх функціонування на низьких частотах обертання часто супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібрацій, що знижує ефективність і комфорт експлуатації. З огляду на це, більш доцільним і раціональним рішенням є застосування простих і економічних приводів релейного типу, які мають низку важливих переваг:

- При допустимій похибці, яка становить $\pm 10^\circ$, відсутня необхідність у безперервному автоматичному стеженні за положенням фотопанелі — достатньо виконати її поворот 8 разів протягом світлового дня на кут 20° . У цьому випадку максимальне відхилення не перевищуватиме $\delta_{\max} = 10^\circ$.
- Електричні витрати в режимі покрокового регулювання значно нижчі порівняно з режимом безперервного автоматичного стеження.
- Використання одного двигуна для реалізації режимів стеження і перекидання, який працює з номінальною частотою обертання, дозволяє спростити кінематичну схему та конструкцію електромеханічного приводу.

Релейні слідкуючі електроприводи характеризуються високою надійністю та конструктивною простотою, що робить їх зручними в експлуатації та обслуговуванні.

Нерухомі СФЕС, зорієнтовані суворо на південь, часто використовуються споживачами, переважно в приватному секторі. Зазвичай їх встановлюють на дахах існуючих будівель, коли немає можливості облаштувати системи стеження за сонцем. Це також характерно для регіонів, які піддаються сильним вітровим навантаженням, що може ускладнити застосування рухомих механізмів. Водночас, у всіх інших умовах проектувальники переважно надають перевагу встановленню систем стеження за сонячним світлом з використанням електроприводів для геліоустановок. Завдяки таким системам приводів СФЕС можна значно знизити витрати та виробляти більше електроенергії, що детальніше буде розглянуто далі.

У США та країнах Європейського Союзу приблизно половина сонячних фотоелектричних станцій (СФЕС) оснащена системами стеження за рухом сонця, що підвищує їх ефективність. У Росії також спостерігається зростання інтересу до впровадження цієї технології. В Україні, на нашу думку, це питання поки що не отримує достатньої уваги, хоча в Дніпропетровській області вже функціонує сонячна електростанція, обладнана подібною системою. Що стосується виробництва сонячних панелей в Україні, цю галузь представляють кілька провідних підприємств, зокрема: ТОВ «Сінтек» у Запоріжжі, ТОВ «Атіс Груп» у Дніпрі, «Квазар» у Києві, ТОВ «Сілікон» у Світловодську, а також «Пиллар», «Пролог Семікор» і «Activ Solar», штаб-квартира якого розташована у Відні, Австрія. Окрім цих ключових гравців, на ринку працює безліч менших компаній, що спеціалізуються на консалтингових послугах, продажах та інтеграції обладнання.

Через те, що промислово-економічна основа значною мірою залежить від аутсорсингу, ціни на сонячні панелі на українському ринку залишаються надзвичайно високими. З усіх видів електроприводів тут переважно пропонуються дорогі індійські варіанти, вартість яких для сонячної фотоелектричної системи потужністю 1 кВт становить близько 3500 доларів. Такий високий рівень цін часто

відлякує потенційних споживачів, які вважають економічно вигіднішим відмовитися від використання електроприводів, ніж інвестувати у їх встановлення.

У цій роботі буде продемонстровано важливість використання електроприводів у СФЕС, а також детально обґрунтовано економічну вигоду від їх впровадження. Особливу увагу приділено аналізу ефективності електроприводів, які сприяють підвищенню продуктивності та зниженню витрат на експлуатацію фотоелектричних установок.

2.3.2 Електроприводи, які застосовуються в сучасних системах керування

Електроприводи, що забезпечують стеження за положенням сонця на фотоелектричних станціях, зазвичай функціонують у двох координатних площинах. Для точного налаштування орієнтації сонячних панелей застосовуються такі типи систем електроприводів:

- Кроковий електропривод, що функціонує в режимі програмного управління від обчислювального пристрою або в режимі годинникового механізму, який керується задаючим генератором імпульсів (призначений для роботи з екваторіальними координатними осями).

- Слідкуючий кроковий електропривод, здатний працювати в режимі автоматичного супроводу, керуючись сигналами від датчика неузгодженості.

- Електропривод постійного струму зі слідкуючою функцією, що забезпечує безперервне відстеження положення сонця.

На сьогодні можна прогнозувати поступовий відхід від традиційного комп'ютерного управління на користь систем, що базуються на датчиках неузгодженості. Ці датчики здатні забезпечити точніше управління для різних типів енергетичних геліоустановок, гарантуючи водночас високу надійність роботи, значний кут охоплення та високу точність функціонування. Такий підхід відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних процесів і підвищення ефективності роботи геліосистем.

До недавнього часу кроковий електропривод вважався надмірно складним у конструкції, дорогим у виготовленні та недостатньо енергоефективним. Додатково, сонячна фотоелектрична станція (СФЕС) генерує електроенергію у вигляді постійного струму, який, за потреби, може бути перетворений на змінний. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для реалізації системи стеження за положенням Сонця найбільш оптимальним є застосування електроприводу постійного струму. Такий привід може ефективно працювати в парі з навігаційною системою, що використовує фотодатчик для визначення положення сонячних променів. Це забезпечує високу точність і продуктивність у процесі стеження за рухом Сонця.

Для забезпечення живлення двигуна постійного струму, що функціонує в режимі безперервного слідування за Сонцем, можуть застосовуватися різні типи силових перетворювачів напруги. Серед таких пристроїв виділяються тиристорні перетворювачі, транзисторні перетворювачі, що працюють у підсилювальному режимі, а також широтно-імпульсні транзисторні перетворювачі. Кожен із цих варіантів має свої переваги залежно від специфіки експлуатації та вимог до системи.

Найменш ефективним у плані енергозбереження є перетворювач, побудований на транзисторах, які функціонують у підсилювальному режимі. Коефіцієнт корисної дії (ККД) подібної схеми можна приблизно розрахувати за наступною формулою.

$$\eta_{\text{ЕФФ}} \approx \frac{U_2}{U_1}, \quad (2.2)$$

де U_1 – напруга на вході перетворювача, В; U_2 – напруга на виході перетворювача, В.

За умови, що коефіцієнт запасу швидкості дорівнює 10, ефективність у режимі стеження залишається дуже низькою і не перевищує 10%, що робить цей підхід вкрай неекономічним. Проте такий метод регулювання напруги в електроприводах для геліюустановок досить часто застосовується на практиці завдяки його простоті в реалізації та високій надійності. Для використання

тиристорного перетворювача необхідно забезпечити можливість підключення змінного струму до його вхідного кола, що є ключовою умовою для ефективної роботи цього обладнання.

Якщо геліюустановка функціонує як автономне джерело енергії, що генерує постійний струм із подальшим його перетворенням у змінний, необхідно враховувати не лише коефіцієнт корисної дії тиристорного перетворювача, але й ефективність роботи інвертора. Крім того, у подібних системах потужність двигунів зазвичай не перевищує 1 кВт, а в багатьох випадках навіть становить менше 100 Вт. Для забезпечення стабільності роботи тиристорного перетворювача важливо застосовувати згладжуючий реактор на його виході, що потребує організації зворотного зв'язку за параметрами струму та швидкості. Це дозволяє покращити динамічні характеристики системи, у зв'язку з чим використання лише одноконтурного управління є недостатнім.

Особливу увагу заслуговує широтно-імпульсний перетворювач, який є одним із ключових елементів сучасних електротехнічних систем. Завдяки використанню передових напівпровідникових пристроїв, досягається частота комутації, яка перевищує 20 кГц. Це дозволяє забезпечити оптимальні умови для роботи системи: за наявності згладжуючого реактора електромеханічна постійна часу перевищує номінальне значення в чотири рази, що позитивно впливає на стабільність і продуктивність роботи.

$$\frac{T_M}{T_{яц}} \gg 4, \quad (2.3)$$

Проте зі збільшенням частоти комутації виникають підвищені енергетичні втрати в транзисторних ключах та магнітопроводі електродвигуна.

Головним недоліком широтно-імпульсного перетворювача можна вважати його складність, що безпосередньо впливає на рівень надійності цього пристрою в порівнянні з більш простими аналогами.

Використання одноконтурної системи управління СЕП є цілком достатнім для роботи більшості видів геліюустановок. Однак, для забезпечення більш високої точності показників рекомендується впровадження негативного зворотного

зв'язку, який контролює швидкість. Особливий акцент також робиться на методах усунення люфту, що виникає в механічній частині приводу. У цьому контексті розглядаються такі підходи до компенсації:

- застосування механічного торсіонного пристрою;
- використання фрикційного гальма на вихідному валу;
- використання багатодвигунових СЕП.

Усі зазначені методи призводять до збільшення втрат потужності, ускладнення конструкції електроприводу та підвищення його собівартості. В енергетичних геліоустановках величина люфту зазвичай є меншою за допустиму похибку системи стеження. Тому, якщо механічні розрахунки підтверджують прийнятність ударних навантажень, що виникають у механічних вузлах, доцільно повністю відмовитися від будь-яких методів компенсації люфту. Такий підхід дозволить спростити конструкцію і знизити витрати без значного впливу на ефективність системи.

Для сонячних фотоелектричних станцій доцільно використовувати релейний слідкуючий електропривод на постійному струмі, який керується системою автоматичного наведення на сонячне світло. Функціонування системи забезпечується фотодатчиком, що працює в режимі поступового відстеження положення Сонця.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень системи автоматичної керування електроприводом сучасних СФС

3.1 Основні режими роботи системи автоматичної керування електроприводом сучасних СФС

На електропривод СФЕС впливають два основні види навантажень: тертя в кінематичних механізмах і вітрові впливи. Енергія, що витрачається на подолання тертя в механічних передачах, може значно перевищувати потужність, яка передається на вихід кінематичної системи. У свою чергу, вітрові навантаження відрізняються нестабільністю та важкістю передбачення, що створює додаткові труднощі в забезпеченні ефективної роботи системи.

Основні режими функціонування слідкуючого електроприводу СФЕС поділяються на дві основні групи: робочі та допоміжні. Робочі режими включають стеження, яке здійснюється за допомогою програмного управління або автоматичного супроводу. У випадку програмного керування траєкторія руху об'єкта визначається заздалегідь на основі розрахованого алгоритму. У режимі стеження за Сонцем керуючий сигнал формується в режимі реального часу, залежно від положення об'єкта, що відслідковується.

До допоміжних функцій відносяться такі режими, як «перекидання» виконавчого валу, «пошук» цілі та її «захоплення». Вони застосовуються під час підготовки СФЕС до роботи, а також під час профілактичного технічного

обслуговування. Окрім цього, допоміжні режими забезпечують можливість розвороту системи зі сторони заходу на схід після заходу Сонця або сприяють точному захопленню об'єкта вранці, коли Сонце підіймається над горизонтом, особливо якщо активовано автоматичний режим супроводу цілі.

Компоненти електроприводу СФЕС мають забезпечувати надійну роботу в повному температурному діапазоні, характерному для цього регіону. Крім того, вони повинні бути ефективно захищені від негативного впливу атмосферних опадів і проникнення вологи, що гарантує їх стабільну експлуатацію за будь-яких погодних умов.

3.2 Схема слідкуючого електроприводу системи керування та особливості роботи

Під час вибору конструкції електроприводу важливо врахувати кілька ключових вимог. Електропривод має характеризуватися високою надійністю та простотою технічного обслуговування. Важливо забезпечити достатній рівень автоматизації, що дозволить системі працювати стабільно протягом тривалого часу (наприклад, кілька місяців) без необхідності втручання з боку людини. Крім того, електропривод повинен демонструвати високу точність у роботі, бути економічно вигідним завдяки мінімальним капітальним витратам і водночас забезпечувати енергоефективність. Також необхідно передбачити захист від впливу вітрових навантажень, що може суттєво вплинути на довговічність і стабільність його функціонування.

Відмінною характеристикою таких електроприводів є низька швидкість руху робочого елемента, що забезпечує їхню адаптацію до виконання специфічних завдань, де необхідна висока точність і плавність переміщення.

Слідкуючий привод — це пристрій, що забезпечує виконання механічних переміщень із заданою точністю, які ініціюються малопотужним вимірювальним елементом. Цей елемент самостійно не здатний виконувати функції приводу. Такий привод виконує роль програмного регулятора, який реалізує механічні

переміщення відповідно до вхідного сигналу. Проте, у більшості випадків програмний алгоритм не є заздалегідь встановленим. Відмінною рисою слідкуючого приводу є те, що його рух визначається не лише параметрами регулювальної системи, а й зовнішніми впливами, через що він має вимушений характер, а не вільний, як у традиційних регуляторів.

Слідкуючі приводи поділяються на два основні види: ті, що працюють за принципом переривчастої дії (контактно-релейні), та безперервної дії. У контексті роботи СФЕС використовується саме привід переривчастого типу, який і стане об'єктом нашого подальшого аналізу та дослідження.

Переміщення робочого елемента машини у відповідності до поворотів задавальної осі виконується завдяки роботі виконавчого двигуна (ВД). Особливість конструкції слідкуючого приводу полягає у наявності ізоляційного проміжку, що створює певну зону нечутливості. Для підвищення точності відпрацювання заданих параметрів повороту важливо прагнути до мінімізації цього проміжку. При цьому можливі коливання приводу поблизу рівноважного положення, які виникають за рахунок запасу кінетичної енергії. Після вимкнення системи привід не зупиняється миттєво, а продовжує рух у заданому напрямку. Стабілізація роботи відбувається через кілька циклів коливань, після чого система досягає стану рівноваги.

Момент, який створює двигун, залишається сталим, незалежно від кута неузгодженості. У разі замикання щітки з півкільцем якір двигуна миттєво підключається до повної напруги, що забезпечує значне зростання моменту і надає системі високий рівень прискорення.

Для функціонування СФЕС достатньо реалізувати одноконтурну схему з негативним зворотним зв'язком, орієнтованим на регулювання положення.

Механічну частину СФЕС можна охарактеризувати як двохмасову систему. Частота її власних коливань є невисокою, перебуваючи в межах 1–2 Гц. Резонансні характеристики, такі як частоти, фази та амплітуди коливань, які проявляються у механічній частині, практично не залежать від технічних параметрів двигуна. Зазвичай в енергетичних геліюустановках не виникає потреби

у додатковій корекції для зменшення рівня коливань. Водночас питання щодо використання люфт-компенсуючих механізмів у приводі вирішується на основі аналізу результатів розрахунків збурюючих впливів, що діють на систему.

У всіх режимах роботи необхідно забезпечити однакове значення обертового моменту на вихідному валу. Тому регулювання швидкості шляхом зниження магнітного потоку є нераціональним. Використання коробки передач у даному випадку також не дає очікуваного результату і виявляється недоцільним.

У підсумку виникає потреба у проектуванні електропривода, який забезпечував би узгодження номінальної швидкості двигуна із швидкістю руху установки в допоміжних режимах. При цьому передбачається, що основні режими безперервного спостереження працюватимуть на швидкостях, нижчих за номінальну. У зв'язку з цим більш доцільним є використання релейного електропривода, який функціонує у покроковому режимі для точного стеження за параметрами.

Для забезпечення максимально точних і достовірних результатів дослідження важливо грамотно обрати та обґрунтувати оптимальний розрахунковий режим функціонування СЕП СФЕС. Крім того, слід ретельно визначити та врахувати типи і характер зовнішніх збурюючих впливів, які можуть впливати на її роботу.

У рамках дослідження була застосована розрахункова модель узагальненої СЕП СФЕС. Структуру цієї моделі було сформовано в ході виконання роботи шляхом детального аналізу та узагальнення всіх можливих конфігурацій систем електропостачання, які підходять для використання в умовах СФЕС.

У СЕП СФЕС основною нелінійною характеристикою виступає кінематичний люфт. Якщо не враховувати інші можливі нелінійності, під лінійним режимом роботи розуміється такий стан слідкуючого електропривода, при якому крутний момент безперервно передається через кінематичний ланцюг від двигуна до виконавчого вала або в зворотному напрямку. Це означає, що в механічному ланцюгу постійно зберігається напруження. Величина моменту, переданого через кінематичний ланцюг, має бути достатньою для запобігання появі автоколивань у

системі. Для визначення мінімального значення такого моменту можна використати, наприклад, метод гармонійної лінеаризації.

Відсутність перетину графіка частотної характеристики лінійної частини системи $W_{л}(j\omega)$ з оберненою амплітудною характеристикою люфту $1/W_{HE}(j\omega)$, яка змінюється залежно від значення моменту навантаження, свідчить про відсутність нелінійних автоколивань у системі. У загальному вигляді умову лінійності СЕП СФЕС можна представити у такій формі

$$\left| M_{К.Ц.} \right| = \left| M_{TP} \pm M_{ВІТР} \pm J_{I.B.} \frac{d\omega_{I.B.}}{dt} \right| \geq M_{MIN}, \quad (3.1)$$

де $M_{К.Ц.}$ – обертовий момент, переданий до кінематичного ланцюга, Нм; M_{TP} – сумарний момент в'язкого і сухого тертя на виконавчому валу, Нм; $M_{вiтp}$ – момент вітрового навантаження на виконавчому валу, Нм; $J_{I.B.}$ – момент інерції виконавчого механізму, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $\omega_{I.B.}$ – кутова швидкість виконавчого валу, рад / с.

