

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра ЕІС та РК

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри ЕІС та РК

к.т.н., доцент  Д.В. Костенко

“ 12 ” 06 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти **«бакалавр»**
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка та дослідження системи керування сонячного джерела
електроенергії

Виконав: студент IV курсу, групи 4367ст3
спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Луговський Є. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. НУК, Бабкін Г. В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Клюков О. П.

(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв – 2026 рік

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

Кафедра ЕІС та РК

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

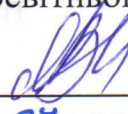
(шифр і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор  Я.Б. Волянська

“22” 07 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти

«бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Луговський Єгор Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи керування сонячного джерела електроенергії
2. Керівник роботи Бабкін Георгій Володимирович, к.т.н., доцент НУК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “22” 04 2026 року № 286-уч

3. Термін подання студентом роботи _____
4. Вихідні дані по роботі Система орієнтації сонячних батарей. Яка позиціонує поверхню панелі відносно сонця. На систему впливає вітрове навантаження. Режим роботи може бути, як безперервний, і періодичний (кроковий). Роботи системи орієнтація спрямовано збільшення вироблення електроенергії. Повинна відповідати вимогам електробезпеки.
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Сучасні сонячні електростанції. 2 Розрахунок двигуна слідкуючого електроприводу сонячної електростанції. 3 Система керування електроприводу. 4 Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням назв)

1.

6. Консультанти розділів роботи

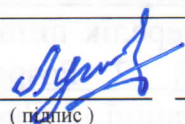
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	к.т.н., доцент кафедри ЕІС та РК Бабкін Г.В.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення та область застосування		
2	Технічні характеристики		
3	Опис та обґрунтування прийнятих технічних рішень		
4	Розрахунки, що підтверджують працездатність		
5	Охорона праці		

Студент

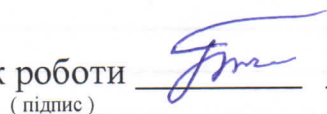


(підпис)

Луговський Є. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Бабкін Г.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є система орієнтації сонячної батареї. У роботі розглядаються різні режими роботи систем стеження за сонцем, проводиться моделювання.

Метою даної є моделювання та аналіз впливу на похибку роботи динамічних характеристик системи орієнтації сонячної електростанції, що здійснює стеження за переміщенням руху сонця по еліптичній орбіті на основі його координат.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- виконати аналітичний вибір експлуатації систем орієнтації сонячних батарей;
- виконати огляд робіт різних типів систем орієнтації;
- розрахувати основні параметри та провести моделювання слідкуючого електроприводу;
- провести дослідження роботи двоосьової системи орієнтації;
- обробити отримані модельні дані;
- описати рекомендації щодо експлуатації двоосьової системи орієнтації сонячних батарей.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЇ, ПОЗИЦІОНУВАННЯ, СЛІД ЕЛЕКТРОПРИВОД, ВІДНОВЛЮВАЛЬНА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН.

ABSTRACT

The object of the study is the solar battery orientation system. The work considers various operating modes of solar tracking systems, and modeling is performed.

The purpose of this work is to simulate and analyze the influence of the dynamic characteristics of the solar power plant orientation system on the operating error, which tracks the movement of the sun along an elliptical orbit based on its coordinates.

Qualification work tasks:

- perform an analytical selection of the operation of solar battery orientation systems;
- perform a review of the operation of various types of orientation systems;
- calculate the main parameters and conduct modeling of the tracking electric drive;
- conduct research into the operation of a two-axis orientation system;
- process the obtained model data;
- describe recommendations for the operation of a two-axis solar battery orientation system.

Keywords: SOLAR POWER PLANT, SOLAR BATTERY, ORIENTATION SYSTEM, POSITIONING, FOLLOW-UP ELECTRIC DRIVE, RENEWABLE ELECTRIC POWER, VALVE MOTOR.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	8
Вступ	9
1 Сучасні сонячні електростанції	11
1.1 Постановка проблеми	11
1.2 Система орієнтації	11
1.3 Аналіз ринку	13
1.4 Основні режими роботи сонячних електростанцій	14
1.5 Схема слідкуючого електроприводу сонячних електростанцій	15
1.6 Особливості режимів роботи сонячних електростанцій та вимоги до їх електроприводів	18
1.7 Обґрунтування вибору основної структури електроприводу сонячних електростанцій, що стежить	20
1.8 Висновки до розділу 1	25
2 Розрахунок двигуна слідкуючого електроприводу сонячної електростанції	26
2.1 Визначення головних розмірів та вибір електромагнітних навантажень	26
2.2 Визначення кількості пазів та їх розмірів	35
2.3 Розрахунок проти-ЕРС	48
2.4 Активні та індуктивні опори	55
2.5 Втрати сталі, механічні та додаткові втрати	58
2.6 Висновки до розділу 2	62
3 Система керування електроприводу	63
3.1 Опис системи стеження	63
3.2 Моделювання системи стеження	65
3.3 Результати моделювання системи стеження	68
3.4 Висновок до розділу 3	71
4 Охорона праці	73

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів, характерних при роботі електричного двигуна	74
4.2 Розрахунки захисного заземлення для проведення експериментів в лабораторії.....	76
4.3 Розробка заходів щодо забезпечення електробезпеки під час проведення експериментів з електричним двигуном в лабораторії	78
Перелік джерел посилання.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БП – блок живлення

БУ – блок керування

ВД – вентильний двигун

ДАП – датчик абсолютного становища

ЕРС – електрорушійна сила

МЕА – міжнародної енергетичної асоціації

ММ – мехатронний модуль

ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПЛК – програмований логічний контролер

СЕ – слідкує електропривод

СЕС – сонячна електростанція

PV – photovoltaic

SPS – solar power station

ВСТУП

Вироблення достатніх запасів чистої енергії для майбутнього – одна із найскладніших проблем суспільства. Альтернативні джерела відновлюваної енергії, такі як сонячна, можуть задовольнити потреби людини в електроенергії. Покривши 0,16% поверхні землі сонячними панелями з 10% ефективністю забезпечило б 20 ТВт потужності, що майже вдвічі перевищує світовий рівень споживання викопної енергії. Пряме перетворення сонячного світла на електрику здійснюється через сонячні елементи.

Добовий та сезонний рух землі впливає на інтенсивність випромінювання сонячних систем. Системи позиціонування переміщують сонячні батареї, щоб компенсувати ці рухи, зберігаючи найкращу орієнтацію щодо сонця. Хоча використання систем орієнтації не є обов'язковим, його наявність може збільшити зібрану енергію з 10 до 80% у різні періоди часу та географічні умови. Однак не рекомендується використовувати систему стеження для невеликих сонячних панелей через високі втрати енергії в приводних системах. Виявлено, що споживання енергії пристроєм відстеження становить 2–3% збільшеної енергії.

Багато систем орієнтації працюють у режимі автосупроводу чи покрокового стеження, безперервно і може розташовуватися у місцях, віддалених від населених пунктів. Подібні системи забезпечуються спеціальними електроприводами, що стежать, які відрізняються такими особливостями:

- низьким енергоспоживанням;
- можливістю автономної роботи протягом тривалого терміну експлуатації;
- безперервністю високоточного відстеження небесного об'єкта за умов його оптичної ненаблюдаемости .

У літературі зустрічається безліч робіт, що описують цю тематику [1–7].

Завдання високоточного стеження положення сонця з використанням його координат нашої планети на ряд труднощів, пов'язані з узгодженістю кутової швидкості повороту рами сонячної батареї зі швидкістю проходження небесного об'єкта. Через непостійну орбітальну швидкість руху сонця по еліптичній орбіті та обурювальних впливів на панель виникають відхилення швидкості повороту сонячної батареї від необхідної. Через неточності кінематики та моменти обурення електроприводу СЕС, що стежить, точної узгодженості досягти неможливо. Тому при виборі елементів системи стеження для забезпечення необхідної точності орієнтації сонячної батареї протягом дня необхідно виконувати облік найбільш істотних факторів, що впливають на точність стеження.

1 СУЧАСНІ СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

1.1 Постановка проблеми

Енергія є одним із наріжних каменів нашого сучасного суспільства. Те, що ми можемо надати суспільству стільки енергії, скільки потрібно в нашому повсякденному житті, і зробити так, щоб ця енергія була вироблена без шкоди, нашій планеті є однією з найгарячіших політичних тем і завдань нашого часу. Сонячна енергія є одним із рішень проблеми. Попит на ефективні відновлювані джерела енергії зростає дуже швидкими темпами, зокрема, ринок сонячних трекерів зростає на 40% на рік.