Головним чинником, що спричиняє механічну напругу в кінематичному ланцюзі СФЕС, виступає сумарний момент тертя, який виникає на виконавчому валу. Цей момент може бути компенсований повністю або частково завдяки постійній складовій моменту, створеного вітровим навантаженням. У подібних умовах нерівність (3.1) не матиме виконання, а робота системи електроприводу відбуватиметься в умовах нелінійного режиму, що потребує додаткового аналізу для оптимізації її функціонування.

У випадках, коли постійна складова вітрового моменту майже повністю врівноважує момент тертя, помітні «викиди» похибки виникають з частотою, що відповідає флуктуаціям вітру. У таких умовах середньоквадратичне значення помилки може зрости в рази порівняно з показниками, характерними для лінійної системи. Навіть за умови неповного компенсаційного впливу моменту тертя, частота появи «викидів» може залишатися значною.

На рис.3.1 продемонстровано ситуацію, коли момент тертя на виконавчому валу повністю компенсований. У випадку часткової компенсації моменту спостерігається зменшення кількості коливань протягом періоду аналізу. Варто зазначити, що найскладніші умови для функціонування системи електроприводу з

кінематичним люфтом виникають у разі повної компенсації моменту тертя на виконавчому валу, що може значно впливати на стабільність роботи механізму.

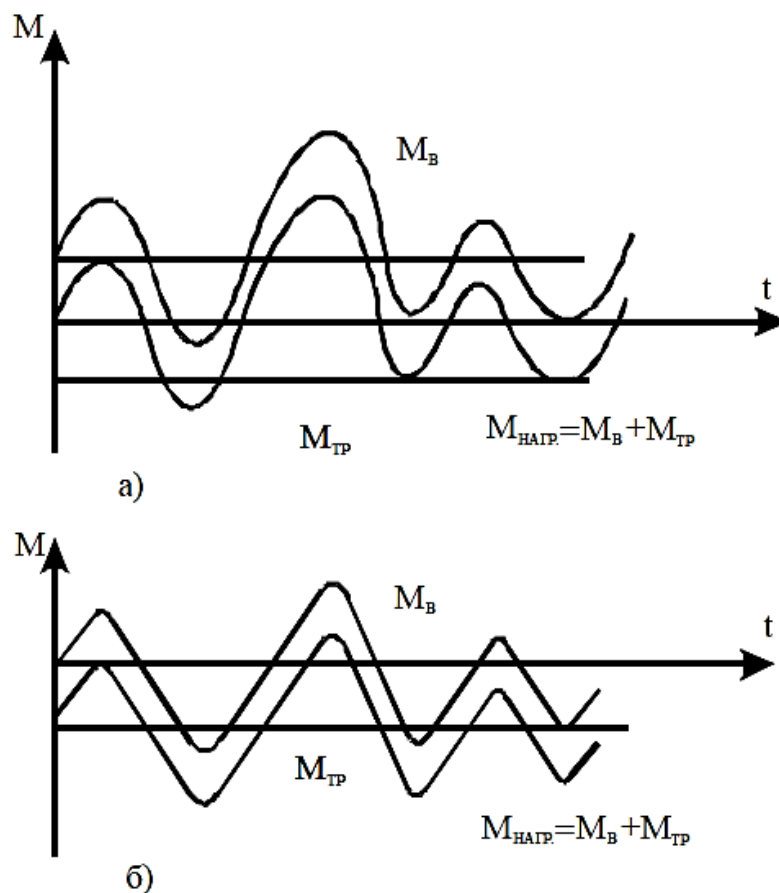


Рисунок 3.1 – Процеси переходу через нульове значення сумарного моменту навантаження на виконавчому валу досліджувалися за умов повної компенсації постійної складової моменту тертя разом із вітровим навантаженням (а), а також за сценарієм, коли компенсація є частковою (б).

Якщо сумарний момент навантаження на валу виконавчого механізму дорівнює нулю і немає впливу вітрових флуктуацій, основною проблемою, що виникає в нелінійній системі електроприводу, стають автоколивання. Цей феномен суттєво впливає на стабільність роботи системи, ускладнюючи точність її регулювання та ефективність функціонування.

У подальшому будуть проаналізовані аспекти точності функціонування нелінійних СЕП за умов повної компенсації тертя на виконавчому валу та постійної складової вітрового навантаження, враховуючи наявність флуктуацій вітру. Такі експлуатаційні умови для СЕП виникають під час зміни сили або

напрямку вітру, а також у процесі обертання виконавчого валу. Тривалість подібних ситуацій визначається швидкістю обертання валу і залежить від співвідношення між моментами тертя та вітрового навантаження.

3.3 Сонячні батареї, які використовують в геліоустановках

Сучасні фотоелектричні модулі демонструють відмінні техніко-експлуатаційні характеристики, серед яких потужність у межах від 50 до 160 Вт.

На сьогодні також доступні сонячні батареї зі звичайним склом, які мають діапазон потужності від 5 до 125 Вт. У межах нашого дослідження було обрано сонячну фотоелектричну систему (СФЕС) загальною потужністю до 1 кВт.

Для цього підібрано доступні на вітчизняному ринку сонячні панелі бренду «Evergreen Solar» з потужністю одного модуля 250 Вт, а для забезпечення потрібної енергопродуктивності використано чотири таких модулі.

3.4 Система наведення сонячної фотоелектричної станції

Як було зазначено у першому розділі, СФЕС, спрямована в полудневому напрямку на Сонце, втрачає приблизно 35% ефективності порівняно з рухомою СФЕС. Це відбувається за умов, коли кут між сходом і заходом Сонця змінюється в межах від 0° до 180° , а протягом усього дня доступне пряме сонячне випромінювання. Таким чином, ключовим фактором, що впливає на коефіцієнт корисної дії (ККД) СФЕС, є здатність системи орієнтуватися безпосередньо за джерелом сонячного випромінювання, тобто за положенням Сонця.

Схема датчика відстеження автоматично забезпечує орієнтацію сонячної панелі на напрямок з максимальною інтенсивністю освітлення, без необхідності зовнішнього втручання.

Існує широкий спектр систем, призначених для стеження за положенням Сонця з метою забезпечення оптимальної освітленості сонячних панелей. Вони варіюються від простих аналогових рішень до більш складних, що поєднують

аналогові та цифрові компоненти. Більшість із таких систем реагують на зміни інтенсивності сонячного світла, автоматично активуючись у разі зниження рівня освітленості. У межах цієї магістерської роботи розроблено систему, яка автоматично повертається до початкового робочого стану та функціонує без необхідності регулярного втручання персоналу, що значно підвищує її зручність та ефективність у експлуатації.

Порівняно з традиційними системами орієнтації, які функціонують за фіксованим алгоритмом, запропонований метод дозволяє суттєво знизити витрати на встановлення обладнання, зберігаючи при цьому високу точність наведення.

Розроблений блок управління виконує автоматичну орієнтацію сонячних панелей у напрямку Сонця, забезпечуючи ефективний заряд акумуляторної батареї (АБ). Додатково, система передбачає можливість ручного управління сонячними батареями (СБ), що підвищує її універсальність і зручність у використанні.

Пристрій забезпечує оптимальне позиціонування сонячної батареї в напрямку максимальної освітленості. Для цього була розроблена принципова схема орієнтації сонячної батареї на Сонце, яка зображена на рисунку 3.2.

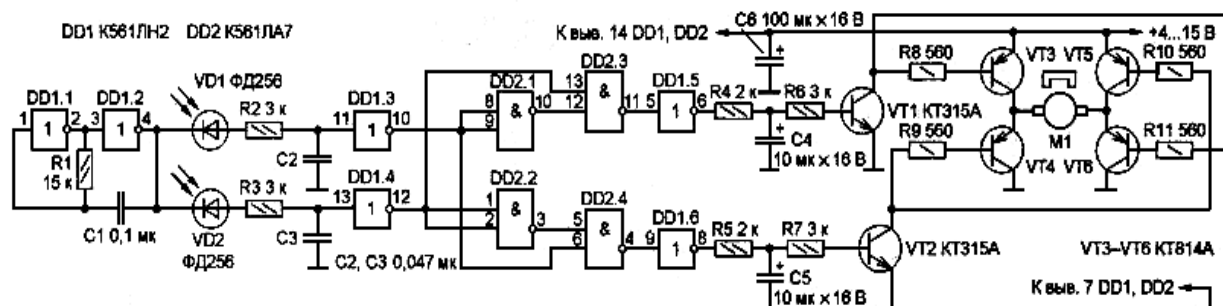


Рисунок 3.2 – Принципова схема системи наведення на Сонце разом з датчиком стеження

3.5 Застосування динамічного гальмування при поверненні панелі у початковий стан

У режимі реверсу забезпечується можливість встановлення оптимальної швидкості обертання панелі навколо вертикальної осі для безпечної роботи.

На рис.3.3 наведено узагальнену схему підключення електродвигуна. Обмотка якоря (ОЯ) підключена до напруги U , яка формує струм I у його колі. Для регулювання параметрів струму до ланцюга якоря може бути додатково введений резистор (шунт) з опором R_d , що дозволяє адаптувати роботу системи до необхідних умов.

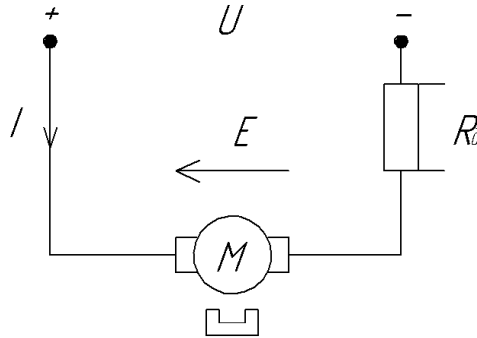


Рисунок 3.3 – Схема динамічного гальмування двигуна

Відповідно до закону Кірхгофа, прикладена до якорного кола двигуна напруга компенсується сумою напруги, що знижується на опорі кола, та електрорушійною силою (ЕРС), яка генерується в процесі роботи двигуна.

$$U = E + IR_{\Sigma}, \quad (3.2)$$

де E – ЕРС двигуна; $R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_d$ – сумарний електричний опір якорного кола; $R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{щ}}$ – електричний опір якорного кола; $R_{\text{оя}}, R_{\text{дп}}, R_{\text{ко}}, R_{\text{щ}}$ – електричні опори обмотки якоря, додаткових полюсів, компенсаційної обмотки та щіток.

Якщо $R_{\text{я}} = 50 \text{ Ом}$, $E = 3 \text{ В}$, $U = 12.5 \text{ В}$, $I = 0,1 \text{ А}$ тоді

$$R_d = \frac{12,5 - 3 - (0,1 \cdot 50)}{0,1} = 45 \text{ Ом}$$

Отже, шляхом регулювання опору шунта вдається досягти оптимальних параметрів швидкості обертання вертикальної осі, що забезпечує необхідну стабільність і ефективність роботи системи.

Для деактивації режиму реверсу використовується герконовий вимикач, який своїми контактами вимикає фотореле та таймер, одночасно переводячи систему наведення в черговий режим. У цьому стані енергоспоживання системи не перевищує 1,2 мА, хоча під час стеження за Сонцем споживання струму

залежить від потужності двигуна. Завдяки інтеграції фотореле та додаткових елементів автоматизації, система автоматично повертається у початкове положення, орієнтуючись на схід Сонця, що виключає необхідність втручання обслуговуючого персоналу.

Живлення подається не безпосередньо від сонячної панелі, а через гелевий свинцево-кислотний акумулятор, який одночасно виконує функцію заряджання. Такий підхід забезпечує стабільну роботу системи як у денний, так і в нічний час. Акумулятор служить для зберігання енергії, яка виробляється сонячною батареєю, а також постачає живлення до електронного блоку пристрою, гарантуючи його безперервну функціональність.

Між сонячною панеллю та акумуляторною батареєю може бути інтегрований контролер, здатний регулювати зарядний струм відповідно до максимального значення, яке генерує сонячна установка. Електронний модуль, що відповідає за керування, герметично ізольований та надійно закріплений нижче рівня сонячної батареї. Зазначена система відстеження роботи СФЕС функціонує з використанням двох координат, забезпечуючи точне налаштування та оптимізацію роботи обладнання.

3.6 Опис датчиків наведення на Сонце

Одним із ключових елементів установки виступає датчик, призначений для моніторингу кута падіння сонячного світла. Цей компонент може бути реалізований у двох різних конструктивних варіантах, що відображено на рис.3.4.

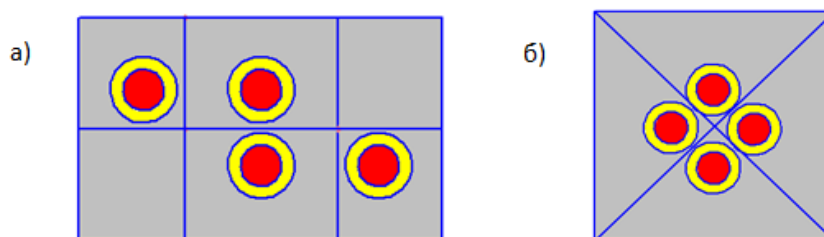


Рисунок 3.4 – Сенсор для контролю кута нахилу сонячного випромінювання (вигляд зверху): а) – з подвійною перегородкою, б) – з типовою перегородкою.

Даний датчик представляє собою компактну плату, на якій закріплено чотири фотодатчики (рис. 3.5), що виконані на основі фотодіодів типу ФД263-01 або ФД256. Всі елементи конструкції розроблені з урахуванням здатності до безперебійного функціонування під впливом сонячного випромінювання. Для захисту фотодіодів від надмірної інтенсивності світлових потоків використовуються спеціальні зелені світлофільтри, що підвищують надійність та довговічність роботи пристрою.

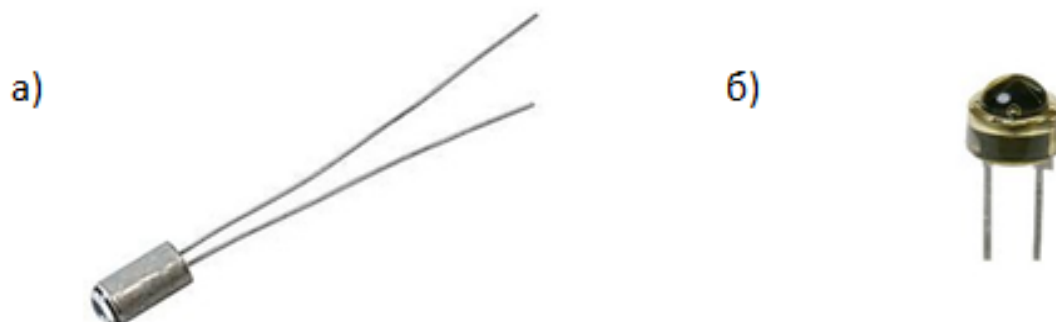


Рисунок 3.5 – Запропоновані фотодіоди: а) – ФД256, б) – ФД263-01

До того ж, усі вони ізольовані одна від одної за допомогою хрестоподібної або подвійної хрестоподібної перегородки, яка встановлюється перпендикулярно до плати. Розташування перегородки спроектоване таким чином, щоб під час зміни кута освітлення створювати затінення для одного з фотодіодів (рис. 3.6). При цьому висота перегородки визначається параметрами кута кроку двигуна, забезпечуючи оптимальну роботу системи.

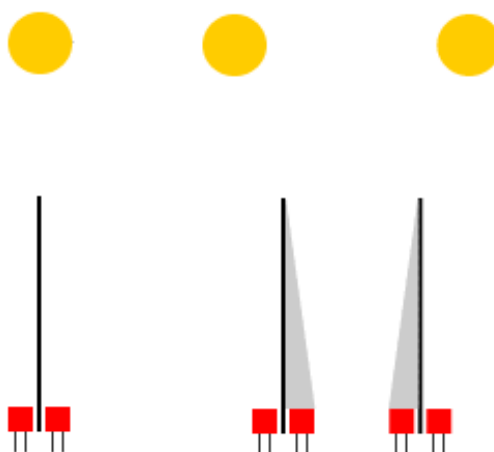


Рисунок 3.6 – Розташування датчиків наведення

Для забезпечення максимальної точності орієнтації сенсорні елементи слід розташовувати на мінімальній відстані один від одного, а перегородка між ними

повинна мати максимально можливу довжину. Коли система орієнтується точно на Сонце, усі чотири фотодатчики отримують рівномірне освітлення. З моменту сходу сонця рівень освітленості фотодіодів стає нерівномірним, що активує електродвигун, який починає повертати панель із заходу на схід, слідуючи за рухом сонця. Цей процес контролюється автоматизованою системою управління, яка аналізує дані, отримані від фотоприймачів, і коригує алгоритм роботи для досягнення оптимальної орієнтації.

3.7 Розрахунок реверсивного мостового підсилювача з транзисторами в ключовому режимі

Цей розрахунок здійснюється у процесі аналізу. Умовні позначення, що використовуються на схемі силової частини (рис. 3.7), допомагають візуалізувати та деталізувати структуру розглянутого компонента.

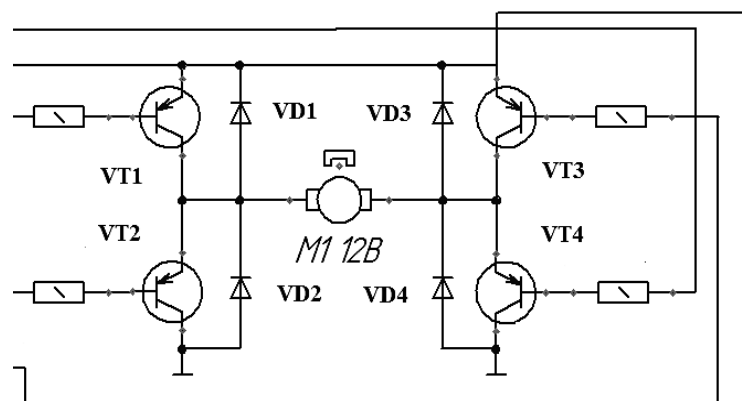


Рисунок 3.7 – Мостова схема ввімкнення ключів

Графічне відображення провідності ключів та зміни напруги на навантаженні протягом одного періоду чергування імпульсів T_i , коли подається позитивний керуючий сигнал (рис. 3.8).

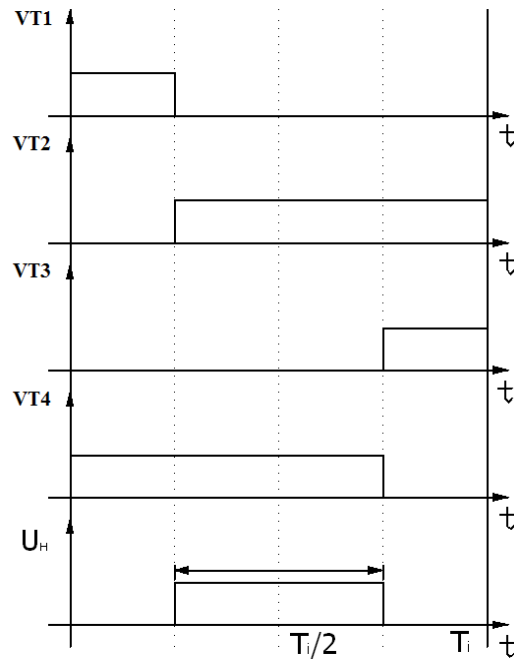


Рисунок 3.8 – Діаграма провідності ключів

$$T_i = \frac{1}{2} f_{\text{ДЧ}} = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad (3.3)$$

де $f_{\text{ДЧ}}$ – частота вихідного сигналу ділянки частоти ДП.

Середнє значення напруги, виміряне на навантаженні протягом певного проміжку часу

$$\bar{U}_n = U_0 \tau, \quad (3.4)$$

де τ – відносна тривалість імпульсу напруги на навантаженні.

Найбільша напруга на навантаженні

$$\bar{U}_{nm} = U_N + I_N \tau_m. \quad (3.5)$$

Напруга живлення вибирається із умови $\bar{U}_n = U_{nm}$, $\tau = 3$ Приймаємо

$\tau_m = r_a$, тоді

$$U_o = \frac{U_N + I_N \cdot r_a}{3}, \quad (3.6)$$

$$U_o = \frac{12 + 4,2 \cdot 50}{3} = 70 \text{ В}.$$

Найбільший струм навантаження та ключа

$$I_{nm} = \alpha \cdot I_N \quad (3.7)$$

де α - коефіцієнт припустимого перевантаження по струму; $\alpha = 2$

$$I_{нт} = 2 \cdot 4,2 = 8,4 \text{ А.}$$

Опори в ланці бази

$$r_2 < U_K / I_{Ko}; \quad r_1 \frac{U_K - U_{be} - U_T}{k_s I_{нт} / \beta + (U_K - U_{be})}, \quad (3.8)$$

де U_K – амплітуда меандру секції МВ ($U_K = 6\text{-}10\text{В}$); U_{be} – напруга на переході б-е при $I_{нт}$ ($U_{be}=0,5\text{-}1\text{В}$); U_T – залишкова напруга на відкритому транзисторі ОП ($U_T=1,5\text{В}$); β - коефіцієнт підсилення по струму транзистора Т; $k_s = \frac{I_{be}}{I_K} \cdot \beta$ – коефіцієнт насичення ($k_s=1,5\div 2$); $I_{ко}$ – тепловий струм колектора Т.

Транзистор Т підбирається з урахуванням допустимого рівня напруги на колекторно-емітерному переході $U_{ке доп}$, а також максимально допустимого значення колекторного струму $I_{к доп}$.

$$U_{ке доп} > U_o; \quad I_{к доп} > I_{нт} \quad (3.9)$$

Вибираємо транзистор Т:

Тип	$I_{к доп}$, А	$U_{ке доп}$, В	$P_{доп}$, Вт	β_{min}	$I_{ко}$, мА
КТ853А	10	100	50	16	10

Транзистор тестується на здатність витримувати потужність, що виділяється на переході колектор-емітер під час його роботи у режимі перемикання.

$$P = \frac{1}{6} \cdot I_{нт} \cdot U_o \cdot f_i \cdot (t_{вкл} + t_{вискл}) = \frac{8,4 \cdot 70 \cdot 3,9 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{6} = 11,5 \leq P_{доп} = 50, \quad (3.10)$$

де f_i – частота комунікації ключа $f_i=2f_{ДЧ}=3,9 \cdot 10^3$ Гц; $T_i=1/f_i$; $P_{доп}$ – допустима потужність розсіювання транзистора з тепловідведенням.

Вибір діода Д здійснюється з урахуванням максимально допустимих параметрів, таких як зворотна напруга $U_{доп}$ та прямий струм $I_{доп}$.

$$U_{доп} > U_o; \quad I_{к доп} > I_{нт}.$$

Вибираємо діод Д

Тип	U, В	I, А	$U_{пр}$, В
SF162	100	16	1.1

3.8 Мікроконтролерна система керування сонячним трекером

Мікропроцесор представляє собою інтегральну схему, що виконує функції управління різноманітними електронними пристроями. У його конструкції об'єднано можливості центрального процесора, периферійних компонентів, а також елементи оперативної та постійної пам'яті. По суті, це однокристальна обчислювальна система, яка здатна виконувати базові завдання, пов'язані з контролем і управлінням.

У цій кваліфікаційній роботі основними завданнями є забезпечення точного виконання закону керування та управління двома електроприводами, що виступають об'єктами керування. Для реалізації цих завдань передбачається використання мікропроцесорної системи.

Система керування потребує застосування двох незалежних каналів зворотного зв'язку, які дозволяють контролювати положення платформи та визначати орієнтацію відносно положення Сонця, забезпечуючи високу точність і надійність у функціонуванні.

Система слідування за фактичним положенням платформи побудована на основі потенціометричних датчиків, які монтуються безпосередньо на осі обертання конструкції.

Канал зворотного зв'язку забезпечує передачу даних до системи керування, що дозволяє відстежувати зміни поточного розташування платформи для оптимізації ефективності роботи сонячних батарей. Основними елементами цього каналу є пари фотодіодів, розташованих під різними кутами. Вони реєструють різницю в інтенсивності світлових потоків, що падають на їх поверхні, і на основі цих даних визначається напрямок світла щодо положення платформи, формуючи вектор орієнтації.

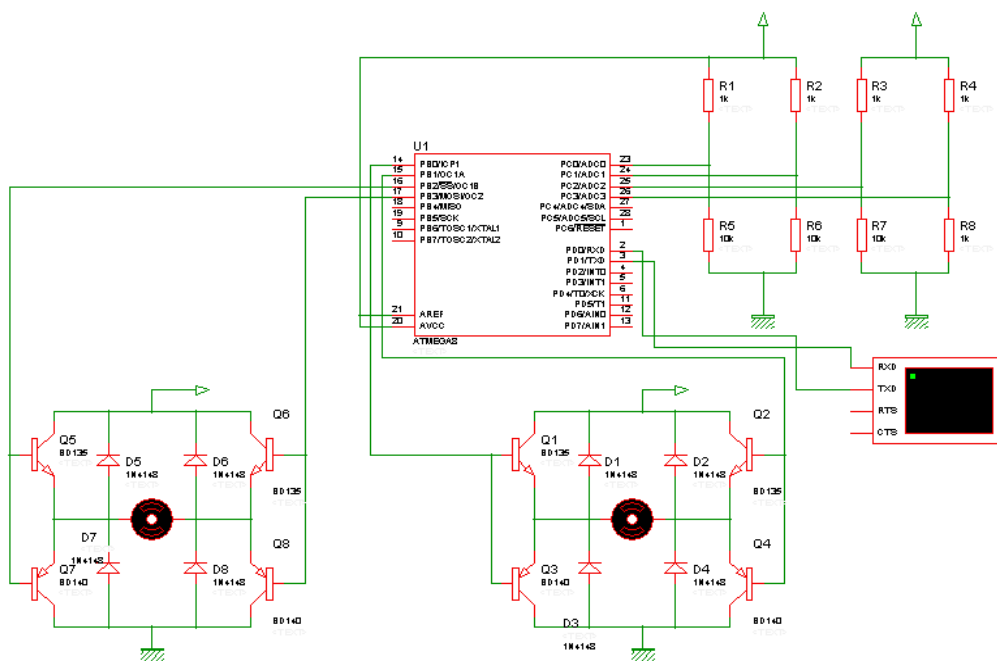
Виконавчий механізм складається з двох приводів:

- двигуна для лінійного переміщення, до складу якого входять електродвигун постійного струму, редуктор та черв'ячно-гвинтова передача;

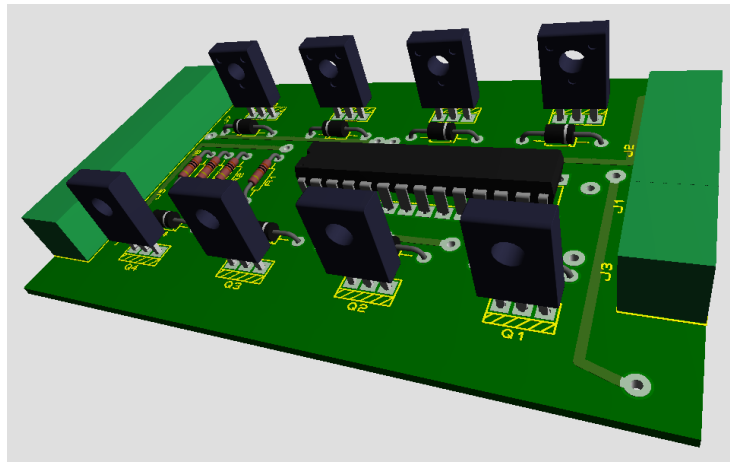
– черв'ячного мотор-редуктора обертального типу, що включає в себе редуктор і електродвигун постійного струму.

Управління цими двигунами здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) у поєднанні з потужним драйвером, який забезпечує комутацію джерела живлення необхідної енергетичної потужності в електричний контур приводу. Такий підхід дозволяє забезпечити точне регулювання роботи двигунів і оптимізувати їх продуктивність.

У рамках даної кваліфікаційної роботи було розроблено схему управління (рис. 3.9,а), яка базується на мікроконтролері Atmega. Цей контролер через певні проміжки часу зчитує дані з оптичних сенсорів і виконує їх порівняння. Якщо показники датчиків виявляються однаковими, це свідчить про те, що фотоелектрична панель точно орієнтована на Сонце. У разі виявлення різниці між значеннями сенсорів, контролер формує керуючий сигнал для приводу, який повертає платформу у потрібному напрямку. Регулювання положення панелі триватиме до моменту, поки струми з обох датчиків не стануть ідентичними, забезпечуючи оптимальну орієнтацію панелі на Сонці.



a)



б)

Рисунок 3.9 – Схема керування сонячними панелями (а) та зовнішній вид керуючої плати (б)

Отже, простий сонячний трекер може стати основою для розробки та вдосконалення більш комплексних систем управління, призначених для відстеження руху Сонця. Його застосування дозволяє підвищити ефективність роботи таких систем, забезпечуючи точніше налаштування та адаптацію до змін умов освітлення.

До відповідних входів контролера є можливість підключити два додаткових датчики, а на керуючі виходи – ще один електродвигун. Це забезпечить можливість керування рухом панелі як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Такий підхід сприяє досягненню максимальної ефективності використання системи. Згідно з попередніми дослідженнями, подібна конструкція може збільшити обсяги вироблення енергії на 15% порівняно з базовими моделями. А у випадку порівняння з фіксованими сонячними установками, ефективність може зрости до 35%.

3.9 Вибір та обґрунтування електродвигуна

Для визначення потужності двигуна, що забезпечує роботу системи стеження енергетичної геліоустановки з вихідною потужністю $P_E = 1000$ Вт за умови рівня сонячної радіації $E_0 = 1100$ Вт/м², спочатку розраховується необхідна площа поверхні фотоелементів. Цей параметр є критичним для забезпечення

стабільної роботи установки і ефективного перетворення сонячної енергії в електричну.

$$S = \frac{P_E}{\eta_{II} \cdot E_0 \cdot K_{3-Я}}, \quad (3.11)$$

де η_{II} – ККД фотоперетворювача, що враховує ККД перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію та омічні втрати $\eta_{II} = 0,08$; $K_{3-Я}$ – коефіцієнт заповнення сонячних модулів фотоелементами $K_{3-Я} = 0,9$.

$$S = \frac{1000}{0,16 \cdot 1100 \cdot 0,9} \approx 6,4 \text{ м}^2.$$

Під час обчислення площі фотоприймача було враховано технічні характеристики фотоелементів, які представлені на сучасному ринку, а також використано напрацьований досвід у проєктуванні діючих геліоустановок. Визначено оптимальні лінійні розміри фотоприймача та його окремих модулів, зокрема, у цьому випадку довжина становить 2,45 м.

Виходячи з аналізу наявних даних, район використання установки співвідноситься з характеристиками місцевості, для якої визначено нормований швидкісний тиск вітру. У цьому випадку значення тиску становить $W_0 = 0,23$ кПа (або 230 Па). Після цього за відповідною таблицею обчислюється коефіцієнт, що враховує зміни вітрового навантаження залежно від висоти. Для обраного регіону цей коефіцієнт дорівнює $k = 0,5$, що відповідає умовам розташування та висоти розроблюваного об'єкта.

$$M_{\text{вimp}} = \frac{1}{4} S \cdot l \cdot k \cdot W_0, \quad (3.12)$$

$$M_{\text{вimp}} = \frac{1}{4} 6,4 \cdot 2,45 \cdot 0,5 \cdot 230 = 451 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_{\text{вimp}} = 2 S k \cdot W_0 = 7950 \text{ Н},$$

$$F_{\text{вimp}} = 2 \cdot 6,4 \cdot 0,5 \cdot 230 = 1472 \text{ Н}$$

де $S = 6,4 \text{ м}^2$; $l = 2,45 \text{ м}$; $k = 0,5$; $W_0 = 230 \text{ Па}$

$$M_{\text{mp}} = \sqrt{F_{\text{вimp}}^2 + (mg)^2} \cdot f \frac{d}{2}, \quad (3.13)$$

$$M_{mp} = \sqrt{1472^2 + (140 \cdot 9,8)^2} \cdot 0,15 \frac{0,04}{2} = 6H \cdot m$$

де $m = 140\text{кг}$; $g = 9,8\text{м/с}^2$; $f = 0,15$; $d = 0,04\text{м}$.

$$M_{\text{ДИСБ}} = 0,01 \cdot l \cdot (F + mg), \quad (3.14)$$

$$M_{\text{ДИСБ}} = 0,01 \cdot 2,45 \cdot (1472 + 140 \cdot 9,8) = 70H \cdot m$$

$$P_{\text{ДВ}} = \frac{(M_{\text{вімпу}} + M_{\text{ТР}} + M_{\text{ДИСБ}}) \omega_{\text{ВИК.М}}}{\eta_{\text{кц}}}. \quad (3.15)$$

де, $\omega_{\text{ВИК.М}}$ – кутова швидкість вихідного валу.

Згідно з технічною документацією, наданою заводом-виробником редуктора, коефіцієнт корисної дії ($\eta_{\text{кц}}$) приймаємо рівним 0,65. Оскільки таймер налаштований на тривалість роботи 3 секунди, максимально можлива кутова швидкість вихідних валів становить 3° за секунду, що еквівалентно 0,0523 радіан за секунду. Це дозволяє панелі після короткої паузи повернутися в напрямку Сонця за 1 секунду, залишаючи ще 2 секунди як запас часу для додаткових маневрів.

$$P_{\text{дв}} = \frac{(451 + 6 + 70) \cdot 0,0523}{0,65} = 42,4Bm.$$

Механічні вібрації можуть стати причиною суттєвих додаткових втрат потужності у двигуні, які за несприятливих умов здатні сягати 20–30% від його номінальних втрат. Для врахування цього явища в процесі розрахунку потужності двигуна за відповідними формулами доцільно використовувати коефіцієнт запасу, значення якого зазвичай варіюється в межах $K_z = 1,05 \dots 1,5$. Введення такого коефіцієнта дозволяє підвищити точність розрахунків і забезпечити надійну роботу двигуна в умовах підвищених навантажень.