Існує багато різних способів одержання електрики від сонячної енергії. Найбільш популярними є фотоелектричні (PV) панелі, де кремнієві сонячні елементи перетворюють сонячну радіацію на електрику. Підтримка PV-панелей перпендикулярна до сонячного випромінювання, максимізує коефіцієнт корисної дії.

1.2 Система орієнтації

Основна функція всіх систем стеження полягає у забезпеченні одного або двох ступенів свободи у русі. Цей рух використовується для підтримки системи, спрямованої на випромінювання, необхідним чином. Існує безліч рішень для виконання функціональних вимог. Різні технології сонячної енергії вимагають різних рішень з різною точністю та загальною рисою в тому, що визначити які системи стеження найкраще дуже складно.

Кут місця визначає висоту, де сонце може бути точно на небі. Еталонна площа, використовувана визначення кута, часто є фактичною площиною, де стоїть спостерігач. Азімутальний кут розглядає рух сонця небом, зі сходу на захід.

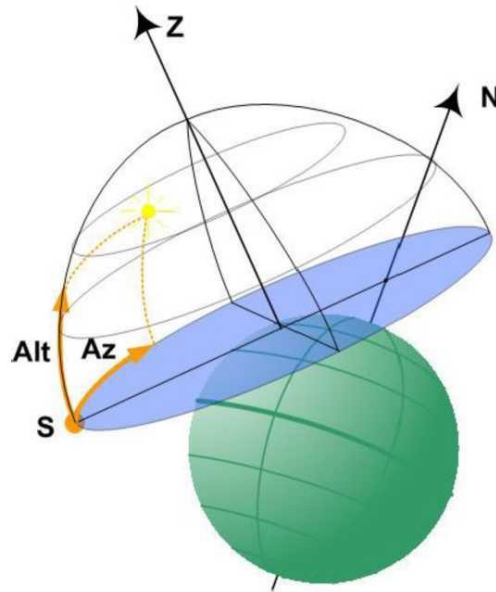


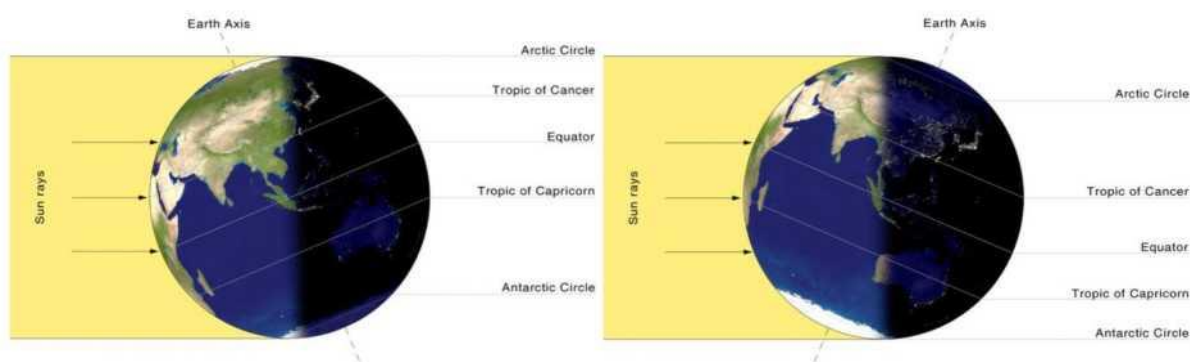
Рисунок 1.1 – Показує азимут та кут місця

Системи одноосового стеження визначають рух або висоти, або азимуту для СЕС. Який із цих рухів бажано, залежить від технології, що використовується на трекері, а також від місця, на якому вона встановлена. Наприклад, параболічні наскрізні системи використовують азимутальне відстеження, тоді як багато інших PV-систем використовують відстеження висоти через брак місця.

Системи з подвійною віссю відстежують рух як у висоті, і по азимутальним осям. Ці системи стеження, звісно, забезпечують найкращу продуктивність, за умови, що це компоненти також мають досить високу точність.

Зв'язок між енергією сонця та землею досить складний. Шлях Землі навколо Сонця досить точно визначений і є безліч описів його руху. Деякі є не точними наближеннями, тоді як деякі з них дуже точні, і рівняння покладаються на збір останніх вимірюваних констант.

Очевидне становище сонця залежить від того, як земля обертається навколо Сонця і як вона обертається навколо осі. Шлях навколо сонця не круговий, а трохи еліптичний, цей факт впливає на відстань до сонця. Також вісь, навколо якої обертається земля, трохи нахилена, 23,4 градуса. Нахил називається нахилом екліптики.



Ліворуч – літній сезон, наприклад, Європа. Праворуч – літній сезон для Австралії

Рисунок 1.2 – Вплив схильності екліптики

У статті [8] проведені дослідження, в яких говориться, що системи орієнтації не обов'язково повинні позиціонувати площину панелі абсолютно перпендикулярно до сонця, щоб бути більш ефективними. Якщо є відхилення на 10° , вихід електроенергії, як і раніше, становить 98,5% від максимального значення повного відстеження. За найнесприятливіших умов вихід енергії у річному обсязі від систем орієнтації може досягати 20%. За кращих умов, річний приріст може становити від 30 до 40%. Ефективність роботи в будь-який день може змінюватись від майже нуля до майже 100%.

1.3 Аналіз ринку

Аналіз ринку проводився шляхом збирання ринкових даних від журналів, галузевих експертів, інтернет-баз даних, дослідницьких інститутів ринку та енергетичних агентств. Аналіз ринку було зроблено, щоб переконатися, що дослідження зберігає тісний зв'язок з розвитком ринку і не упустив будь-яких критичних вимог ринку.

Глобальна сумарна встановлена потужність сьогодні становить приблизно 15 ГВт. Переважна більшість установок складаються з PV-модулів. Ринок сонячної енергії спостерігав величезне зростання останні

п'ять років. Ринок виріс із кількох 100 МВт на початку 2000 року до сьогоднішніх приголомшливих 15 ГВт встановленої потужності. Найбільш вражаючим вкладом займається Німеччина, яка у 2000 році мала невеликий щорічний приріст у розмірі 70 МВт, який у 2009 році зріс до 4 ГВт.

У табл. 1.1 та на рис. 1.1 представлені прогнози розвитку сценаріїв ринку сонячної енергії від Міжнародної енергетичної асоціації, Грінпіс та Європейської комісії.

Таблиця 1.1 – Сценарії майбутньої потенційної потужності МЕА, ЄС та Грінпіс

Рік та потужність	2000 [ГВт]	2010 [ГВт]	2020 [ГВт]	2030 [ГВт]	2050 [ГВт]
Geeenpeace (reference scenario)	1	10	50	86	153
Geeenpeace ([Revolution scenario)	1	21	270	920	2900
Geeenpeace (advanced scenario)	1	21	290	1500	3800
IEA Reference Scenario	1	10	30	60	-
IEA ACT Map	1	22	80	130	600
IEA BlueMap	1	27	130	230	1150
European Commision (Current)	1	8	125	920	-
European Commision (Advanced)	1	21	211	912	-
European Commision (Moderate)	1	25	278	1864	-

Як видно із прогнозів, усі сценарії показують тривале зростання ринку сонячної енергії. На розвиток енергетичного ринку значною мірою впливають політичні, технічні та інші.

1.4 Основні режими роботи сонячних електростанцій

Основне навантаження на електропривод СЕС складають вітрове навантаження та сили тертя у кінематичному ланцюзі. Потужність, яка поглинається силами тертя, може набагато перевищувати потужність на виході кінематичного ланцюга. Вітрове навантаження має непостійний і непрогнозований характер.