Для забезпечення роботи двигуна на номінальній потужності необхідно виконання наступної умови: $P_N > P_c$. На основі цієї умови вибирається найбільш підходящий типорозмір двигуна, потужність якого відповідає заданим параметрам. Тип двигуна обирається залежно від таких критеріїв: у випадку, коли

$P_N \leq 40 \text{ Вт}$, застосовується двофазний асинхронний двигун, а якщо $P_N \geq 40 \text{ Вт}$, то перевага надається двигуну постійного струму..

Враховуючи коефіцієнт завантаження K_z , для електроприводу розроблюваної геліюустановки було обрано двигун постійного струму моделі ME215B. Збудження цього двигуна забезпечується за рахунок використання постійних магнітів, що гарантує стабільну роботу та енергоефективність у заданих умовах експлуатації.

Технічні дані двигуна

Тип	P_N , Вт	U_N , В	ω_N , рад/с	I_N , А	r_a , Ом
ME215B	50	12	17,4	4,2	50

Передаточне число редуктора визначається відношенням

$$i = \frac{\omega_N}{\omega_{gm}} = \frac{17,4}{0,0523} = 327 \quad (3.16)$$

Безумовно, редуктор із настільки високим передаточним числом характеризується низьким коефіцієнтом корисної дії та схильністю до швидкого зношування. Однак, якщо врахувати загальну тривалість його роботи в активному режимі, цей аспект не матиме суттєвого впливу на загальну ефективність експлуатації обладнання.

$$TB_{ном} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\%, \quad (3.17)$$

$$TB_{ном} = \frac{3}{3 + 720} \cdot 100\% = 0,41\%,$$

3.10 Обґрунтування основної структури слідкуючого електроприводу сонячних фотоелектричних станцій

Зазвичай структура СЕП має багатоконтурну організацію, де кожен контур являє собою сукупність елементів, пов'язаних зворотним зв'язком. Створені електроприводи, оптимізовані за принципом підпорядкованого регулювання, включають контури для керування струмом та швидкістю. Такі системи ефективно

використовуються у слідкуючих електроприводах, які додатково оснащуються контуром для управління кутом, що розширює їх функціональні можливості та сфери застосування.

Розглянутий клас електроприводів відзначається невеликою потужністю, що зазвичай не перевищує 1 кВт. Такі приводи, як правило, не вимагають застосування спеціальних заходів для обмеження струму завдяки підвищеній здатності використовуваних двигунів малої потужності витримувати перевантаження. У випадку надзвичайно малопотужних приводів (з потужністю менше 50–100 Вт), струмообмеження відбувається природним чином через значний опір якірного кола в системі типу «перетворювач-двигун». Додатково, регулятор положення, інтегрований у контур управління кутом, може ефективно знижувати стрибки струму в якірному колі слабодинамічних СЕП. Враховуючи це, структура СЕП СФЕС не потребує використання окремого струмового контуру, що дозволяє обмежитися лише контурами регулювання швидкості та кута.

Контур регулювання швидкості сприяє забезпеченню стабільності руху обладнання при роботі в діапазоні низьких швидкостей. Крім того, він дозволяє збільшити пропускну здатність електроприводу, що позитивно впливає на динамічну точність СЕП. Досягнення необхідних динамічних характеристик та заданих точнісних параметрів СЕП у комплексі забезпечується використанням регулятора положення, інтегрованого в контур управління кутом.

Тип керованого перетворювача напруги для СЕП залежить від її потужності.

Найкращим вибором для СФЕС з точки зору точності роботи, простоти впровадження та зручності обслуговування є використання транзисторних або тиристорних перетворювачів. Конструкція та параметри перетворювача істотно впливають на загальну архітектуру та функціональність СЕП, визначаючи її ефективність і надійність.

З огляду на високу жорсткість конструкції виконавчого механізму СФЕС, можна припустити, що основна пружна піддатливість системи зумовлена кінематичним ланцюгом. Цей ланцюг включає редуктор та вихідну передачу, яка

забезпечує з'єднання редуктора з основним зубчастим колесом. Для спрощення розрахунків моменти інерції компонентів кінематичного ланцюга прийнято рівними нулю, оскільки їх величина не є співмірною з еквівалентними моментами інерції двигуна та виконавчого механізму. Це допущення дозволило розробити двомасову пружну модель, яка була використана для аналізу механічної частини приводу у всіх подальших схемах СЕП.

Електромеханічна схема СЕП включає в себе такі компоненти, як пристрій для вимірювання параметрів, регулятор положення, керований перетворювач електричної напруги, електродвигун і виконавчий механізм. Під час розробки структурної схеми механічної частини приводу було враховано такі фактори, як наявність кінематичних люфтів, пружні властивості елементів конструкції, а також вплив в'язкого тертя, що виникає на валу виконавчого механізму.

У структурній схемі СЕП реалізовано астатизм другого порядку, що сприяє зменшенню вимог до ширини смуги пропускання і дозволяє усунути як швидкісну, так і статичну похибки. На практиці використовуються також електроприводи з астатизмом першого і другого порядків. Недоліком СЕП першого порядку є наявність статичних і динамічних похибок, які впливають на точність і ефективність роботи системи наведення.

Системи стеження з астатизмом третього порядку мають здатність значно знизити вимоги до ширини смуги пропускання СЕП і усунути помилки, спричинені прискоренням. Однак такі системи належать до умовно стійких і дуже чутливі до нелінійних характеристик у каналі управління. Реальні СЕП сучасних СФЕС характеризуються наявністю низки нелінійностей, серед яких: кінематичні люфти в механічних передачах; нелінійна залежність пружного моменту від різниці кутових положень валів двигуна та виконавчого механізму; зона нечутливості та явище «насичення» у вихідній характеристиці перетворювача напруги; обмеження у пеленгаційній характеристиці датчиків неузгодженості; а також «дрейф нуля» у підсилювачах постійного струму. Усі перелічені нелінійності суттєво впливають на роботу систем із астатизмом третього порядку,

роблячи їх нестабільними та, відповідно, непридатними для практичного застосування без додаткової компенсації або адаптації.

Система автоматичного стеження з астатизмом другого порядку ($\nu = 2$) виявляє меншу чутливість до нелінійностей характеристик складових елементів порівняно з системою, де астатизм дорівнює трьом ($\nu = 3$). Водночас вона демонструє вищу точність, ніж системи з астатизмом першого порядку ($\nu = 1$). У зв'язку з цим для розробки була обрана структура СЕП з астатизмом $\nu = 2$. У даній системі астатизм другого порядку забезпечується використанням пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора, розташованого в контурі управління кутом. Передавальна функція цього регулятора має такий вигляд:

$$W_{pn}(P) = \frac{U_{pn}(P)}{U_{\delta}} = \frac{(T_{K1}P + 1)(T_{K2} + 1)}{T_0P}, \quad (3.17)$$

де $U_{pn}(p)$ – зображення Лапласа вихідної напруги регулятора положення; $U_{\delta}(p)$ – зображення Лапласа вихідної напруги вимірювального пристрою; T_0 , T_{K1} , T_{K2} – постійні часу регулятора положення.

Інтегральний компонент (3.17) підвищує рівень астатизму СЕП до другого порядку, тоді як основна диференціююча ланка $T_{K1}p$ компенсує фазові погіршення, викликані інтегруванням, забезпечуючи таким чином стабільність роботи системи. Додатковий пропорційно-диференційний модуль $T_{K2}p+1$ сприяє розширенню смуги пропускання і водночас підсилює стійкість системи електропривода, забезпечуючи більш ефективне функціонування.

Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор положення рекомендується для використання у всіх типах СФЕС, де необхідна підвищена точність у процесі спостереження. Для узагальнення можливих варіантів структур СЕП СФЕС слід звернути особливу увагу на передавальну функцію взаємодії перетворювача та двигуна, оскільки саме ця частина схеми системи електропривода підлягатиме подальшим змінам. За умови, що постійна часу перетворювача має незначне значення ($T_{\Pi} = 0,001$), передавальна функція системи перетворювач-двигун описується наступним виразом

$$W_{n\partial}(P) = \frac{\omega_{\partial\partial}(P)}{U_{pn}(P)} = \frac{K_c}{T_{M1}P(T_{\text{я}}P+1)+1}, \quad (3.18)$$

де $K_c = K_n K_\partial$ – коефіцієнт передачі контуру швидкості; K_n – коефіцієнт передачі керованого перетворювача напруги; K_∂ – коефіцієнт передачі двигуна; T_{M1} – електромеханічна постійна часу двигуна; $T_{\text{я}}$ – електромагнітна стала часу якірного ланцюга двигуна.

Відсутність коефіцієнтів перед постійними T_{M1} та $T_{\text{я}}$ у знаменнику формули (3.18) свідчить про те, що в такій базовій схемі, позбавленій зворотних зв'язків і додаткових регулюючих елементів, складно здійснити корекцію співвідношення між цими постійними. Особливо це стосується ситуацій, коли виникає необхідність у їх зменшенні, оскільки відсутність гнучких регулюючих механізмів обмежує можливості впливу на параметри системи.

Сфера використання одноконтурних структур у системах енергопостачання СФЕС є досить обширною. Завдяки їх конструктивним особливостям, досягнення необхідної точності моніторингу та контролю стає технічно нескладним завданням. Такий рівень точності виявляється цілком достатнім для забезпечення стабільного функціонування більшості технологічних процесів, які виконуються із застосуванням сонячних фотоелектричних систем.

3.11 Оцінка стійкості розробленої системи

Для аналізу стійкості запропонованої системи було застосовано частотні критерії. Спочатку виконано дослідження стабільності на основі логарифмічних частотних характеристик.

Логарифмічний критерій є одним із частотних методів, який дозволяє оцінити стійкість замкнутої системи автоматичного керування (САК) за формою логарифмічної характеристики розімкненої системи.

Основою цього методу є взаємозв'язок між логарифмічною фазовою частотною характеристикою (ЛФЧХ) та амплітудно-фазовою частотною характеристикою (АФЧХ) в системах автоматизації.

Для забезпечення стійкості системи амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) повинна перетинати вісь частот раніше, ніж ЛФЧХ досягне значення -180° . З використанням програмного середовища Matlab побудовано ЛАЧХ та ЛФЧХ для розробленого привода (рис. 3.10).

Аналіз отриманих графіків показав, що система є стійкою, демонструючи запас за фазою, який становить 33° , і запас за амплітудою, що дорівнює приблизно 60 дБ. Це свідчить про надійність і ефективність роботи системи при заданих умовах експлуатації.

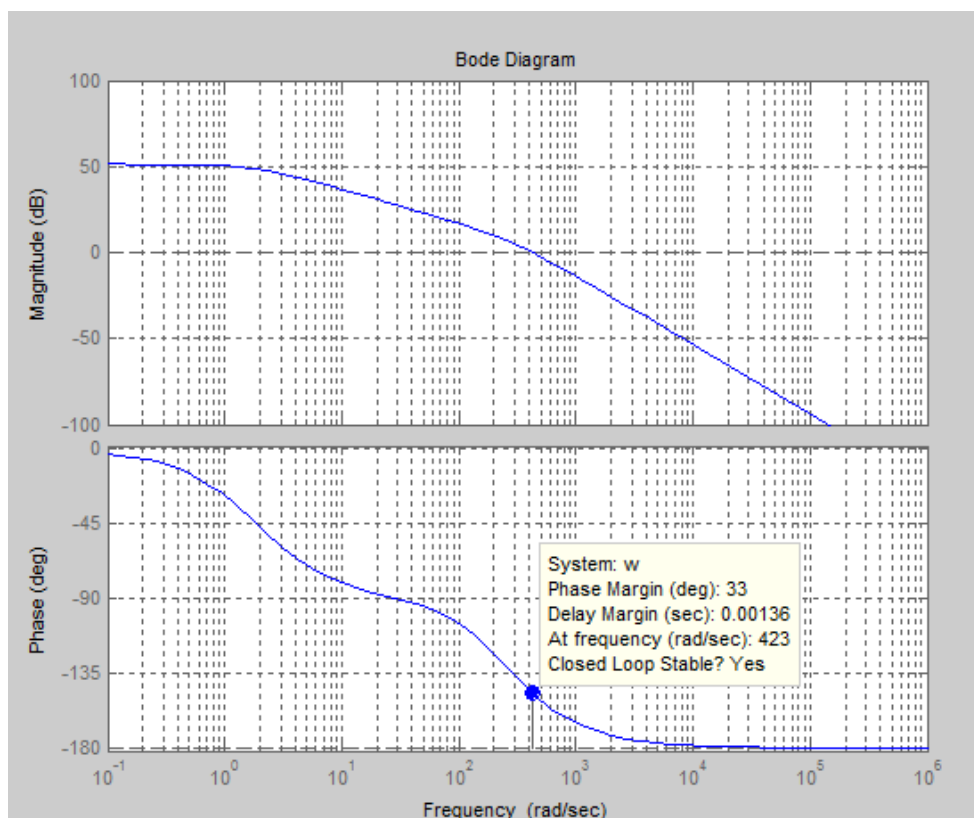


Рисунок 3.10 – ЛАЧХ та ЛФЧХ розробленого електропривода

Для аналізу стійкості системи використовуємо критерій Найквіста. Він розглядає три можливі сценарії: 1) У випадку, коли система є стійкою у розімкненому стані, її амплітудно-фазова характеристика (АФХ) при зміні частоти в діапазоні від 0 до нескінченності не повинна охоплювати точку з координатами $(-1, j=0)$. 2) Якщо АФХ системи проходить через зазначену точку, це свідчить про те, що система перебуває на межі стійкості. 3) Якщо ж система є нестійкою у розімкненому стані і в правій півплощині комплексної площини має k коренів, то

її АФХ при зміні частоти у діапазоні $0..∞$ повинна охоплювати точку з координатами $(-1, j=0)$ k -разів.

Послідовність проведення дослідження включає наступні етапи: 1) Виконати аналіз стійкості розімкненої системи на основі характеристичного рівняння, отриманого в ході розрахунків. 2) Визначити передавальну функцію системи в розімкненому стані, після чого провести заміну оператора p на $j\omega$. 3) Розділити отриману функцію на дійсну та уявну компоненти на комплексній площині, а також побудувати амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ) розімкненої системи.

За допомогою програмного забезпечення Matlab виконано обчислення коренів характеристичного рівняння досліджуваної системи (рис. 3.11). На основі отриманих даних побудовано амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ) для розробленого привода, що відображено на рис. 3.12.

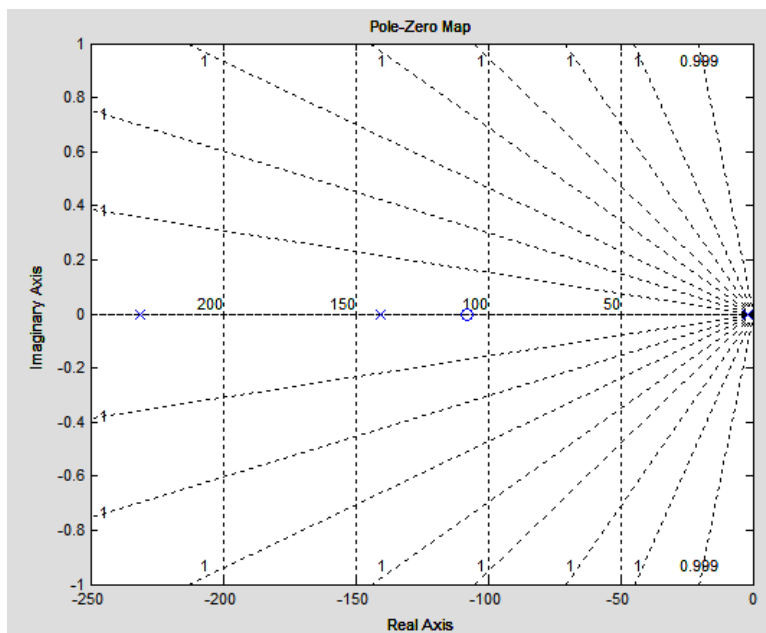


Рисунок 3.11 – Розміщення нулів і полюсів на комплексній площині

Система вважається стійкою лише за умови, що всі корені характеристичного рівняння є дійсними від’ємними числами або комплексними з від’ємною дійсною складовою. Цю умову, яка визначає стійкість, можна сформулювати таким чином: щоб забезпечити стійкість системи, потрібно і достатньо, аби всі корені характеристичного рівняння мали дійсну частину зі знаком мінус.

Якщо дійсна частина коренів характеристичного рівняння є від'ємною, це означає, що вони розташовані у лівій половині комплексної площини. У такому випадку критерій стійкості формулюється наступним чином: для забезпечення стійкості динамічної системи необхідно та достатньо, щоб усі корені характеристичного рівняння мали місце у лівій півплощині комплексної координатної системи.

Як видно з рис. 3.18, усі полюси, які є коренями характеристичного рівняння, розташовані у лівій півплощині комплексної координатної системи. Це дозволяє зробити висновок, що запропонована система є стійкою, оскільки її динамічні властивості відповідають необхідним критеріям стійкості.

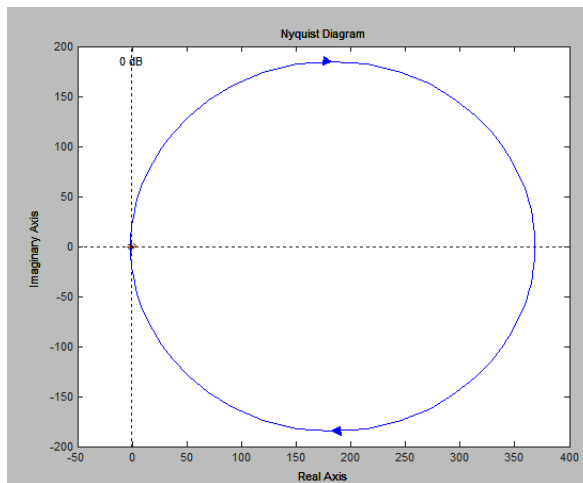


Рисунок 3.12 – Амплітудно-фазова частотна характеристика системи

Для забезпечення стійкості замкнутої системи необхідною та достатньою умовою є те, щоб амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) розімкнутої системи при зміні частоти ω у діапазоні від 0 до нескінченності не охоплювала точку з координатами $[-1, j0]$. Для перевірки цієї умови збільшуємо масштаб графіка АФЧХ (рисунок 3.13). Аналізуючи рис.3.12 та 3.13, можна побачити, що годограф АФЧХ проходить через три квадранти, що відповідає третьому порядку характеристичного рівняння системи, і при цьому не перетинає та не охоплює точку $[-1, j0]$. Таким чином, за критерієм Найквіста можна зробити висновок, що система є стійкою.

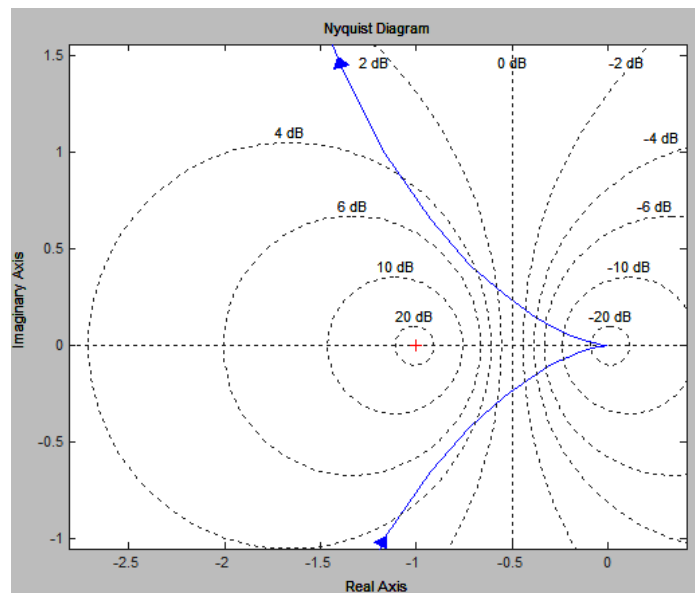


Рисунок 3.13 – Амплітудно-фазова частотна характеристика системи в збільшеному масштабі

4 Дослідження системи керування електроприводом сучасних СФС

4.1 Дослідження слідкуючого електроприводу системи орієнтації

У ряді наукових досліджень було проведено аналіз основних впливів, які впливають на роботу привода геліоустановки. Однак у цих роботах не приділено належної уваги питанням забезпечення точності та швидкодії при відпрацюванні вихідної координати електропривода. Крім того, залишилися недостатньо вивченими аспекти впливу зміни параметрів на характер перехідних процесів у роботі зазначеного електропривода (рис.4.1).

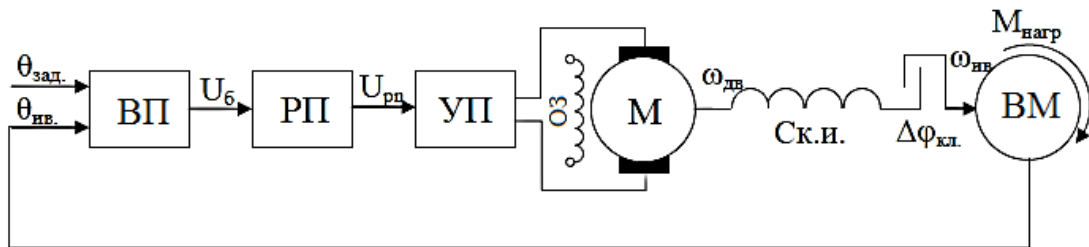


Рисунок 4.1 – Функціональна електромеханічна схема одно контурної СЕП СФЕС:

ВП – вимірювальний пристрій; РП – регулятор положення; УП – управляючий перетворювач напруги; М – двигун постійного струму з незалежною обмоткою збудження; ВМ – виконавчий механізм

Функціональна схема, наведена на рис.4.1, може бути представлена у вигляді лінеаризованої структурної моделі, зображеної на рис.4.2. Це пов'язано з тим, що кінематичний СЕП СФЕС має властивості нелінійності, зокрема зону нечутливості, яка впливає на її динамічні характеристики.

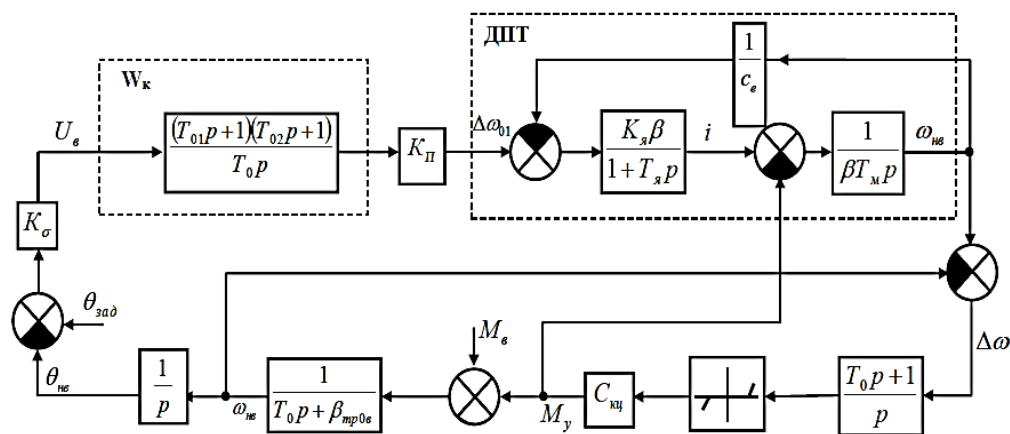


Рисунок 4.2 – Структурна схема СЕП СФЕС

Виходячи з передавальних функцій, наведених у структурній схемі (рис. 4.2), можна сформулювати диференціальні рівняння у прирощеннях. Для розрахунків використовувалися технічні характеристики та параметри двигуна постійного струму моделі ME215. У відповідності до передавальних функцій, роботу двигуна постійного струму можна описати двома диференціальними рівняннями, враховуючи загальновизнані спрощення та допущення.

$$J \frac{d\Delta\omega_{ДВ}}{dt} = k_M \Delta I - \Delta M_y, \quad (4.1)$$

де $\Delta\omega_{ДВ}$ – швидкість обертання якоря; ΔI – струм якоря; ΔM_y – приріст моменту навантаження; J – момент інерції; k_M – коефіцієнт пропорційності між моментом двигуна і струмом якоря, і рівнянням є. д. з в ланцюзі якоря.

$$T_{\alpha} \frac{d\Delta I}{dt} = k_{\alpha} (\Delta U_{\Pi} - c \Delta\omega) - I, \quad (4.2)$$

де ΔU_{Π} – зміна напруги на виході перетворювача; T_{α} – електромагнітна стала якоря; k_{α} – параметр, що дорівнює величині $1/r_{\alpha}$; r_{α} – опір кола якоря електродвигуна; c – коефіцієнт, який визначає пропорційність між електрорушійною силою (є. р. с.) і кутовою швидкістю ω .

Диференціальне рівняння, яке описує функціонування напрутового перетворювача, можна представити у наступному вигляді:

$$T_0 \frac{d\Delta U_{\Pi}}{dt} = K_{\Pi} K_{\epsilon} \Delta \Theta_{зад} - K_{\Pi} K_{\epsilon} T_{01} \Delta \omega_M - K_{\Pi} K_{\epsilon} \Delta \Theta_{нв}, \quad (4.3)$$

де K_{Π} – коефіцієнт передачі перетворювача сигналу; K_{δ} – коефіцієнт підсилення системи; T_{01} – постійна часу, що характеризує коректуючу ланку; $\Theta_{зад}$ – встановлений кут повороту сонячної енергетичної установки (СЕР); Θ_{IB} – реальний кут повороту виконавчого валу системи.

Похідну кута обертання (Θ_{IB}) виконавчого валу можна виразити у вигляді наступного рівняння.

$$\frac{d\Delta\Theta_{IB}}{dt} = \Delta\omega_{IB}, \quad (4.4)$$

де $\Delta\omega_{IB}$ – приріст кутової швидкості виконавчого валу.

Диференціальне рівняння для величини ω_{IB} може бути представлене в такій формі:

$$T_{IB} \frac{d\Delta\omega_{IB}}{dt} + \beta_{TPB} \Delta\omega_{IB} = \Delta M_y + \Delta M_B, \quad (4.5)$$

де ΔM_y – приріст моменту кута повороту; ΔM_B – приріст моменту повороту валу; β_{TPB} – коефіцієнт тертя валу; T_{IB} – постійна часу.

Диференціальне рівняння моменту ΔM_y , враховуючи гармонійну лінеаризацію, особливості виконавчої ланки із зоною нечутливості, а також вплив коефіцієнта $C_{K.II}$, може бути представлено у наступному вигляді.

$$\frac{d\Delta M_y}{dt} = C_{K.II} \cdot q(a) \left((T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB}) - ((T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB})) \right), \quad (4.6)$$

де $C_{K.II}$ – коефіцієнт пружності.

$$q(a) = k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \right). \quad (4.7)$$

Отже, математична модель у вигляді лінеаризованих диференціальних рівнянь, що характеризує динамічні процеси сонячної енергетичної установки, набуває наступної форми.

$$\frac{d\Delta\omega_{IB}}{dt} = \frac{1}{T_{IB}} (\Delta M_y + \Delta M_B) - \frac{\beta_{TP.B}}{T_{IB}} \Delta\omega_{IB};$$

$$\frac{d\Theta_{IB}}{dt} = \Delta\omega_{IB};$$

$$\frac{d\Delta U_{II}}{dt} = \frac{K_{II}K_{\bar{\theta}}}{T_0} \Delta\Theta_{зад} - \frac{T_{01}K_{II}K_{\bar{\theta}}}{T_0} \Delta\omega_{ue} - \frac{K_{II}K_{\bar{\theta}}}{T_0} \Delta\Theta_{IB}; \quad (3.8)$$

$$\frac{d\Delta I_{\gamma}}{dt} = \frac{k_{\gamma}}{T_{\gamma}} \Delta U_{II} - \frac{k_{\gamma}k_e}{T_{\gamma}} \Delta\omega - \frac{1}{T_{\gamma}} \Delta I_{\gamma};$$

$$\frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} = \frac{1}{J} \Delta M - \frac{1}{J} \Delta M_y;$$

$$\frac{d\Delta M_y}{dt} = C_{K.Ц.} \cdot q(a) \left((T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB}) - ((T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB})) \right).$$

Модель була розроблена на основі системи рівнянь (4.8). Її структурну схему, створену та реалізовану у програмному середовищі MATLAB, можна побачити на рис.4.3.

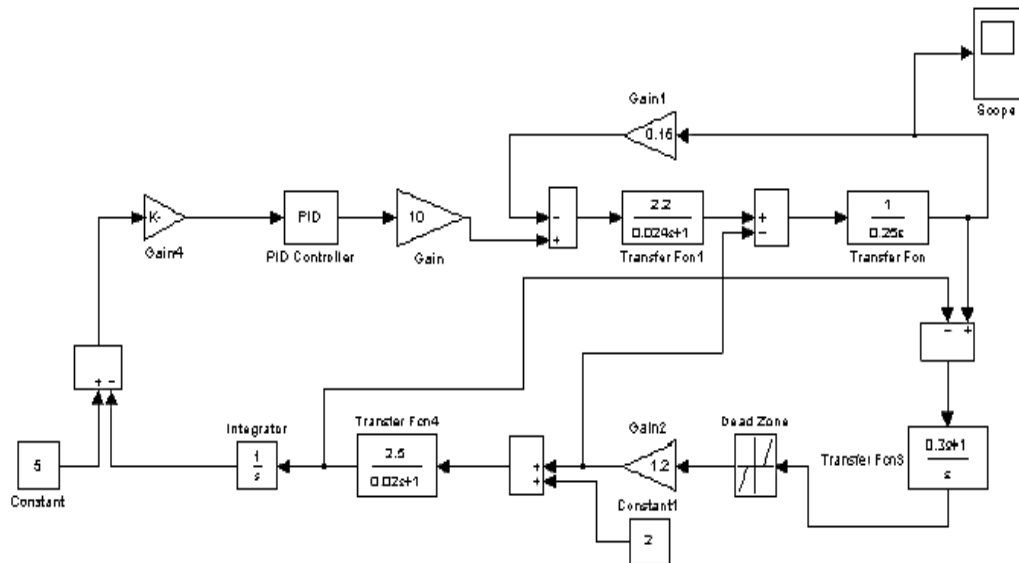


Рисунок 4.3 – Структурна схема моделі СЕП СФЕС в MATLAB

На основі моделювання була отримана осцилограма $\Theta(t)$ (рис. 4.4), яка демонструє, що ступінь перерегулювання досягає 60%, тривалість процесу регулювання становить 6 секунд, а кількість коливань дорівнює трьом. Такий результат не відповідає встановленим вимогам щодо точності та швидкодії системи, що вказує на необхідність подальшої оптимізації параметрів управління.

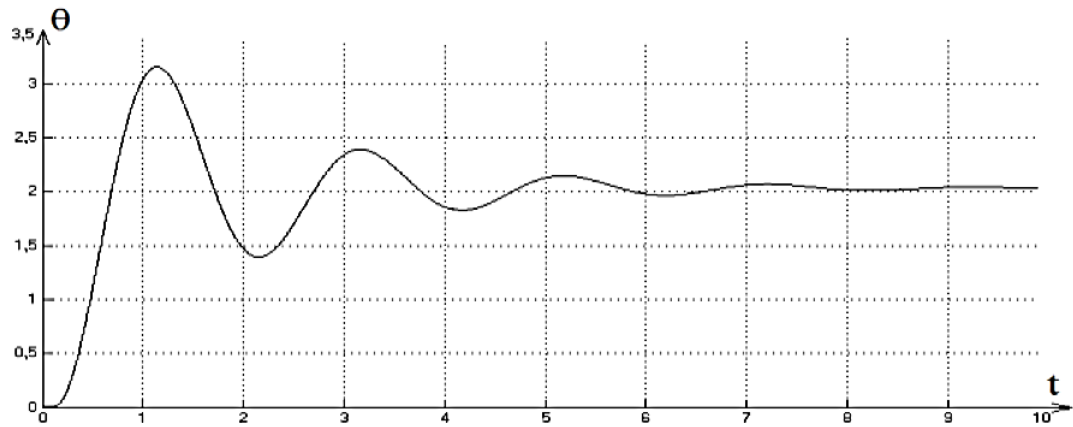


Рисунок 4.4 – Перехідний процес кута повороту задаючого і відпрацьовування осі виконавчого валу.

Для досягнення кращих показників якості перехідних процесів у СЕП доцільно використовувати зворотний зв'язок за швидкістю. Регулюючи коефіцієнт зворотного зв'язку, параметри передачі регулятора швидкості та часові характеристики регулятора, можна підвищити жорсткість механічної характеристики привода. Це також сприятиме зниженню загальної електромеханічної сталої часу системи, усуненню інерційності перетворювача напруги та підвищенню ефективності керування всією системою.

Рівняння, що описують роботу керованого напругового перетворювача та регулятора швидкості, за умови, що перетворювач напруги вважається безінерційним, а регулятор швидкості функціонує як пропорційна ланка, можуть бути представлені у наступному вигляді.

$$\Delta U_{УП} = k_{П} \Delta U_{РС}, \quad (4.9)$$

$$\Delta U_{РС} = \Delta U_{РП} - k_{ОС} \Delta \omega_{ДВ}. \quad (4.10)$$

де k_n – коефіцієнт передачі керованого перетворювача; $k_{зз}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку; $\Delta U_{РС}$ – приріст напруги регулятора швидкості; $\Delta U_{РП}$ – приріст напруги регулятора положення; РШ – регулятор швидкості.