Прогноз обсягу сонячної енергії

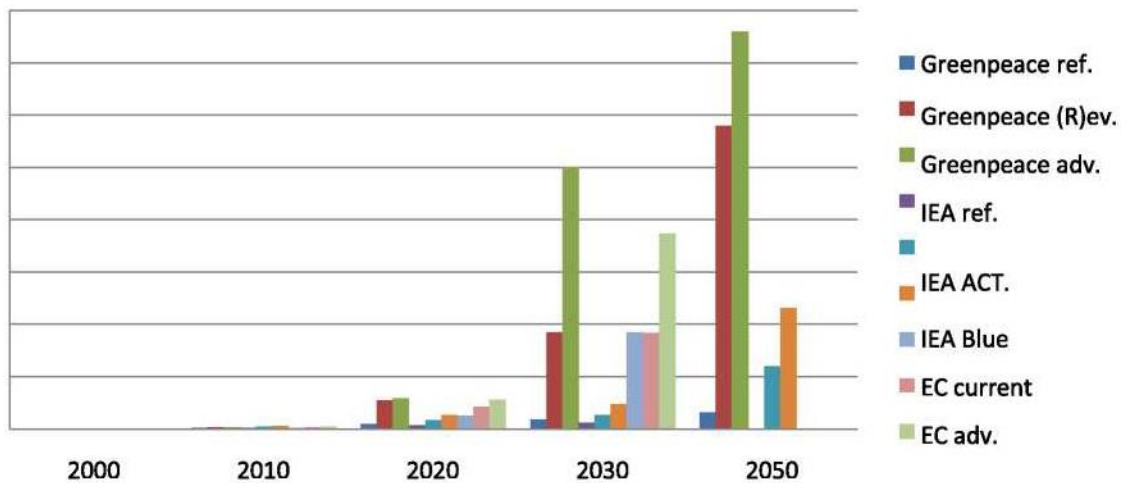


Рисунок 1.3 – Прогнозована потужність сонячної енергії

Основні режими електроприводу СЕС можна розділити на дві категорії: допоміжні та робочі. Робочі режими можуть здійснюватись автосупроводом або стеженням, що реалізується за допомогою програмного управління. У цьому програмному управлінні відомий закон руху за об'єктом, що спостерігається, і розрахунок ведеться заздалегідь. У режимі стеження за сонцем, отриманий сигнал управління пов'язаний безпосередньо з об'єктом, що спостерігається. До допоміжних режимів відносять: «перекидання» виконавчого валу, «захоплення» та «пошук» об'єкта стеження. Даний режим використовується при розвороті СЕС із заходу на схід, на вихідне положення після заходу Сонця або під час робіт при проведенні профілактичного обслуговування, для визначення Сонця після виходу через обрій при використанні режиму автосупроводу.

Усі елементи електроприводу СЕС повинні мати захист від різних атмосферних опадів, потрапляння вологи, а також повинні мати можливість експлуатації у всіх температурних режимах цього району.

1.5 Схема слідкуючого електроприводу сонячних електростанцій

Слідчим називається електропривод, який здійснює з певним ступенем

точності механічні переміщення, що задаються малопотужним вимірювальним органом, який самостійно виконати функції приводу не може. Слідкуючий електропривод є програмованим регулятором, який відпрацьовує механічні переміщення. Але використовувана програма зазвичай не є заздалегідь відомою. На відміну від використання регуляторів, для електроприводу, що стежить, характерно не повністю вільний рух, визначений тільки її параметрами, а вимушений рух.

При вирішенні питань про структуру слідкуючого електроприводу СЕС необхідно враховувати такі вимоги: простота обслуговування всієї системи, мінімальні капітальні вкладення, надійність, високий ступінь автоматизації, забезпечення допустимих точнісних показників, що передбачає тривалий час (місяці) експлуатацію СЕС без втручання людини, обмеження ударних навантажень у силовій частині приводу, енерго.

Основною особливістю електроприводу СЕС, що стежить, є мала швидкість переміщення всіх робочих органів. Найбільша можлива швидкість стеження рухом Сонця становить $40^\circ/\text{час}$, на широті 56° . Щоб оцінити потужність виконавчого електродвигуна, можна скористатися наступною залежністю. Близько 10 Вт потужності двигуна споживаються на 1000 Вт виробленої електроенергії СЕС як постійного стеження за Сонцем. Для досить великих СЕС використовуються електродвигуни малої потужності, у яких електромагнітна постійна часу у багато разів менша від електромеханічної постійної часу. Таким чином, електродвигун має запас по динамічній стійкості і є аперіодичним ланкою другого порядку.

Переміщення сонячної панелі відповідно до повороту осі, що задає, здійснюється безпосередньо виконавчими двигунами. Наявність ізоляційного проміжку в електроприводі, що стежить, обумовлює невелику зону нечутливості. Тому динний проміжок необхідно зменшити для збільшення точності відпрацювання заданого кута. При деякому запасі кінетичної енергії можливі різні коливання електроприводу біля положення рівноваги. Тому після відключення система не може миттєво зупинитися і продовжує

рухатися в тому ж напрямі. Лише після низки коливань система може перейти у стан рівноваги.

Розмір моменту електродвигуна залежить від кута неузгодженості. Якір електродвигуна відразу ж перемикається на повну напругу при замиканні щіток з півкільцем при цьому момент електродвигуна зростає, і система починає набувати значного прискорення.

Механічну частину СЕС є двомасовою системою. Частота вільних коливань невисока і становить лише 1–2 Гц. Резонансні частоти, що виникають в механічній частині, амплітуди коливань фази, практично не залежать від параметрів двигуна. В енергетичних установках відсутня необхідність у зниженні або корекції коливання. За результатами розрахунків впливів, що обурюють, вирішується питання про необхідність застосування люфто -компенсуючих пристроїв в механічній частині системи. Недоцільно регулювати швидкість зменшення магнітного потоку, оскільки всі режими роботи СЕС вимагають однаковий крутний момент на вихідному валу.

Автори цієї статті [10] побудували двоосьову систему з відкритим контуром, що контролюється за допомогою ПЛК. Їх принцип роботи заснований на математичному визначенні положення поверхні, що визначається двома кутами: нахилом поверхні та азимутальним кутом. Нахил вважався рівним зенітному куту Сонця. Використовувалися два стежачі двигуна, один для з'єднання, що обертається навколо горизонтальної осі Північ-Південь, а інший для з'єднання, що обертається навколо вертикальної осі. Світловий день ділився на чотири інтервали, і під час кожного з них було визначено та запрограмовано швидкість обертання рухової системи в ПЛК. За результатом споживана потужність для двигунів і систем керування ледве перевищує 3% енергії, заощадженої системою стеження. На рис. 1.4 показує порівняння енергії між орієнтованою системою та фіксованою, нахиленою під кутом 32° . Вони дійшли висновку, що використання двоосьової системи стеження призводить до збільшення сумарної добової колекції близько

35,34% порівняно з фіксованою.

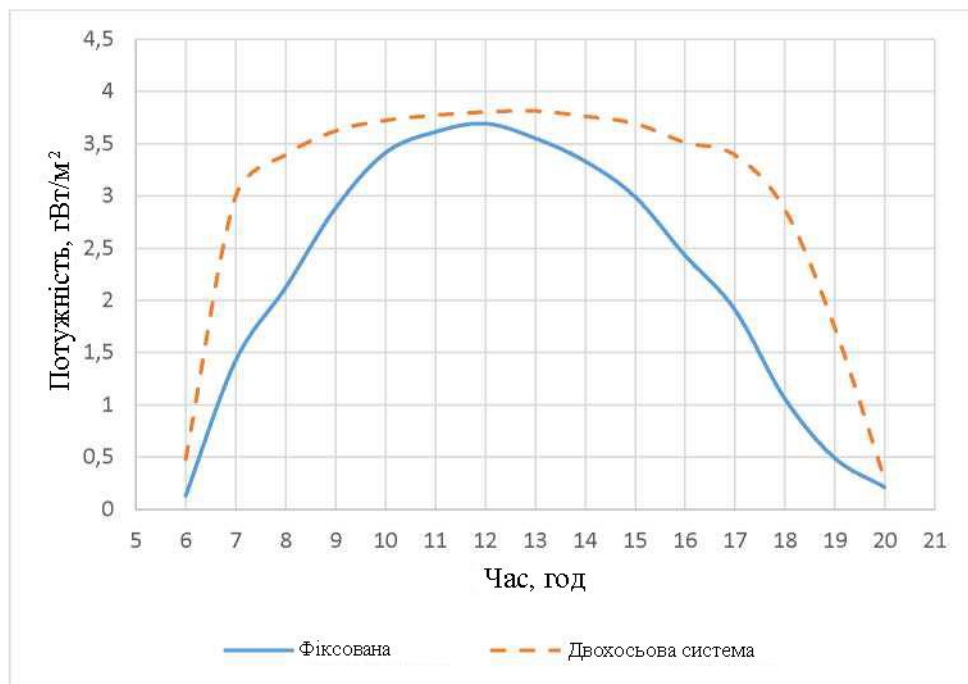


Рисунок 1.4 – Експериментальні результати дослідження

По результат виникає необхідність проектувати електропривід, що стежить, порівнюючи номінальну швидкість двигуна зі швидкістю переміщення установки в допоміжних режимах, при цьому передбачається, що робочий режим безперервного стеження буде здійснюватися при швидкості меншої номінальної. У зв'язку з цим представляється раціональнішим застосування вентильного двигуна в покроковому режимі стеження в системах релейного електроприводу.

1.6 Особливості режимів роботи сонячних електростанцій та вимоги до їх електроприводів

Щоб визначити більш достовірні та повні результати проведених досліджень необхідно обґрунтувати і вибрати розрахунковий режим роботи електроприводу СЕС, що стежить, а також характер обурювального впливу.