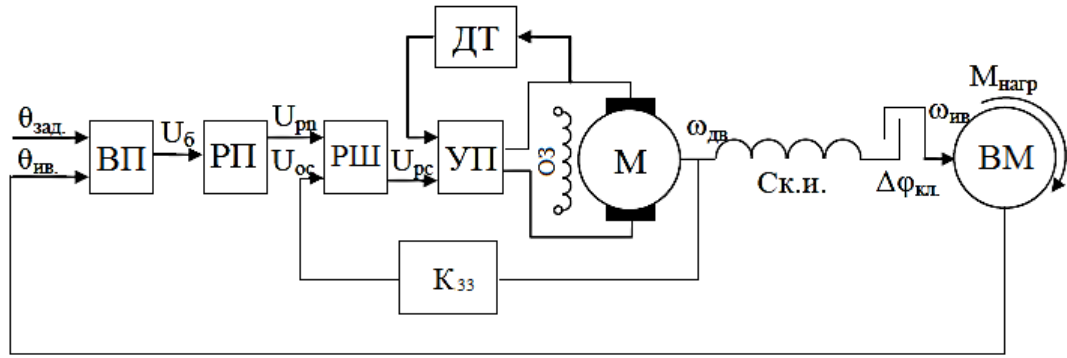


Рисунок 4.5 – Електромеханічна схема двоконтурного СЕП СФЕС:

Диференціальне рівняння, яке характеризує динамічну поведінку ланки РП, можна подати у такій формі:

$$T_0 \frac{d\Delta U_{РП}}{dt} = (T_{K1} + 1)U_{\delta} = k_B(T_{K1} + 1)(\Theta_{зад} - \Theta_{ИБ}) , \quad (4.11)$$

або так

$$\frac{d\Theta_{ИБ}}{dt} = \Delta\omega_{ИБ} .$$

Рівняння можна записати в наступному виді

$$T_0 \frac{d\Delta U_{РП}}{dt} = -k_B T_{K1} \omega_{ИБ} + k_B \Theta_{зад} - k_B \Theta_{ИБ} . \quad (4.12)$$

У даному випадку математичне представлення двоконтурної системи енергопостачання СФЕС можна подати у такій формі.

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_{ДВ}}{dt} &= \frac{1}{J} \Delta M - \frac{1}{J} \Delta M_y , \\ \frac{d\Delta I_{я}}{dt} &= \frac{k_{я}}{T_{я}} \Delta U_{П} - \frac{k_{я} k_e}{T_{я}} \Delta\omega - \frac{1}{T_{я}} \Delta I_{я} ; \\ \Delta U_{УП} &= k_{П} (\Delta U_{РП} - k_{ОС} \Delta\omega_{ДВ}) ; \\ T_0 \frac{d\Delta U_{РП}}{dt} &= k_B \Theta_{зад} - k_B T_{K1} \Delta\omega_{ИБ} - k_B \Theta_{ИБ} ; \\ \frac{d\Theta_{ИБ}}{dt} &= \Delta\omega_{ИБ} ; \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\frac{d\Delta\omega_{HB}}{dt} = \frac{1}{T_{HB}}(\Delta M_y + \Delta M_B) - \frac{\beta_{TP.B}}{T_{HB}} \Delta\omega_{HB};$$

$$\frac{d\Delta M_y}{dt} = C_{K.II} \cdot q(a) \left((T_0 \frac{d\Delta\omega_{DB}}{dt} + \Delta\omega_{DB}) - ((T_0 \frac{d\Delta\omega_M}{dt} + \Delta\omega_{DB})) \right).$$

На основі рівнянь системи (4.13) було розроблено модель двоконтурної СЕП СФЕС) Відповідна структурна схема цієї моделі, створеної та реалізованої у середовищі MATLAB, представлена на рис.4.6.

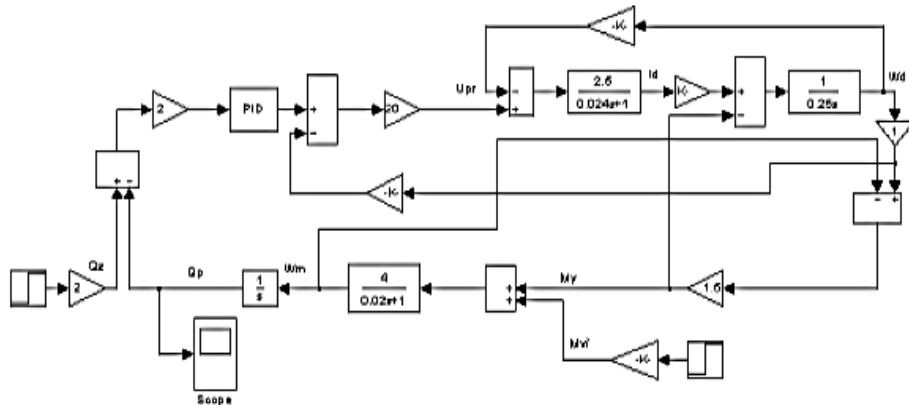


Рисунок 4.6 – Блок-схема двоконтурної моделі системи енергопостачання сонячної фотоелектричної станції, реалізована в середовищі MATLAB.

Графік залежності $\Theta(t)$, отриманий у ході проведення моделювання, наведено на рис.4.7.

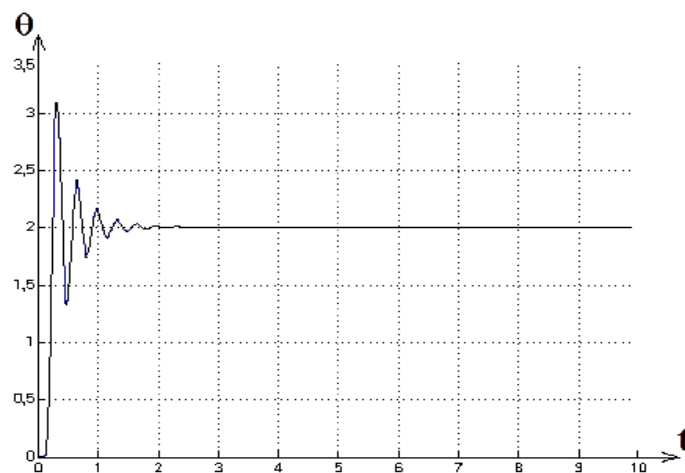


Рисунок 4.7 – Графічне зображення перехідного процесу кута повороту між заданою та фактичною осями двоконтурної СФЕС демонструє динамічні характеристики роботи системи.

Як показано на рис.4.7, значення перерегулювання становить 50%, а час регулювання дорівнює 1,75 с. Такі показники не відповідають установленим вимогам щодо точності та швидкодії СЕП СФЕС. Це вказує на необхідність удосконалення параметрів системи для забезпечення її відповідності заданим стандартам.

Аналіз графіків перехідних процесів, що відображають кути повороту заданої та відпрацьованої осі двоконтурної СЕП СФЕС, свідчить про невідповідність ключових параметрів якості вимогам, що висуваються до подібних систем. Зокрема, було зафіксовано перевищення допустимої величини перерегулювання, підвищену кількість коливань, а також тривалий час регулювання, що не відповідає встановленим стандартам для забезпечення належної якості перехідних процесів.

У представлений системі не враховано можливість зниження чутливості управління при зміні її параметрів. Для вирішення цього недоліку було розроблено систему зі змінною структурою, яка забезпечує покращення якості перехідних процесів та зменшення чутливості до змін характеристик. Перед тим як перейти до аналізу структурної схеми СЕП геліоустановки зі змінною структурою, варто детально розглянути електромеханічну схему одноконтурної системи електропривода СФЕС із СЗС, яка зображена на рис.4.8.

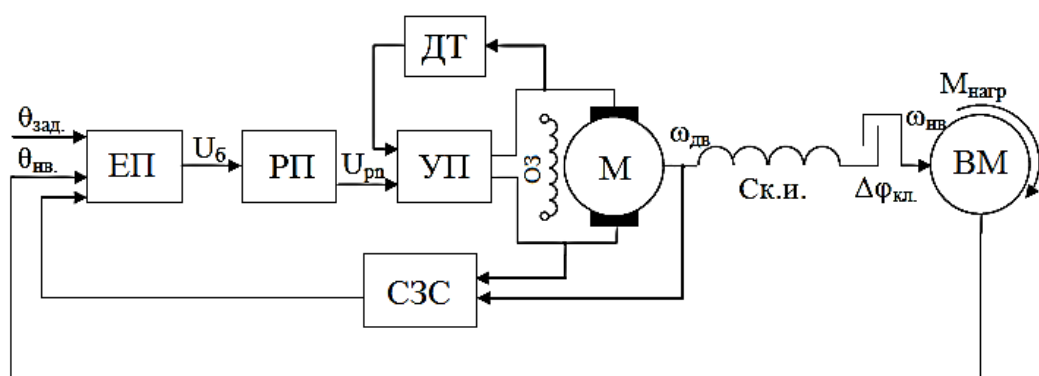


Рисунок 4.8 – Електромеханічна схема одно контурної СЕП СФЕС з СЗС:

ЕП – це елемент для порівняння сигналів; РП – пристрій, що забезпечує регулювання положення платформи; УП – перетворювач, який управляє напругою; СЗС – система із змінною структурою, що адаптується до умов роботи;

У результаті моделювання було отримано характеристики перехідного процесу кута повороту між заданою та фактично відпрацьованою осями моделі СЕП СФЕС із застосуванням системи стабілізації.

Аналіз показує, що перерегулювання відсутнє (рис. 4.10), кількість коливань також дорівнює нулю, а час стабілізації становить 4 секунди. Варто зазначити, що форма отриманої кривої перехідного процесу (рис. 4.11) збігається з експериментальними даними з точністю до 5%, що підтверджує коректність проведеного моделювання.

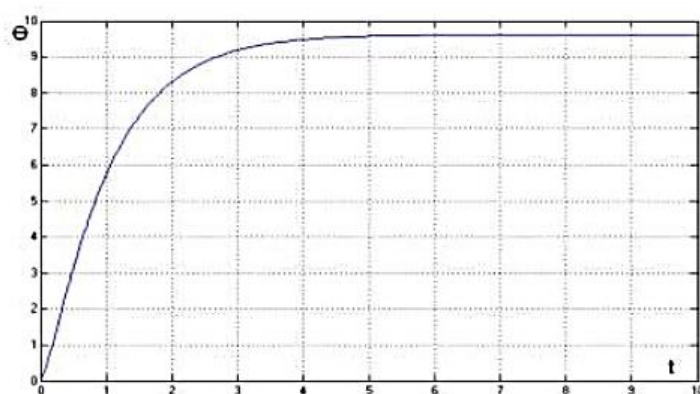


Рисунок 4.10 – Графік перехідного процесу, який демонструє зміну кута повороту, був сформований та проаналізований для осі СЕП СФЕС із застосуванням системи СЗС. Результати отримано шляхом комп'ютерного моделювання, виконаного у програмному середовищі MATLAB.

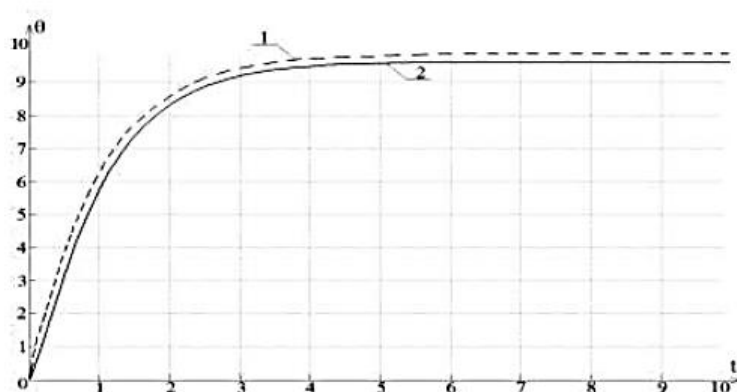


Рисунок 4.11 – Криві перехідного процесу:

1 – експериментальні дані, 2 – крива, побудована на основі моделювання.

Використання системи зі змінною структурою дозволило звести до мінімуму вплив зовнішніх збурень на слідкуючий електропривод системи управління, що позитивно позначилося на підвищенні її функціональної якості. Завдяки цьому значно зменшується споживання енергії, необхідної для компенсації збурюючих впливів, що робить роботу такого слідкуючого електроприводу більш енергоефективною.

4.2. Розрахунок ефективності використання електроприводу в системі керування

При використанні методу неперервного руху для покрокового слідкування за Сонцем, енергетичну економію в електроприводі можна оцінити через коефіцієнт ефективності. Цей коефіцієнт визначається як співвідношення втрат енергії в електроприводі, що виникають при неперервному відстежуванні Сонця, до втрат, які спостерігаються в разі покрокового слідкування

$$K_{\text{ЕФ}} = \frac{\Delta P_{\text{СП}} \cdot t_{\text{С}}}{\Delta W_{\text{Ш}} \cdot N_{\text{Ш}}}, \quad (4.14)$$

де $\Delta P_{\text{СП}}$ – загальні втрати потужності, що виникають в двигуні при неперервному слідкуванні, Вт; $\Delta W_{\text{Ш}}$ – втрати енергії, що виникають в двигуні при виконанні одного кроку, Дж; $t_{\text{С}}$ – час неперервного слідкування, с; $N_{\text{Ш}}$ – кількість кроків виконаних за час слідкування.

Втрати $\Delta P_{\text{СП}}$ будемо розраховувати для електроприводу, який оснащений перетворювачем напруги на транзисторах, що працюють у підсилювальному режимі. Цей тип електроприводу буде обрано як основний варіант. Важливо зазначити, що механічна частина установки не зазнала змін при переході від безперервного до крокового режиму, оскільки безперервне стеження здійснюється при обертах двигуна, що значно нижчі за номінальні. Вищі швидкості будуть використовуватися для режиму «перекидання», коли установка здійснює обертання від заходу на схід після заходу Сонця, а також для режиму «захоплення цілі». Втрати, що виникають у приводі, можна представити як суму постійних та

змінних втрат у двигуні, а також втрат, що виникають у силовому регуляторі напруги

$$\Delta P_{СП} = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{МЕХ} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_{Щ} + \Delta P_{Я} + \Delta P_{СП} + \Delta P_{СР}, \quad (4.15)$$

де $\Delta P_{СТ}$ і $\Delta P_{МЕХ}$ – втрати в сталі і механічні втрати в двигуні при швидкості, що відповідає швидкості неперервного слідування, Вт; $\Delta P_{ДОБ}$ і $\Delta P_{СТ}$ – додаткові втрати і втрати, що виникають в обмотці збудження, Вт; $\Delta P_{Я}$ – втрати, що виникають в обмотці якоря, Вт; $\Delta P_{Щ}$ – втрати потужності на щіткових контактах в електродвигуні, Вт; $\Delta P_{СР}$ – втрати потужності в силовому регуляторі напруги, Вт.

Припускаємо, що магнітний потік у постійному струмі двигуна залишається сталим і відповідає його номінальному значенню. Втрати, які виникають у сталі, а також механічні втрати в самому двигуні, будуть розглянуті і представлені в наступній формі

$$\begin{aligned} \Delta P_{СТ} &= \Delta P_{СТ.НОМ} \cdot \left[\frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} \\ \Delta P_{МЕХ} &= \Delta P_{МЕХ.НОМ} \cdot \left[\frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} \end{aligned} \quad (4.16)$$

де ω_C – швидкість виконавчого вала в процесі безперервного спостереження, рад/с; i – передавальне відношення кінематичного ланцюга; $\omega_{НОМ.ДВ}$ – номінальна швидкість двигуна, рад / с.

Змінні втрати в двигуні визначаються рівняннями

$$\begin{aligned} \Delta P_{Я} &= I_{СТ}^2 \cdot R_{НОМ}, \\ \Delta P_{Щ} &= 2U_{Щ} \cdot I_{СТ}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

де $I_{СТ}$ – статичний струм якоря двигуна, А; $U_{Щ}$ – падіння напруги на щітковому контакті, Вт; $R_{НОМ}$ – опір якоря, Ом.

Втрати потужності в силовому регуляторі представимо виразом

$$\Delta P_{СТ} = \Delta U_{СР} \cdot I_{СТ}, \quad (4.18)$$

де $\Delta U_{СР}$ – падіння напруги в силовому регуляторі напруги, В.

Основне навантаження на двигун обумовлено силами сухого та в'язкого тертя, що виникають у кінематичному ланцюзі. Вітрове навантаження має

незначний вплив на загальне навантаження. Зважаючи на те, що статичний струм I_{CT} і напруга U_C можуть відрізнятися від номінальних значень струму I_H та напруги U_H для двигуна, слід розрахувати падіння напруги на силовому регуляторі з урахуванням цих відмінностей

$$\begin{aligned} U_C &= E_{ДВ} + I_{CT} \cdot R_H + \Delta U_{CP}, \\ U_H &= E_{ДВ.Н} + I_H \cdot R_H, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де $E_{ДВ}$ і $E_{ДВ.Н}$ – ЕРС двигуна в умовах безперервного моніторингу під час його роботи та в стандартному номінальному режимі

$$\begin{aligned} E_{ДВ} &= \kappa \Phi \cdot i \omega_C, \\ E_{ДВ.Н} &= \kappa \Phi \cdot \omega_C, \end{aligned} \quad (4.20)$$

де κ – конструктивний коефіцієнт двигуна; Φ – магнітний потік у двигуні, Вб.

З рівняння (4.18) та (4.20) можна визначити падіння напруги на силовому регуляторі наступним чином

$$\Delta U_{CP} = K \Phi \omega_H \cdot \left[1 - \frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right] + (I_H + I_{CT}) R_H + (U_C - U_H). \quad (4.21)$$

Час, протягом якого здійснюється безперервне спостереження, буде визначено наступним чином

$$t_c = \frac{\theta_3}{\omega_C} \quad (4.22)$$

де θ_3 – результуючий кут повороту за весь сеанс стеження.

Енергетичні втрати, що виникають у двигуні та силовій електричній частині під час виконання одного кроку, можна обчислити наступним чином

$$\begin{aligned} \Delta W_{III} = \int_0^{t_1} & \left[\Delta P_{CT.НОМ} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right]^{1.3} + \Delta P_{МЕХ} \cdot \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{НОМ.ДВ}} \right] \right] + \\ & + \int_0^{t_1} \left(I^2 R_H + (2U_{III} + U_{CP}^{ПК}) I + \Delta P_H + \Delta_{ДОП} \right) dt + \Delta W_n^{III} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Базуючись на отриманих величинах тривалості роботи приводного двигуна протягом окремого циклу (t_1 , с), величини спаду напруги на силовому елементі в

активному стані (ΔU , В) та енергетичних втрат у перехідному процесі струму збудження (W_n , Дж), розраховується необхідна кількість енергії.

Двигун стеження, що застосовується, може бути оснащений обмоткою збудження, що працює незалежно, або ж збудженням, яке генерується постійними магнітами.

Згідно з проектом, обмотка збудження вимикається в періоди між кроками, а її повторне включення відбувається з деяким випередженням, перед подачею напруги на якір двигуна на час t_0 . Для оцінки втрат в системі збудження в цей проміжок часу достатньо використовувати наближені методи

$$\Delta W_n^{III} = \int_0^{t_0} I_H R_H dt = I_{HMT}^2 R_H dt = I_{HMT} R_H \int_0^{t_0} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt \approx I_{HMT}^2 R_H (t_0 - 1.5T) = \Delta P_n (t_0 - 1.5T_B) \quad (4.24)$$

$$t_0 > 3T_B$$

У випадку, коли система збудження двигуна побудована на базі постійних магнітів, всі розрахунки повинні враховувати значення ΔP_B , яке дорівнює 0. Це обумовлено тим, що при використанні постійних магнітів зміни в збудженні не впливають на роботу двигуна, тому параметр ΔP_B не потребує коригування.

Швидкість обертання виконавчого вала ω та якоря I змінюється в залежності від часу

$$\omega = \omega_{III} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right], \quad (4.25)$$

$$I = I_{CT} + (I_{K3} - I_{CT}) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (4.26)$$

У формулах (4.23) і (4.24) не враховано вплив електромагнітної сталої часу якоря. Таке спрощення базується на припущенні, що для двигунів з низькою потужністю виконується умова $T_M \gg T_{яц}$. У зв'язку з цим були отримані графічні залежності (рис. 4.12), що показують зміну швидкості, кута повороту та струму якоря двигуна в залежності від часу.

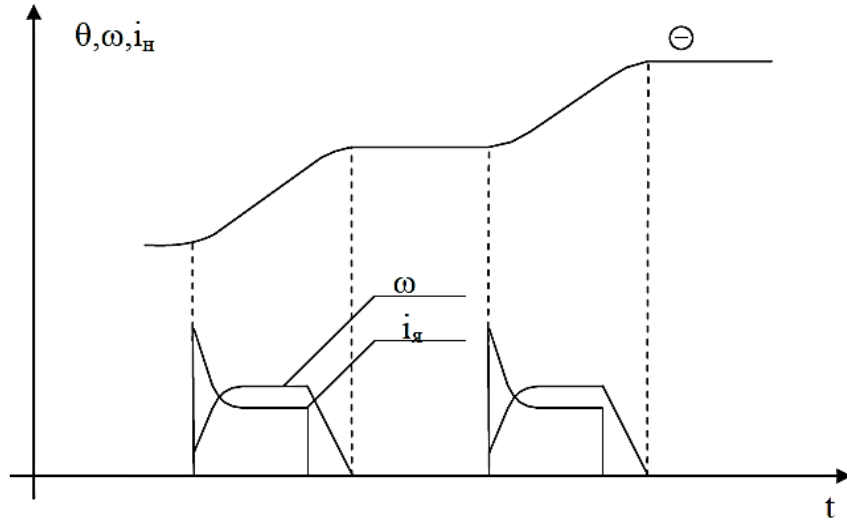


Рисунок 4.12 – Залежність електричного струму в двигуні (I) від швидкості (ω) та кута повороту (Θ) в контексті часу під час покрокового режиму автосупроводу Сонця.

У період переходу струм якоря двигуна значно перевищує його номінальне значення. Це викликає реакцію якоря, яка спричиняє зниження магнітного потоку в двигуні. Однак час, протягом якого струм якоря досягає найвищих значень, значно коротший за загальну тривалість перехідного процесу. Додатково, при розробці двигунів малої потужності застосовуються спеціальні технічні рішення для мінімізації впливу реакції якоря. Тому, для оцінки потужності, часто вважається, що магнітний потік у двигуні є сталим і відповідає номінальному значенню.

Тоді інтеграл визначиться наступним чином

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{t_0} \left[\Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right]^{1,3} + \Delta P_{MEX.KM} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right] - I^2 R_H + (2U_{ш} + U_{CP}^{HOM}) \cdot I + \Delta P_B + \Delta P_{ДОБ} \right] dt = \\
 & = \Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right]^{1,3} \cdot \int_0^{t_0} \left[1 - e^{-\frac{1}{T_1}} \right]^{1,3} dt + \Delta P_{MEX.HOM} \frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \int_0^{t_1} \left[1 - e^{-\frac{1}{T_M}} \right] dt + \\
 & + R_H \int_0^{t_1} (I_{C2} + (I_{K3} - I_{C2}) \cdot e^{-\frac{1}{T_M}})^2 dt + (2U_{ш} + \Delta U_{CP}) \cdot \int_0^{t_1} \left[I_{C2} - (I_{K3} - I_{C2}) \cdot e^{-\frac{1}{T_M}} \right] dt + \Delta P_B t_1 + \Delta P_{ДОБ} t_1
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Процес інтегрування (4.27) виконується за умови, що степінь 1,3 підінтегральної функції замінюється на одиницю. В результаті застосування цього припущення, інтеграція (4.27) дає змогу отримати наступне рівняння

$$\begin{aligned}
\Delta W_{ш} &= \Delta P_{CT.HOM} \left[\frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right]^{1,3} \cdot \left[t + T_M \cdot e^{\frac{t}{T_M}} \right] + \Delta P_{MEX.HOM} \frac{\omega_C \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \left[t + T_M e^{\frac{t}{T_M}} \right] + \\
&+ R_H \left[I_{C2}^2 + 2I_{C2} (I_{K3} - I_{C2}) \left[-T_M e^{\frac{t}{T_M}} \right] \right] + (2U_{ш} + \Delta U_{CT}) \left[I_{CT} t + (I_{K3} - I_{C2}) \left[T_M e^{\frac{t}{T_M}} \right] \right] + \\
&\Delta P_H t_1 + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_H (t_B - 1.5T_B) = \\
&= \left(\left[\frac{\omega_{ш} \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right] \Delta P_{MEX.HOM} + \left[\frac{\omega \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right]^{1,3} \Delta P_{CT.HOM} + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_H \right) \cdot t_1 + \\
&+ (I_{C2}^2 R_H + (2U_{ш} + U_{CP}^{CT}) \cdot t_1) + T_M \left[\frac{\omega_{ш} \cdot i}{\omega_{HOM.DB}} \right] (\Delta P_{CT.HOM} + \Delta P_{MEX.HOM}) \cdot \left[e^{\frac{t_1}{T_M}} - 1 \right] + \\
&+ \left[(I_K - I_{C2})^2 \left[-\frac{T_M}{2} \right] \cdot R_{Я} \left[e^{\frac{2t_1}{T_M}} - 1 \right] + \Delta P_B (t_0 - 1.5T_B) \right].
\end{aligned}$$

Отриманий вираз можна спростити, якщо врахувати, що при постійній швидкості обертання виконавчого валу $\omega_{ш}$ протягом одного кроку, вал двигуна обертається з номінальною або дуже близькою до неї швидкістю.

У разі, коли відхилення від номінальної швидкості обертання вала двигуна можливе, це коригується за допомогою коефіцієнта

$$K_{OT} = \frac{\omega_{ш} \cdot i}{\omega_{HOM.DB}}. \quad (4.28)$$

У цьому випадку кількість кроків, які будуть виконані під час сеансу стеження, можна визначити за допомогою наступного виразу

$$N_{ш} = \frac{\theta_1}{\theta_{ш}}, \quad (4.29)$$

де $\theta_{ш}$ – величина кроку. Запишемо вираз в наступному вигляді

$$K_{E\Phi} = \frac{\theta_{ш}}{\omega_C} \cdot \frac{A \left[\frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \right] + D}{\Delta P_{УСТ} \cdot K_1 \cdot t_1 + K_1 e^{\frac{t_1}{T_M}} + K_2 e^{\frac{2t_1}{T_M}} + K_3}, \quad (4.30)$$

де $A[\omega_C / \omega_{ш}]$, поліном $\frac{\omega_C}{\omega_{ш}}$.

$$A \left[\frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \right] = K_{OT} \Delta P_{MEX.HOM} \cdot \left[\frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \right] + K_{OT}^{1,3} \Delta P_{CT.HOM} \cdot \left[\frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \right]^{1,3} + K_{\Phi} \omega_H \left[1 - \frac{\omega_C}{\omega_{ш}} \cdot K_{OT} \right],$$

D – параметр, що не залежить від швидкості обертання валу двигуна

$$D = \Delta P_{\text{ДОБ}} + \Delta P_{\text{Я}} + I_{C1}^2 R_{\text{Я}} + 2U_{\text{Щ}} I_{C1} + (I_{\text{H}} + I_{C1}) I_{C1} R_{\text{Я}} + (U_{\text{C}} - U_{\text{H}}) I_{C1}.$$

$\Delta P_{\text{УСТ}}$ – втрати протягом кроку в сталому режимі, Вт

$$\Delta P_{\text{УСТ}} = K_{\text{ОТ}} \Delta P_{\text{МЕХ.НОМ}} + K_{\text{ОТ}}^{1,3} + K_{\text{ОТ}}^{1,3} \Delta P_{\text{ДОБ}} + \Delta P_{\text{Я}} + I_{C2}^2 R_{\text{Я}} + (2U_{\text{Щ}} + U_{\text{CP}}^{\text{ОТ}}) I_{C2}.$$

$K1, K2, K3$ – коефіцієнти

$$K_1 = T_{\text{М}} K_{\text{ОТ}} (\Delta P_{\text{СТ.НОМ}} + \Delta P_{\text{МЕХ.НОМ}}) - T_{\text{М}} (I_{K3} - I_{C2}) (2U_{\text{Щ}} + U_{\text{CP}}^{\text{НОМ}} + 2I_{C2} R_{\text{H}}),$$

$$K_2 = (I_{K1} - I_{C2})^2 \left[-\frac{T_{\text{М}}}{2} \right] R_{\text{Я}},$$

$$K_3 = -K_1 - K_2 + \Delta P_{\text{H}} (t_0 - 1.5T_0), \text{ або}$$

$$K_3 = T_{\text{М}} \left[\frac{0,5(I_{K3} - I_{C2})^2 \cdot R_{\text{Я}} + (I_{K1} - I_{K2}) \cdot (2U_{\text{Щ}} + U_{\text{CP}}^{\text{НОМ}} + 2I_{C2} R_{\text{Я}}) -}{K_{\text{ОТ}} (\Delta P_{\text{СТ.НОМ}} + \Delta P_{\text{МЕХ.НОМ}})} \right] + \Delta P_{\text{В}} (t_0 - 1.5T_{\text{В}}). \quad (4.31)$$

Формула (4.31) є зручним інструментом для аналізу впливу різних параметрів двигуна на коефіцієнт K_3 .

Параметр кроку $\theta_{\text{Щ}}$ визначається як сума переміщень, що відбуваються під час роботи двигуна та процесу гальмування, враховуючи всі зміни, які можуть виникнути в цих режимах

$$\theta_{\text{Щ}} = \theta_1 + \theta_2. \quad (4.32)$$

Процес гальмування реалізується при розірваному ланцюзі якоря і здійснюється за допомогою сил тертя. Відповідно, основне рівняння механічного руху для даного випадку можна виразити наступним чином

$$-M_i = J \cdot \frac{d\omega_{\text{ДВ}}}{dt}, \quad (4.33)$$

де M_i – величина моменту опору на валу двигуна, вимірювана в ньютон-метрах (Н·м); J – момент інерції приводу, адаптований до валу двигуна, виражений у кг·м²; $\omega_{\text{ДВ}}$ – початкова швидкість обертання двигуна під час гальмування, вимірювана в радіанах на секунду (рад/с).

З рівняння (4.33) визначаємо величину $\omega_{\text{ДВ}}$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \omega_{\text{ноч}} i - \frac{M_{\text{C}}}{J} t, \quad (4.34)$$

де $\omega_{поч}$ – швидкість двигуна на початку гальмування, рад/с.

$$\omega_{поч} = \omega_{ш} i \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]. \quad (4.35)$$

Кут повороту робочого органу протягом часу гальмування t_τ , до досягнення повної зупинки, становить

$$\theta_2 = \frac{1}{i} \int_0^{t_\tau} \left(\omega_{поч} - \frac{M_C}{J'} t \right) dt = \frac{1}{i} \left[\omega_{поч} t - \frac{M_C}{2J'} t^2 \right] = \frac{1}{i} \omega_{поч} t_\tau - \frac{M_C}{2iJ'} t_\tau^2. \quad (4.36)$$

Час гальмування буде розрахований за допомогою рівняння (4.34)

$$\begin{aligned} \theta &= \omega_{поч} t_\tau - \frac{M_C}{J'} t_\tau^2, \\ t_\tau &= \omega_{поч} \frac{J'}{M_C}. \end{aligned} \quad (4.37)$$

Таким чином виводимо θ_2 з виразів (4.35–4.37)

$$\theta_2 = \frac{J' \cdot i}{2M_C} \omega_{ш}^2 \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]^2. \quad (4.38)$$

Кут повороту робочого елемента протягом роботи двигуна обчислюється наступним чином

$$\theta_1 = \omega_{ш} \int_0^{t_1} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right] dt = \omega_{ш} \left[t + T_M e^{-\frac{t}{T_M}} \right] = \omega_0 \left[t_1 + T_M e^{-\frac{t_1}{T_M}} - T_M \right]. \quad (4.39)$$

В результаті розрахунків визначаємо остаточне значення кроку за наступною формулою

$$\theta_{ш} = \omega_{ш} t_1 + \frac{\omega_{ш}^2 J' \cdot i}{2M_C} \left[1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right]^2 + \omega_{ш} T_M e^{-\frac{t_1}{T_M}} - T_M \omega_{ш}. \quad (4.40)$$

Якщо припустити, що t_1 є більшим за $(3...4)T_M$, то значення кроку можна обчислити за наступною формулою

$$\theta_{ш} = \omega_{ш} (t_1 - T_M). \quad (4.41)$$

Вираз для коефіцієнта ефективності можна спростити

$$K_{ef} = \frac{\omega_{ш}}{\omega_c} \cdot \frac{A \left[\frac{\omega_c}{\omega_{ш}} \right] + D}{\Delta P_{уст} + B \frac{\omega_{ш}}{\theta_{ш}}}, \quad (4.42)$$

де B – параметр, що відображає втрати енергії в перехідному процесі.

$$B = K_3 + T_M \Delta P_{уст}.$$

У випадку, коли система збудження двигуна базується на використанні постійних магнітів, параметр B буде визначатися наступним чином

$$B = T_m \cdot \left[\frac{1}{2} (I_{K3} - I_{C2}) \cdot R_{Я} + (I_{K3} - I_{C2}) \cdot (2U_{ш} + U_{CP} + 2I_{C2} R_{Я} - K_{OT} (\Delta P_{CT.HOM} + \Delta P_{MEX.HOM}) + \Delta P_{уст} \right]. \quad (4.43)$$

На рисунку 4.13 зображено залежність коефіцієнта K_{ef} від кута $\theta_{ш}$, яка побудована за рівнянням (4.42) для двигуна постійного струму з збудженням від постійних магнітів типу ME215. Номінальна потужність цього двигуна складає 50 Вт. Електромеханічна стала часу приводу встановлена на рівні 0,1 с, а електромагнітна стала часу прийнята рівною нулю. Залежність K_{ef} від кута $\theta_{ш}$, представлена на рисунку 4.13, побудована для постійної швидкості кроку $\omega_{ш} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ рад/с, за різних значень відношення $\omega_{ш}/\omega_c$.