Дослідження електроприводу СЕС, що стежить, проводилися на основі

методу комплексного планомірного експерименту. Як об'єкт використовувалася розрахункова модель узагальненого електроприводу СЕС. В результаті узагальнення всіх прийнятних для СЕС структур стежить електроприводу та аналізу, отримано структуру розрахункової моделі.

У цій роботі було обрано робочий режим автосупроводу Сонця, точністю якого визначається якість головного технічного режиму СЕС. Порівняно з теорією автоматичного регулювання нелінійність або лінійність електроприводу, що стежить, оцінюється, з позицій робочого режиму. Теоретично автоматичного управління, нелінійність чи лінійність системи визначається залежністю присутності чи відсутності нелінійного елемента у її складі. Однак у технологічному режимі факт присутності нелінійного елемента в системі не визначає властивості системи. Залежно від різних умов і типів елемента, нелінійність об'єкта може і не позначитися на самій системі та її робочому режимі, яка при цьому не буде схожа на лінійні системи.

Кінематичний люфт є основною нелінійністю в електроприводі СЕС. Якщо знехтувати іншими нелінійностями, то під лінійним мається на увазі режим електроприводу, що стежить, коли по кінематичному ланцюгу безперервно передається крутний момент від виконавчого валу до двигуна або в зворотному напрямку, тоді тут є постійна діюча механічна напруга в кінематичному ланцюгу. При цьому величина моменту, що передається через кінематичний ланцюг, повинна бути такою, щоб не виникали автоколивання. У загальному вигляді умови лінійності електроприводу СЕС, що стежить, можна записати в наступному вигляді:

$$|M_{КЦ}| = \left| M_{ТР} \pm M_{ВІТР} \pm J_{I.B.} \frac{d\omega_{I.B.}}{dt} \right| \geq M_{\min}, \quad (1.1)$$

де $M_{КЦ}$ – крутний момент, що передається по кінематичному ланцюгу, Нм ;

$M_{ТР}$ – сумарний момент сухого та в'язкого тертя на виконавчому валу, Нм ;

$M_{ВГР}$ – момент вітрового навантаження на виконавчому валу, Нм ;

$J_{I.B.}$ – момент інерції виконавчого механізму, кг м^2 ;

$\omega_{I.B.}$ – кутова швидкість виконавчого валу, рад/с.

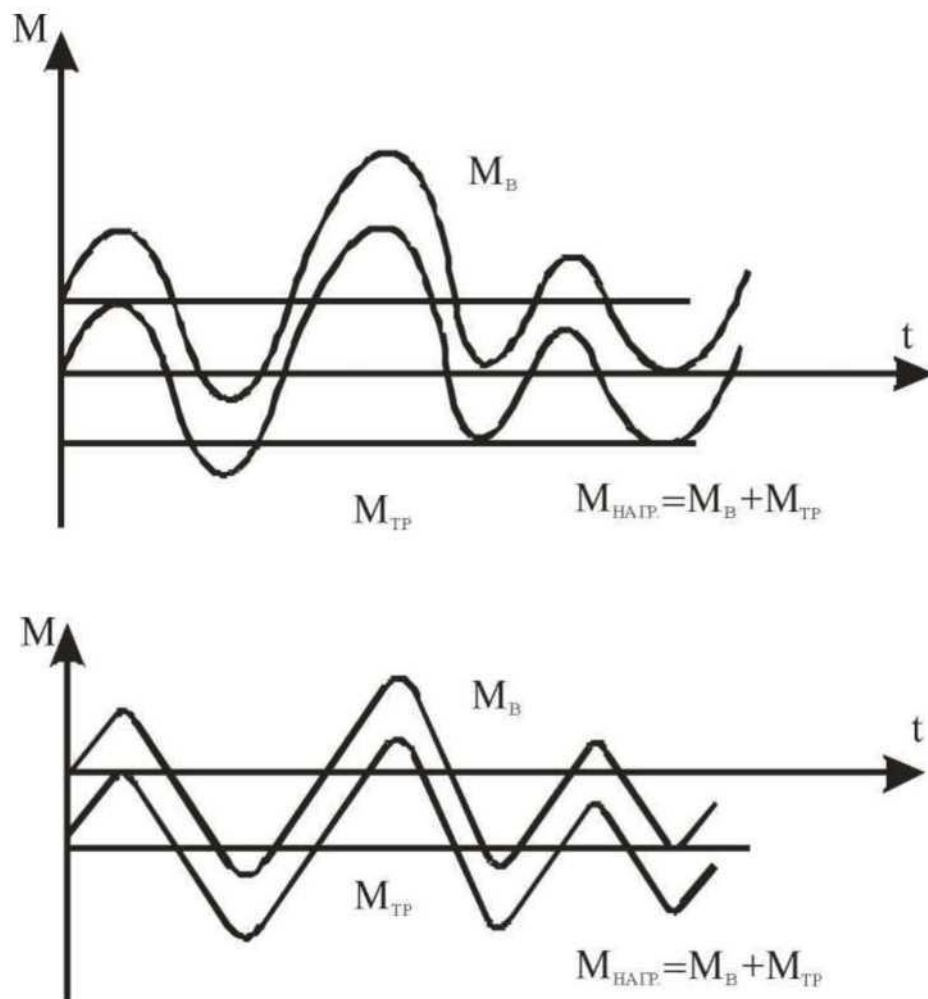
У кінематичному ланцюгу СЕС сумарний момент тертя виконавчого валу є основним джерелом механічного. Складова постійного моменту вітрового навантаження може повністю або частково компенсувати цю напругу. У цьому випадку (1.1) не виконуватиметься. При цьому система електроприводу працює у нелінійному режимі.

У моменти несприятливих випадків, коли з допомогою постійної складової вітрового моменту повністю компенсується момент тертя, помилки зростатимуть із частотою вітрових навантажень. Значення середньоквадратичної помилки в порівнянні з тією ж лінійною системою зростатиме в кілька разів. Частота появи помилок може бути велика навіть якщо не повністю компенсований момент тертя.

На рис. 1.5 показаний випадок, коли на виконавчому валу повністю компенсовано момент тертя. При частковій компенсації моменту, за період спостереження змінюється щонайменше число коливань. Для роботи електроприводу, що стежить, з кінематичним люфтом більш несприятливі умови на виконавчому валу створюються при скомпенсованому моменті тертя.

1.7 Обґрунтування вибору основної структури електроприводу сонячних електростанцій, що стежить

Структура слідкуючого електроприводу багатоконтурна. Контур – сукупність кількох ланок мають зворотний зв'язок. Отримавши широке застосування систем електроприводу з оптимізованими за методом підлеглого регулювання контурами швидкості та струму, широко застосовують у електроприводах, що слідкують, структури яких оснащені контуром кута [11].



При повній компенсації (а) та неповній компенсації (б) моменту тертя
 Рисунок 1.5 – Показано процеси зміни знака всього сумарного моменту
 навантаження, які впливають на виконавчий вал

Клас електроприводів, що розглядаються в даній роботі, характеризується порівняно малими потужностями – до 1 кВт. Такі електроприводи за рахунок підвищеної перевантажувальної здатності елементів, які застосовуються у спеціальних двигунах малої потужності не потребують струмообмеження. Маломощні електроприводи можуть бути оснащені природним струмообмеженням, досягається це за рахунок досить великого опору якорного ланцюга. Крім того, підвищення струму в якорному ланцюзі електроприводах, що слідкують, можна обмежити за допомогою регулятора положення в контурі кута. Тому в структурі електроприводу СЕС,

що стежить, немає необхідності передбачати контур струму. Достатньо лише обмежувати лише контур швидкості та кута.

Контуром швидкості забезпечується підвищена стабільність руху всієї установки в режимі низьких швидкостей, також це дозволяє збільшити смугу пропускання електроприводу, що допомагає збільшити точність електроприводу, що стежить. Необхідні динамічні властивості і необхідну точність електроприводу, що стежить, надає датчик абсолютного положення кута.

Залежно від установки потужності електроприводу, що стежить, змінюється тип керованого перетворювача напруги. Часто доцільно застосовувати для слідкуючого електроприводу СЕС щодо простоти технічної реалізації, точності та експлуатації тиристорні та транзисторні перетворювачі. З огляду на значну жорсткість всієї конструкції виконавчого механізму СЕС, можна зробити припущення, що абсолютно вся пружна податливість системи обумовлена кінематичним ланцюгом, що складається з вихідної передачі і редуктора, при цьому редуктор з'єднаний з корінним. Зважаючи на несумірність з наведеними моментами інерції виконавчого механізму і двигуна, моменти інерції елементів кінематичного ланцюга взяті рівними нулю. Це дозволило у розрахунках прийняти двомасову пружну систему механічної частини електроприводу, що відображено у структурній схемі рис. 1.6.