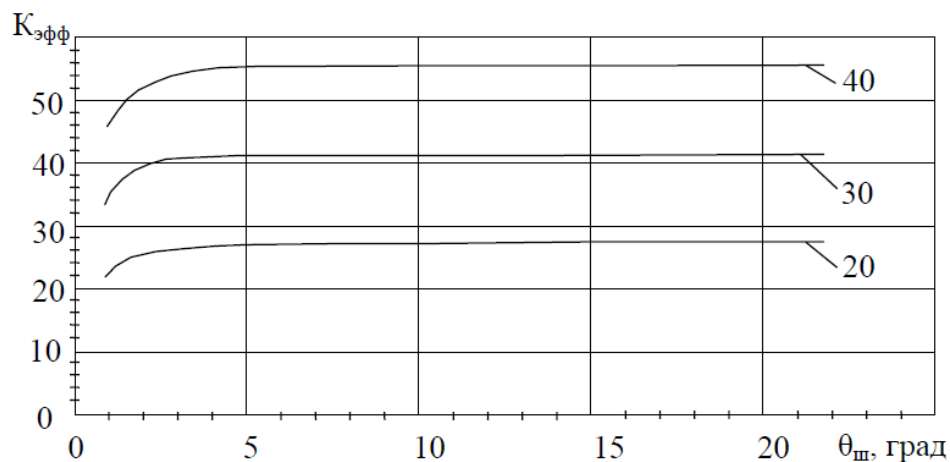


Рисунок 4.13 – Залежність K_{ef} при незмінній швидкості кроку $\omega_{ш} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ рад/с і різних відношеннях $\omega_{ш} / \omega_c$

Аналізуючи графік, можна відзначити, що в цьому випадку коефіцієнт ефективності досягає високих значень і зберігає свою стабільно високу величину навіть при незначних значеннях кроку, що становить близько $0,5^\circ$.

За умови потужності електродвигуна слідкування 50 Вт, перехід від неперервного до крокового режиму слідкування за Сонцем може значно знизити енергетичні втрати. У результаті економія енергії може досягати 50% від загальної споживаної потужності двигуна, що є суттєвим зниженням енергоспоживання. Така оптимізація дозволяє значно покращити ефективність роботи системи, зменшуючи витрати електроенергії.

Релейний електропривод постійного струму, який реалізує покроковий режим автосупроводу Сонця, демонструє вищу енергетичну ефективність порівняно з електроприводом на основі перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією.

На відміну від базового варіанту, при застосуванні релейного електроприводу енергозбереження відбувається як у перетворювачі, так і в якірному ланцюзі двигуна. В той час як у системі з широтно-імпульсною модуляцією економія енергії реалізується лише в самому перетворювачі

Наступним етапом є визначення узагальненої функції ефективності для крокового режиму. Обґрунтування необхідності переходу від неперервного до крокового режиму з урахуванням енергозбереження повинно ґрунтуватися на порівнянні втрат енергії в фотоперетворювачі ΔW_ϕ за весь період слідкування та енергії, збереженої в електроприводі ΔW_{en} завдяки такому переходу. Важливо також правильно сформулювати завдання для визначення оптимального значення кроку θ_{III} , що забезпечить максимальну ефективність системи в умовах енергозбереження

$$f(\theta_{III}) = \Delta W_{оп} - \Delta W_\phi \quad (4.44)$$

Розв'язання цього завдання полягає в пошуку максимального значення функції в межах визначених значень θ_{III} . Мінімальні значення обмежені ризиком значного скорочення ресурсу надійності системи через часті спрацьовування двигуна, в той час як максимальні значення визначаються доцільністю

використання системи наведення в принципі. Важливо зазначити, що для підтвердження доцільності застосування покрокового режиму необхідною умовою є наявність позитивних значень функції в зазначених межах θ_{III} .

Економічну ефективність у порівнянні з традиційним електроприводом за весь період спостереження можна оцінити наступним чином

$$\Delta W_{EP} = \Delta P_{CT} t_c \left(1 - \frac{1}{K_{E\Phi}}\right) \quad (4.45)$$

Коефіцієнт $K_{E\Phi}$ доцільно визначати за виразом (4.42).

Значення $\Delta W_{\Phi} = N \cdot \Delta W_{III}$ обчислюється за допомогою формул (4.42) і (4.35). В результаті, загальна енергія, що втрачається фотоперетворювачем протягом всього сеансу стеження, після переходу від безперервного режиму до покрокового, визначається наступним чином

$$\Delta W_{\Phi} = \Delta P_{CT} t_c \left(1 - \frac{I}{K_{e\Phi}}\right).$$

$$\Delta W_{\Phi} = \frac{P_{III} \cdot \omega_{III} \cdot \theta_3}{(\omega_{III} - \omega_C) \cdot \omega_C \cdot \omega_{III}} (\alpha_1 - \sin \alpha_1 - \alpha_2 + \sin \alpha_2) \quad (4.46)$$

Розглянемо дві функції $f(\theta_{III})$.

Якщо $\alpha_1 = -\alpha_2 = \frac{\theta_{III}}{2}$, то

$$f_1(\theta_{III}) = \Delta P_{CT} t_c \left[1 - \frac{\omega_C}{\omega_{III}} \cdot \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{III}}{\theta_{III}}}{A + D} \right] - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III}^2}{24} \theta_3,$$

або після перетворень

$$f_1(\theta_{III}) = \theta_3 \left[\frac{\Delta P_{CT}}{\omega_C} - \frac{\Delta P_{уст} + B \frac{\omega_{III}}{\theta_{III}}}{\omega_{III}} - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III}^2}{24} \right]. \quad (4.47)$$

Якщо $\alpha_1 = 0$ і $\alpha_2 = -\theta_{III}$

або $\alpha_1 = \theta_{III}$ і $\alpha_2 = 0$, то

$$f_2(\theta_{III}) = \Delta P_{CT} t_C \left[1 - \frac{\omega_C}{\omega_{III}} \cdot \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{III}}{\theta_{III}}}{A + D} \right] - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III}^2}{24} \theta_3,$$

або після перетворень

$$f_2(\theta_{III}) = \theta_3 \left[\frac{\Delta P_{CT}}{\omega_C} - \frac{\Delta P + B \frac{\omega_{III}}{\theta_{III}}}{A + D} - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III}^2}{6} \right]. \quad (4.48)$$

Очевидно, що застосовані наближення встановлюють певні обмеження для значень θ_{III} , розглянутих у рівняннях (4.46) і (4.47). Ці значення можна приблизно оцінити в межах від $0,1^\circ$ знизу до близько 30° зверху. Оскільки використання більш точних формул не є необхідним, зазначені межі цілком відповідають встановленим обмеженням, які вже були враховані в попередньому аналізі.

Визначимо екстремуми функції $f_1(\theta_{III})$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_{III}} = \frac{B \cdot \theta_3}{\theta_{III1}^2} - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III1} \cdot \theta_3}{12}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \theta_{III}} = 0.$$

Звідси випливає

$$\theta_{III1} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot B \cdot \omega_C}{P_{III}}}. \quad (4.49)$$

Визначимо екстремуми функції $f_2(\theta_{III})$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_{III}} = \frac{B \cdot \theta_3}{\theta_{III2}^2} - \frac{P_{III}}{\omega_C} \cdot \frac{\theta_{III2} \cdot \theta_3}{3}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \theta_{III}} = 0.$$

Звідси випливає

$$\theta_{III2} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot B \cdot \omega_C}{P_{III}}}. \quad (4.50)$$

Вирази (4.49) та (4.50) можуть бути проаналізовані з точки зору їх якості за допомогою простого методу.

Оптимальний крок збільшується при підвищенні швидкості руху Сонця та зростанні енергетичних втрат під час перехідних процесів в електроприводі. Водночас, із ростом встановленої потужності фотоприймача оптимальний крок зменшується. Ці залежності є очевидними та легко спостережуваними. Зазначені закономірності можна узагальнити, враховуючи взаємодію між різними параметрами системи, що дозволяє точніше прогнозувати її поведінку в різних умовах експлуатації

$$\theta_{opt} = \sqrt[3]{\frac{K_{III} \cdot B \cdot \omega_c}{P_{III}}}. \quad (4.51)$$

де K_{III} – коефіцієнт приймає значення залежно від співвідношення кутів α_1 і α_2 .

$$K_{III} = \frac{3 \cdot (\alpha_1 / \alpha_2 - 1)^3}{(\alpha_1 / \alpha_2)^3 - 1}$$

або

$$K_{III} = \frac{3 \cdot (1 - \alpha_2 / \alpha_1)^3}{1 - (\alpha_2 / \alpha_1)^3}. \quad (4.52)$$

При використанні реальних значень для виконавчого двигуна постійного струму ME215 у фотоперетворювачі з вихідною потужністю 1000 Вт отримуються наступні результати. Враховуючи параметри та технічні характеристики двигуна, такі значення дають змогу визначити ефективність роботи системи та її здатність до стабільного функціонування в заданих умовах

$$\theta_{III1} = 0,0523 \text{ рад} = 3^0$$

$$\theta_{III2} = 0,012 \text{ рад} = 0,7^0$$

На практиці точність розрахунків, виконаних за допомогою формул (4.36) та (4.37), часто не досягає високого рівня. У зв'язку з цим, важливо розглянути, як зміна величини кроку від оптимального значення впливає на функцію $f(\theta_{III})$. Аналіз показує, що при варіації кроку в межах від $0,7^0$ до 3^0 , зміни значень для обраного варіанту знаходяться в межах 2%. Це свідчить про те, що точність обчислень може бути підвищена шляхом оптимізації параметрів кроку.

У практичному застосуванні доцільно вибрати крок з інтервалу $[0,7^0 - 3^0]$, при цьому рекомендовано орієнтуватися на значення, наближені до 3^0 . З метою

забезпечення належного рівня надійності та економії ресурсів системи, не слід використовувати кроки, які є меншими за оптимальне значення, оскільки це може негативно вплинути на ефективність і довговічність роботи системи.

Для створеного електроприводу було розроблено діаграму узагальненої функції f , яка залежить від величини кроку $\theta_{ш}$ (рис. 4.14). Ця функція наведена у відносних одиницях за формулою: $f^*(\theta^*_{ш}) = f(\theta_{ш})/f(\theta_{опт})$, де $f(\theta_{ш})$ — значення функції при конкретному кроці, а $f(\theta_{опт})$ — оптимальне значення функції для порівняння.

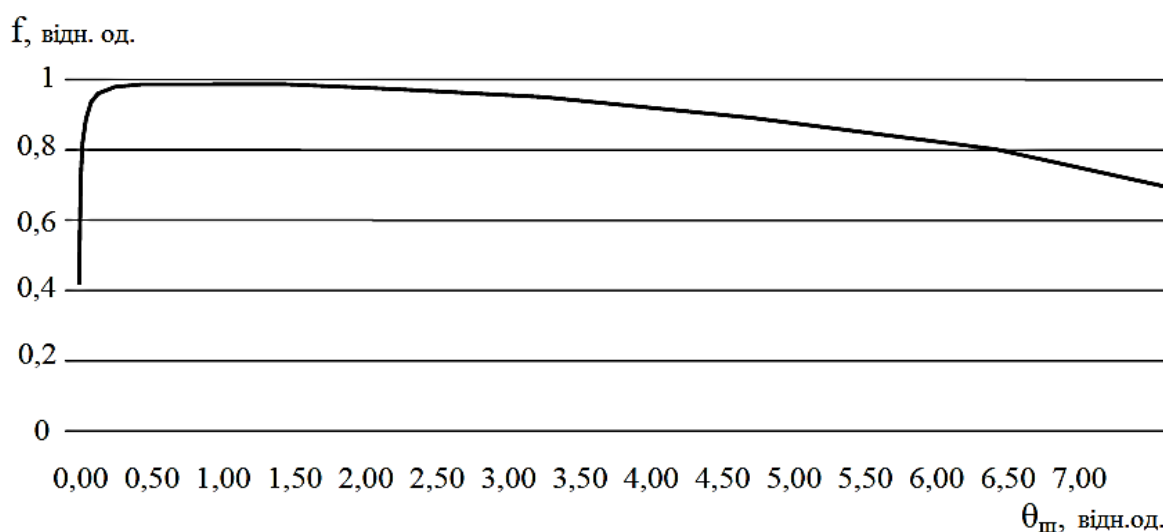


Рисунок 4.14 – Діаграма залежності узагальненої функції ефективності покрокового режиму від величини кроку при виконанні умови мінімуму втрат в фотоприймачі (у відносних одиницях) $\theta^*_{ш} = \theta_{ш}/\theta_{опт}$

Важливо зазначити, що при визначенні оптимального кроку, якщо його значення є надзвичайно малим, доцільно обговорити перехід до безперервного спостереження за Сонцем. У випадку, коли величина оптимального кроку є значною (понад 20°), слід розглянути можливість переходу до фіксованого варіанту роботи геліоустановки. Такий підхід дозволить оптимізувати ефективність роботи системи, враховуючи специфічні умови експлуатації та вимоги до точності орієнтації.

ВИСНОВОК

У рамках цієї кваліфікаційної магістерської роботи було розроблено систему автоматичної орієнтації фотогальванічних перетворювачів, що дозволяє значно оптимізувати їх роботу. Окрім того, було проведено детальний аналіз енергетичної ефективності СЕП для СФЕС. Розроблена методика розрахунку потужності таких систем з урахуванням специфічних умов, яка орієнтована на підвищення енергетичних характеристик, забезпечення надійності роботи, підвищення рівня автоматизації та зниження витрат на реалізацію і обслуговування системи.

Попередній аналіз сонячної радіації вказує на значний потенціал енергетичних ресурсів України, які можуть бути використані для вирішення реальних завдань розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема в галузі геліотехніки.

Огляд наукових публікацій підтверджує важливість розробки та впровадження системи слідкуючого електроприводу для ефективного керування сонячними панелями, що забезпечить оптимальне використання сонячної енергії.

У ході проведених досліджень були визначені оптимальні режими управління приводом, спрямовані на зниження витрат електричної енергії та забезпечення максимальної ефективності роботи системи. В результаті було розроблено та протестовано покроковий режим функціонування системи, яка слідкує за Сонцем.

Також були сформульовані математичні моделі, які дозволяють оцінити енергетичні та потужнісні втрати в фотоприймачі при переході від безперервного до покрокового режиму роботи системи сонячного слідкування. Це дозволяє точно визначити можливі енергетичні втрати та оптимізувати роботу системи в цілому.

У результаті проведених досліджень було обґрунтовано методику визначення оптимального значення кроку на основі критерію максимальної вихідної потужності системи. Крім того, були розроблені математичні моделі для

одноконтурної та двоконтурної СЕП СФЕС, що дозволяють точніше прогнозувати їхню ефективність та функціональні характеристики.

У даній роботі представлено розробку СЗС СЕП, яка сприяє покращенню якості та чутливості системи керування до змін її параметрів.

Запропонована система забезпечує високу ефективність роботи, дозволяючи швидко досягати заданого кута повороту електропривода.

Система з адаптивною структурою слідкуючого електроприводу забезпечує скорочення часу перехідних процесів, зменшення амплітуди перерегулювання та кількості коливань. Це дозволяє значно знизити енергетичні витрати, необхідні для компенсації збурюючих впливів, що, в свою чергу, робить роботу електроприводу більш енергоефективною та економічною. Така система оптимізує енергоспоживання, покращуючи загальну ефективність і знижуючи експлуатаційні витрати.

Результати виконаної роботи:

- Запропоновано інноваційний слідкуючий електропривод, оснащений датчиком для відстеження та системою спостереження за рухом Сонця.
- Розроблено та проаналізовано систему управління електроприводом постійного струму, що забезпечує високий рівень ефективності.
- За підсумками досліджень, завдяки застосуванню вибраного методу керування двигуном, коефіцієнт корисної дії системи слідкування був підвищений на 30,4%.

Результати, отримані в ході кваліфікаційної роботи, можуть бути ефективно застосовані на практиці при розробці СФЕС різної потужності. Крім того, ці напрацювання можуть бути використані для забезпечення енергопостачання віддалених базових станцій та репітерів GSM, що не підключені до центральних електричних мереж.

У розділі, присвяченому охороні праці, було проведено розрахунок блискавковідводу для системи автоматичної орієнтації фотоелектричних перетворювачів.

Список літератури

Додаток А. Охорона праці