До складу електромеханічної схеми електроприводу, що стежить, входять: регулятор положення, вимірювальний пристрій, керований перетворювач напруги, сам електродвигун і виконавчий механізм.

При побудові структурної схеми механічної частини електроприводу враховується його еластичність і в'язке тертя на виконавчому валу, кінематичний люфт.

Що б знизити вимоги, що пред'являються до смуги пропускання електроприводу, що стежить, і виключити статистичну і швидкісну помилки в структурній схемі стежить електроприводу закладений астатизм другого

порядку. Насправді також існують системи слідкуючого електроприводу астатизму першого і другого порядків. До недоліків першої категорії слідкуючого електроприводу відносять наявність швидкісної та статистичної системи орієнтації. Слідкуючі системи, які мають астатизм третього порядку, додатково знижують вимоги, що пред'являються до смуги пропускання електроприводу, що стежить, і виключають помилку від прискорення. Проте такі системи відносять до категорії умовно стійких до нелінійності. Реальні стежать електроприводи СЕС мають низку нелінійностей. Наприклад: кінематичні люфти, зона насичення та чутливості у вихідній характеристиці керованого перетворювача напруги, нелінійність залежності різниці кутів виконавчого валу та повороту валу двигуна від пружного моменту, насичення характеристики датчика неузгодженості, дрейф нуля підсилювача постійного струму і т.д. Наявність перерахованих нелінійностей в електроприводі, що стежить, з астатизмом третього порядку зробить систему нестійкою, отже, непрацездатною.

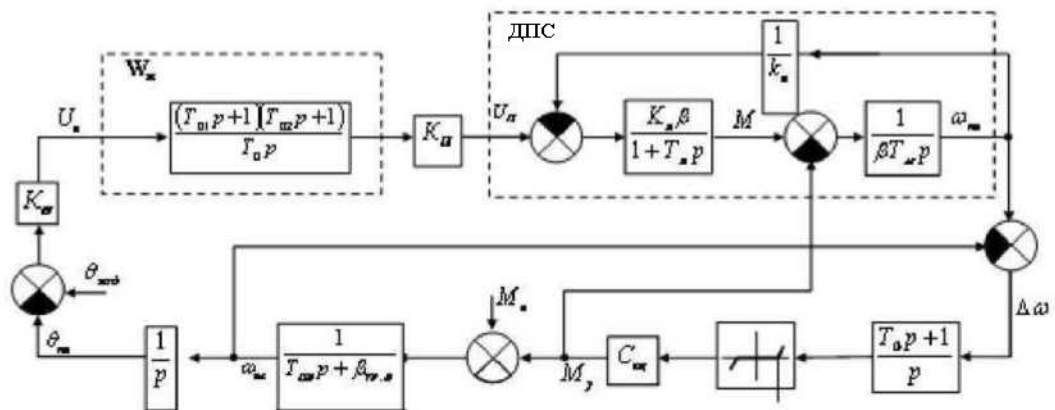


Рисунок 1.6 – Структурна схема одноконтурного електроприводу, що стежить СЕС

Слідкуюча система має астатизм другого порядку практично нечутлива до нелінійностей, ніж та ж система з астатизмом третього порядку, при цьому володіючи більшими точнісними можливостями, ніж електропривод, що стежить, з астатизмом першого порядку. У зв'язку з цим за основу прийнято структуру електроприводу, що стежить, з астатизмом другого порядку [12].

У схемі електроприводу, що стежить, зображеного на рис 1.6, астатизм другого порядку реалізується за допомогою ПД регулятора кута, передатна функція якого представлена в наступному вигляді:

$$W_{pn}(P) = \frac{U_{pn}(P)}{U_{\delta}(P)} = \frac{(T_{K1}P + 1)(T_{K2}P + 1)}{T_0P}, \quad (1.2)$$

де $W_{pn}(P)$ – зображення Лапласа вихідної напруги регулятора положення;

$U_{\delta}(P)$ – те ж вихідної напруги вимірювального пристрою;

T_0, T_{K1}, T_{K2} – постійні часу регулятора положення.

Інтегральна складова (1.2) підвищує астатизм слідкуючого електроприводу до другого порядку забезпечуючи тим самим стійкість у системі. При цьому основна складова, що диференціює, компенсує погіршення фази від інтегрування. ПД-регулятор додатково збільшує стійкість електроприводу, що стежить, і розширює смугу пропускання [13, 14].

ПД регулятор положення може бути рекомендований всім СЕС, там, де є необхідність підвищення точності стеження. Для узагальнення можливих структур електроприводу СЕС, що стежить, частина схеми, а саме передавальна функція системи перетворювач-двигун, надалі буде змінюватися. При допущенні, що постійна часу перетворювача має малу величину, передатна функція системи, описується наступною функцією:

$$W_{no}(P) = \frac{\omega_{ob}(P)}{U_{pn}(P)} = \frac{K_c}{T_{M1}P(T_{\gamma}P + 1) + 1}, \quad (1.3)$$

де $K_c = K_n K_{\delta}$ – коефіцієнт передачі контуру швидкості, 1/ВС;

K_n – коефіцієнт передачі керованого перетворювача напруги;

K_{δ} – коефіцієнт передачі двигуна 1/ВС;

T_J – електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна;

T_{M1} – електромеханічна постійна часу двигуна, с.

У подібній найпростішій схемі без додаткових регулюючих ланок і зворотних зв'язків практично неможливо змінювати потрібним чином співвідношення між даними постійними, особливо якщо це пов'язано з їх зменшенням, тому в знаменнику виразу 1.3 відсутні коефіцієнти перед постійними T_J і T_{M1} .

Область застосування одноконтурних структур у електроприводі СЕС, що стежить, широка. У такій структурі технічно досить просто реалізувати точність стеження, достатньої для більшості технологічних процесів, зокрема здійснюваних за допомогою СЕС.

1.8 Висновки до розділу 1

У цьому розділі вивчені особливості та вивчені вимоги до режимів роботи електроприводів СЕС. Основними режимами електроприводу СЕС, що стежить, є робочі та допоміжні. До робітників належать такий режим як стеження, до допоміжних режимів відносять «перекидання» виконавчого валу, «захоплення» та «пошук» об'єкта стеження. Система СЕС та її елементи повинні бути захищені від попадання вологи та атмосферних опадів, а також допускати експлуатацію у всьому діапазоні температур.

Досліджено основні режими роботи сонячних електростанцій. У тому випадку, якщо вітрове навантаження відсутні і сумарний момент на виконавчому валу дорівнює нулю, то основною негативною проблемою електроприводу, що стежить, є автоколивання.

Досліджено оцінку економії енергії в електроприводі сонячної електростанції. Найкращим та оптимальним є покроковий режим стеження за Сонцем. Також електропривод досить розробити одноконтурним з негативним зворотним зв'язком по положенню.

2 РОЗРАХУНОК ДВИГУНА СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Визначення головних розмірів та вибір електромагнітних навантажень

Вентильні двигуни також відомі як електронно-комутовані двигуни, є синхронними двигунами, що живляться від постійного струму через інвертор або імпульсне джерело живлення, який виробляє електричний струм змінного струму, керуючи кожною фазою двигуна через контролер замкнутого контуру. Контролер забезпечує імпульси струму до обмоток двигуна, які керують швидкістю та крутним моментом двигуна. Конструкція безщіткової моторної системи, як правило, схожа на синхронний двигун із постійними магнітами [15].

Вентильний двигун із трьома котушками на статорі матиме шість електричних дротів (по два на кожную котушку). У більшості реалізацій три з цих проводів будуть з'єднані внутрішньо, причому три проводи, що залишилися, прокладені від корпусу двигуна. Електропроводка в корпусі ВД складніша, ніж просто підключення позитивних та негативних клем силового осередку.

Однією з великих переваг є ефективність, оскільки ці двигуни можуть безперервно керувати при максимальній обертальній силі (крутному моменті). Машинні двигуни, навпаки, досягають максимального моменту, що крутить, тільки в певних точках обертання. Для щіткового двигуна, що забезпечує такий же момент, що крутить, що і безщіткова модель, потрібно використовувати великі магніти. Ось чому навіть невеликі ВД можуть забезпечити значну потужність.

Друга велика перевага, пов'язана з першим – це керованість. ВД можуть керуватися за допомогою механізмів зворотного зв'язку для доставки точно необхідного моменту, що крутить, і швидкості обертання. Прецизійне

управління, у свою чергу, зменшує споживання енергії та тепловиділення.

ВД також забезпечують високу зносостійкість та низьке електричне шумозаглушення завдяки відсутності щіток. При використанні щіткових моторів, щітки та комутатори зношуються в результаті безперервного переміщення контакту, а також створюють іскри. Електричні шуми, зокрема, є результатом сильних іскор, які мають тенденцію виникати у областях, де щітки проходять через проміжки у комутаторі. Ось чому ВД часто вважаються кращими у місцях, де важливо уникати електричних шумів.

Метою розрахунку є проектні рішення щодо конструкції вентильних двигунів потужності 0,12 кВт та 1,0 кВт.

Вихідні дані до розрахунку.

Частота обертання вентильного двигуна в Гц.

$$f_e = n_0 \cdot \frac{1}{60}, \quad (2.1)$$

де n_0 – номінальна частота обертання двигуна. Відповідно для:

ВД- 120: $f_e = 25$ Гц.

ВД- 1000: $f_e = 50$ Гц.

З технічного завдання споживана потужність ВД:

ВД- 120: $P_{\epsilon} = 120$ Вт.

ВД- 1000: $P_{\epsilon} = 1000$ Вт.

Момент на валу двигуна обчислюється як

$$M_B = \frac{P_B}{2 \cdot \pi \cdot f_e},$$

Відповідно для:

ВД- 120: $M_B = 0,76 \text{ Нм}$.

ВД- 1000: $M_B = 3,18 \text{ Нм}$.

За технічним завданням мінімальний ККД для ВД120 та ВД1000 становить $\eta_{\min} = 0,9$.

Електроживлення ВД базового виконання повинно здійснюватися за рахунок внутрішньої мережі напругою 24 В.

Вибір магнітного матеріалу ВД. Виходячи з практичних міркувань максимальна температура всередині двигуна зазвичай задається на рівні 120°C , що відповідає класу нагрівальності ізоляції Е. Заданий температурний режим дозволяє використовувати як пазова ізоляція широко поширені синтетичні органічні плівки і встановлює для надійної роботи двигуна необхідність вибору магнітного матеріалу з робочою температурою від 150°C .

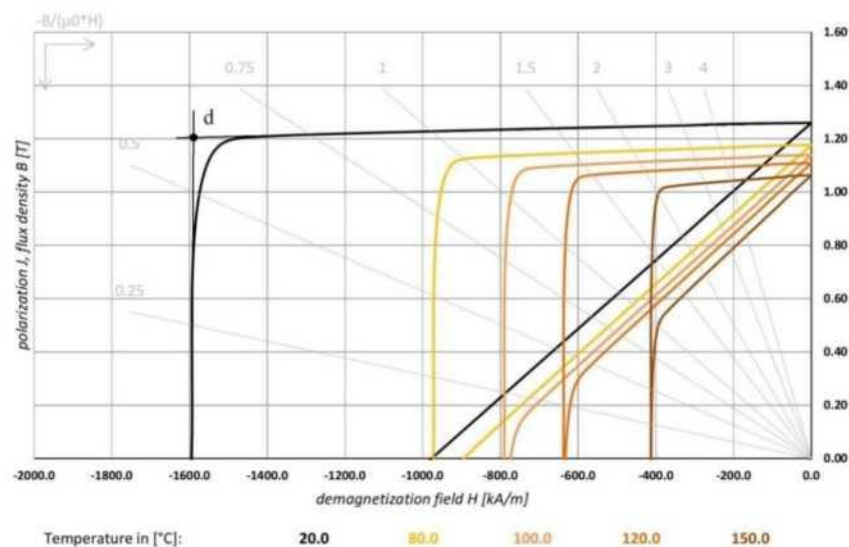


Рисунок 2.1 – Робоча діаграма магніту

Найбільший техніко-економічний ефект може бути досягнутий при використанні в ВД магнітів системи Nd-Fe-B, що володіють виключно високими гістерезисними характеристиками (залишковою індукцією B_r і коерцитивною силою H_c). Робоча діаграма магніту марки 38SH з максимальною робочою температурою 150°C [15] наведено рис 2.1.

Основний розрахунок виконаний для $T = 25^{\circ}\text{C}$. Для крайніх робочих температур достатньо уточнити значення машинної постійної (або силу струму в обмотці якоря, при якій досягається необхідний момент), а також переконатися в наявності запасу сили, що розмагнічує, в робочому режимі.

На рис. 2.2 визначено магнітні параметри (залишкова індукція, коерцитивна сила за намагніченістю) матеріалу НмБ 280/160 за ГОСТР 52956-2008. В результаті отримано:

Залишкова індукція – $B_r = 125$ Тл.

Коерцитивна сила намагніченості – $H_c = 1592 \cdot 10^3$ А/м.

Магнітна постійна це фізична константа, прийнята рівною:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}, \quad (2.2)$$

Для визначення робочої точки магніту виконано апроксимацію робочої характеристики магніту за методикою, наведеною на рис. 2.2.

Стандартна марка NdFeB	a ²	Максимальний енергетичний добуток	Залишкова магнітна індукція	Коерцитивна сила		Магнітна проникність повернення	Щільність
				з магнітної індукції	за намагніченістю		
НмБ 210/160	а	210—250	1,06—1,13	790—840	≥ 1600	От 1,05 до 1,10	От 7,3 до 7,6
НмБ 250/160	а	250—280	1,13—1,21	840—900	≥ 1600		
НмБ 280/160	а	280—310	1,21—1,30	900—920	≥ 1600		
НмБ 310/160	а	310—330	1,30—1,32	920—950	≥ 1600		
НмБ 150/190	а	150—170	0,94—0,98	680—700	≥ 1900		
НмБ 170/190	а	170—200	0,98—1,06	700—760	≥ 1900		
НмБ 200/190*	а	200—240	1,06—1,16	760—840	≥ 1900		
НмБ 240/200*	а	240—260	1,16—1,21	760—840	≥ 2000		
НмБ 260/200*	а	260—280	1,21—1,25	840—900	≥ 2000		
НмБ 150/240	а	150—170	0,94—0,98	680—700	≥ 2400		
НмБ 170/240	а	170—210	0,98—1,06	700—760	≥ 2400		
НмБ 210/240*	а	210—250	1,06—1,20	760—830	≥ 2400		
НмБ 250/240*	а	250—280	1,20—1,25	830—860	≥ 2400		
НмБ 150/270	а	150—170	0,94—0,98	680—700	≥ 2700		
НмБ 170/270	а	170—210	0,98—1,06	700—780	≥ 2700		
НмБ 210/270	а	210—250	1,06—1,20	780—830	≥ 2700		
НмБ 250/270	а	250—280	1,20—1,23	830—850	≥ 2700		

Рисунок 2.2 – Магнітні параметри та щільність матеріалу

Залишкова намагніченість знаходиться за формулою:

$$M_r = \frac{B_r}{\mu_0}, \quad (2.3)$$

де B_r – залишкова індукція;

μ_0 – магнітна постійна;

$$M_r = 9,95 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

За графіком визначено M_d , H_d (Точка d на рис. 2.1). H_d та B_d – координатні точки, що визначають максимум питомої енергії:

$$B_d = 1,2 \text{ Тл,}$$

$$H_d = 1580 \cdot 10^3 = 1,58 \cdot 10^6 \text{ А/м}$$

$$M_d = \frac{B_d}{\mu_0}, \quad (2.4)$$

$$M_d = 9,95 \cdot 10^5 \text{ А/м}$$

Апроксимуючий вираз має вигляд:

$$M(H) = M_r \cdot \frac{H_{CM} - H}{H_{CM} - k \cdot H}, \quad (2.5)$$

Числовий коефіцієнт k визначений за виразом:

$$k = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_r \cdot H_{CM}}{M_d \cdot H_d} - \frac{M_r \cdot H_{CM}}{M_d \cdot H_d}}, \quad (2.6)$$

де H_{CM} – коерцитивна сила по намагніченості;

M_r – залишкова намагніченість.

Отже, $k = 1$.

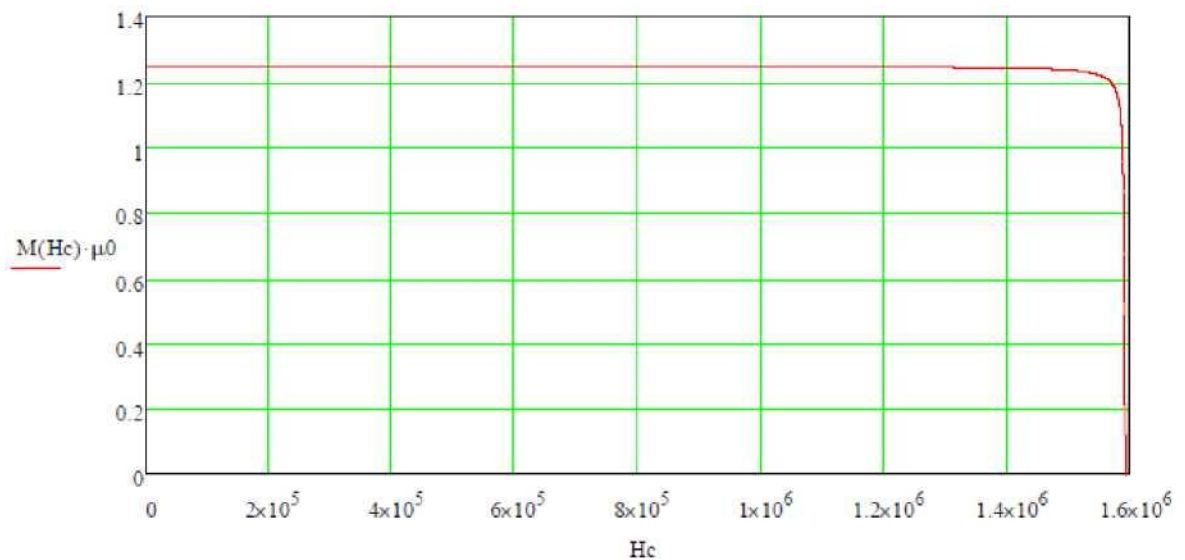


Рисунок 2.3 – Апроксимована робоча характеристика магніту

$$U_{d\min} = 24 \cdot 0,85 = 20,4 \text{ В}, \quad (2.7)$$

Розрахунок габаритних властивостей.

Зовнішній діаметр корпусу двигуна:

ВД-120: $D_k = 98$ мм.

ВД-1000: $D_k = 139$ мм.

Товщина стінки корпусу:

ВД-120: $h_{cm} = 4$ мм.

ВД-1000: $h_{cm} = 5$ мм.

Зовнішній діаметр статорного пакета визначено за формулою:

$$D_H = D_k - 2 \cdot h_{cm}, \quad (2.8)$$

ВД-120: $D_H = 90$ мм.

ВД-1000: $D_H = 129$ мм.

Довжина пакету якоря відповідно:

ВД-120: $l_{\text{я}} = 50$ мм.

ВД-1000: $l_{\text{я}} = 45$ мм.

Діаметр валу (в зоні індуктора):

ВД-120: $D_{\text{вал}} = 12$ мм.

ВД-1000: $D_{\text{вал}} = 23$ мм.

Геометричні параметри, обмежені технологічно:

Повітряний зазор:

ВД-120: $\delta = 0,5$ мм.

ВД-1000: $\delta = 0,7$ мм.

Наведені нижче параметри мають однакові значення як для ВД-120, так і для ВД-1000.

Висота вусиків індуктора:

$$h_y = 1,5 \text{ мм.}$$

Висота ярма індуктора:

$$h_j = 1,5 \text{ мм.}$$

Мін. висота спинки якоря:

$$h_{a\min} = 3 \text{ мм.}$$

Мін. діаметр паза якоря:

$$b_{2\min} = 2 \text{ мм.}$$

Мін. ширина зубця якоря:

$$b_{z\min} = 2 \text{ мм.}$$

Висота шліцю (вусиків) якоря:

$$h_{III} = 1 \text{ мм.}$$

Ширина шліцю:

$$b_{III} = 1,7 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт заповнення сталлю:

$$k_c = 0,9.$$

Число фаз обмотки:

$$m_{\text{фаз}} = 3.$$

Число пазів на полюс та фазу:

$$q = 2$$

Індукція в полюсах індуктора та зубцях якоря

ВД-120: $B_n = 1,5 \text{ Тл}$, $B_z = 1,5 \text{ Тл}$.

ВД-1000: $B_n = 1,5 \text{ Тл}$, $B_z = 1,6 \text{ Тл}$.

Коефіцієнт насичення:

$$k_{\mu} = 1,2.$$

Внутрішній діаметр установки магнітів (дотична):

$$D_{BH} = D_{\text{вал}} + 2 \cdot h_j, \quad (2.9)$$

ВД-120 : $D_{BH} = 15$ мм.

ВД-1000 : $D_{BH} = 26$ мм.

Геометрія магнітів Висота магніту з умови максимуму магнітної енергії магнітів:

$$h_{\min} = 1,3 \cdot \frac{\delta \cdot B_n}{\mu_0 \cdot H_d}, \quad (2.10)$$

де B_n – індукція в полюсах індуктора;

μ_0 – постійна магнітна це фізична константа;

δ – повітряний зазор;

H_d – координатна точка, що визначає максимум питомої енергії.

ВД-120: $h_{\min} = 0,49$ мм.

ВД-1000: $h_{\min} = 0,69$ мм.

Виберемо призматичні магніти із габаритними розмірами 25×15×4. При незадовільному результаті змінимо розміри магнітів та повторимо розрахунок.

Висота магнітів обох двигунів (половина останнього розміру):

$$h_m = 2 \text{ мм}.$$

Ширина магніту:

ВД-120: $b_m = 15$ мм.

ВД-1000: $b_m = 25$ мм.

Число пар полюсів з умови насичення полюсів (за умови максимального використання магнітного матеріалу):

$$P_{\max 1} = \frac{1,57}{\arcsin(B_d / B_{\Pi})}, \quad (2.11)$$

ВД-120: $P_{\max 1} = 1,69$.

ВД-1000: $P_{\max 1} = 1,69$.

Максимальна кількість пар полюсів із умови розміщення магнітів:

$$P_{\max 2} = 0,785 \cdot \frac{D_{BH}}{H_m}, \quad (2.12)$$

ВД-120: $P_{\max 2} = 5,89$.

ВД-1000: $P_{\max 2} = 10,21$.

Таким чином число пар полюсів:

ВД-120: $p = 2$.

ВД-1000: $p = 3$.

2.2 Визначення кількості пазів та їх розмірів

Максимальне значення діаметра якоря перебуває з умов технологічних обмежень:

$$D_{a \max} = D_H - 2 \cdot (h_{a \min} + d_{2 \min} + h_{III}), \quad (2.13)$$

де h_{III} – висота шлица (усиків) якоря;

$d_{2\min}$ – мінімальний діаметр паза якоря;

$h_{a\min}$ – мінімальне значення спинки якоря.

ВД-120: $D_{a\max} = 78$ мм.

ВД-1000: $D_{a\max} = 117$ мм.

Мінімальне значення діаметра якоря перебуває з умови технологічних обмежень геометрії якоря:

$$D_{a\min l} = 0,64 \cdot p \cdot q \cdot m \cdot (b_{z\min} + d_{2\min}), \quad (2.14)$$

де p – число пар полюсів;

m – число фаз обмотки;

q – число пазів на полюс та фазу;

$d_{2\min}$ – мінімальний діаметр паза якоря;

$b_{z\min}$ – мінімальні значення зубця якоря.

ВД-120: $D_{a\min l} = 10,24$ мм.

ВД-1000: $D_{a\min l} = 15,36$ мм.

Діаметр ротора визначено як:

$$D_u = D_{BH} + 2 \cdot (b_m + h_y), \quad (2.15)$$

де b_m – ширина магніту;

h_y – висота вусиків індуктора.

ВД-120: $D_u = 48$ мм.

ВД-1000: $D_u = 79$ мм.

Діаметр якоря визначено як:

$$D_a = D_u + 2 \cdot \delta, \quad (2.16)$$

де δ – повітряний зазор.

ВД-120: $D_a = 49$ мм.

ВД-1000: $D_a = 80,4$ мм.

Полісний поділ визначається:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p}, \quad (2.17)$$

де p – число пар полюсів;

D_a – діаметр якоря.

ВД-120: $\tau = 38,48$ мм.

ВД-1000: $\tau = 42,1$ мм.

Число пазів якоря:

$$z = 2 \cdot p \cdot m_{\text{фаз}} \cdot q, \quad (2.18)$$

де p – число пар полюсів;

$m_{\text{фаз}}$ – число фаз обмотки;

q – число пазів на полюс та фазу.

ВД-120: $z = 24$ мм.

ВД-1000: $z = 36$ мм.

Зубцове поділ:

$$t = \frac{\pi \cdot D_a}{z}, \quad (2.19)$$

де z – число пазів якоря;

D_a – діаметр якоря.

ВД-120: $t = 6,41$ мм.

ВД-1000: $t = 7,02$ мм.

Коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_{\delta} = \frac{t + 10 \cdot \delta}{t + 10 \cdot \delta - b_{III}}, \quad (2.20)$$

де δ – повітряний зазор;

b_{III} – ширина шліцю;

t – зубцевий поділ.

ВД-120: $k_{\delta} = 1,18$ мм.

ВД-1000: $k_{\delta} = 1,14$ мм.

Ширина міжполюсного проміжку:

$$\alpha_k = t - b_{III}, \quad (2.21)$$

де b_{III} – ширина шліцю;

t – зубцевий поділ.

ВД-120: $\alpha_k = 4,71$ мм.

ВД-1000: $\alpha_k = 5,32$ мм.

Порівнюються $\alpha_k < 2 \cdot h_m$. Якщо умова не виконується, тоді α_k приймається як 4 мм.

Ширина полюса:

$$b_n = \tau - \alpha_k, \quad (2.22)$$

де τ – полюсний поділ;

α_k – ширина міжполюсного проміжку.

ВД-120: $b_n = 38,48$ мм.

ВД-1000: $b_n = 38,1$ мм.

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття однаковий для обох двигунів:

$$a_\delta = \frac{b_n}{\tau}, \quad (2.23)$$

де b_n – ширина полюса;

τ – полюсний поділ.

$$a_\delta = 0,9$$

Розрахункова ширина повітряного зазору b_δ дорівнює ширині полюса b_n :

ВД-120: $b_\delta = b_n = 34,48$ мм.

ВД-1000: $b_\delta = b_n = 38,1$ мм.

Довжина зазору l_δ , довжина магніту l_m (сумарна так як 2 магніти встановлені в ряд):

Справедливо для обох двигунів: $l_\delta = l_y$ і $l_m = l_y$

де l_y – довжина пакета якоря.

Перетин повітряного зазору на одному полюсному розподілі:

$$Q_\delta = b_\delta \cdot l_\delta, \quad (2.24)$$

де l_δ – довжина зазору;

b_δ – ширина повітряного зазору.

ВД-120: $Q_\delta = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

ВД-1000: $Q_\delta = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Перевірка ширини магніту:

$$b_m = 0,5 \cdot (D_a - D_{BH}) - h_y - \delta, \quad (2.25)$$

де δ – повітряний зазор;

h_y – висота вусиків індуктора;

D_a – діаметр якоря;

D_{BH} – Внутрішній діаметр установки магнітів.

ВД-120: $b_m = 0,02$ м.

ВД-1000: $b_m = 0,03$ м.

Площа магнітів у нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ:

$$Q_m = 2 \cdot b_m \cdot l_m, \quad (2.26)$$

де b_m – ширина магніту;

l_m – довжина магніту;

ВД-120: $Q_m = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м².

ВД-1000: $Q_m = 2,25 \cdot 10^{-3}$ м².

Наведена магнітна провідність робочого зазору:

$$\lambda_\delta = \mu_0 \cdot \frac{h_m \cdot Q_\delta}{\delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot Q_m}, \quad (2.27)$$

де h_m – висота магніту;

μ_0 – постійна магнітна це фізична константа;

δ – повітряний зазор;

Q_δ – переріз повітряного зазору одному полюсному розподілі;

k_δ – коефіцієнт повітряного зазору;

k_μ – коефіцієнт насичення;

Q_m – площа магнітів у нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ.

ВД-120: $\lambda_\delta = 4,1 \cdot 10^{-6}$ Н/м.

ВД-1000: $\lambda_\delta = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Коефіцієнт розсіювання вибирається з характеристик магнітного матеріалу, який справедливий для обох двигунів:

$$k_\delta = 1,15$$

Повна наведена провідність:

$$\lambda = k_\delta \cdot k_\mu, \quad (2.28)$$

де k_δ – коефіцієнтом розсіювання;

λ_δ – наведена магнітна провідність робочого проміжку.

ВД-120: $\lambda = 4,71 \cdot 10^{-6}$ Н/м.

ВД-1000: $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-6}$ Н/м.

Для визначення координат робочої точки на робочій діаграмі магніту використовуються формули:

$$a_1 = \frac{1}{k} \cdot \left(H_{CM} + \frac{B_r}{\lambda + \mu_0} \right), \quad (2.29)$$

$$a_2 = \frac{H_{CM} \cdot B_r}{k \cdot (\lambda + \mu_0)}, \quad (2.30)$$

де k – чисельний коефіцієнт;

H_{CM} – коерцитивна сила по намагніченості;

B_r – залишкова індукція;

λ – повна наведена провідність;

μ_0 – постійна магнітна це фізична константа.

ВД-120: $a_1 = 1,8 \cdot 10^6$ А/м, $a_2 = 3,34 \cdot 10^{11}$ А²/м².

ВД-1000: $a_1 = 1,94 \cdot 10^6$ А/м, $a_2 = 5,59 \cdot 10^{11}$ А²/м².

в) магнітна напруженість у робочій точці:

$$H_p = 0,5 \cdot a_1 - \sqrt{(0,5 \cdot a_1)^2 - a_2}, \quad (2.31)$$

де a_1 і a_2 – координати робочої точки на робочій діаграмі магніту.

ВД-120: $H_p = 2,09 \cdot 10^5$ А/м.

ВД-1000: $H_p = 3,51 \cdot 10^5$ А/м.

г) індукція в робочій точці, що відповідає корисному потоку

$$B_{\delta m} = \lambda_{\delta} \cdot H_p, \quad (2.32)$$

де λ_{δ} – наведена магнітна провідність робочого проміжку;

H_p – магнітна напруженість у робочій точці.

ВД-120: $B_{\delta m} = 0,86$ Тл.

ВД-1000: $B_{\delta m} = 0,7$ Тл.

Розрахункова індукція у зазорі:

$$B_{\delta} = B_{\delta m} \cdot \frac{Q_m}{Q_{\delta}}, \quad (2.33)$$

де $B_{\delta m}$ – індукція в робочій точці, що відповідає корисному потоку;

Q_m – площа магнітів у нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ;

Q_{δ} – переріз повітряного зазору на одному полюсному поділі.

ВД-120: $B_{\delta} = 0,75$ Тл.

ВД-1000: $B_{\delta} = 0,92$ Тл.

Ширина зубця якоря:

$$b_z = \frac{\pi \cdot D_a \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot z \cdot B_z}, \quad (2.34)$$

де D_a – діаметр якоря;

B_{δ} – розрахункова індукція в зазорі ;

B_z – індукція у полюсах;

z – число пазів якоря;

k_c – коефіцієнт заповнення сталі.

ВД-120: $b_z = 3,55$ мм.

ВД-1000: $b_z = 4,5$ мм.

Висота спинки якоря:

$$h_a = a_{\delta} \cdot \frac{z \cdot b_z}{4 \cdot p}, \quad (2.35)$$

де z – число пазів якоря;

b_z – ширина зубця якоря;

p – число полюсів;

a_{δ} – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

ВД-120: $h_a = 9,53$ мм.

ВД-1000: $h_a = 12,21$ мм.

Порівнюються $b_z > b_{zmin}$. Ширина зубця більша за мінімальну ширину зубців (2 мм): умова виконується, тим самим береться значення b_z . Це справедливо для обох двигунів.

Менший діаметр паза якоря:

$$d_2 = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot h_m) - z \cdot b_z}{z - \pi}, \quad (2.36)$$

де D_a – діаметр якоря;

h_m – висота шлица (вусиків) якоря;

z – число пазів якоря;

b_z – ширина зубця якоря.

ВД-120: $d_2 = 3,6$ мм.

ВД-1000: $d_2 = 2,95$ мм.

Порівнюється умова $d_2 > d_{2min}$. Мінімальний діаметр $d_{2min} = 2$ мм.

Умова виконується для обох двигунів.

Діаметр кола якоря, що відповідає розташуванню центрів менших діаметрів пазів якоря:

$$D_2 = D_a + h_y + d_2, \quad (2.37)$$

де D_a – діаметр якоря;

h_y – висота вусиків індуктора;

d_2 – менший діаметр паза якоря.

ВД-120: $D_2 = 54,1$ мм.

ВД-1000: $D_2 = 84,85$ мм.

Порівнюються h_a і $h_{amin} = 3$ мм. Умова виконується, оскільки $h_a > h_{amin}$.

Для полуовальных пазів визначають діаметри паза, показані рис. 2.4, де

D'_1 – більший діаметр паза, d'_1 – Менший діаметр паза.

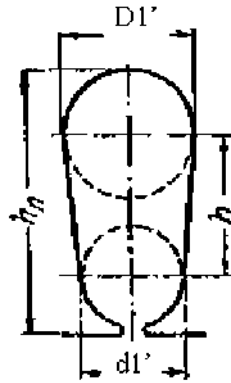


Рисунок 2.4 – Геометричні розміри паза

$$D_1' = D_H - 2 \cdot h_a, \quad (2.38)$$

де D_H – зовнішній діаметр статорного пакета;

h_a – висота спинки якоря;

b_z – ширина зубця якоря.

ВД-120: $D_1' = 0,07$ мм.

ВД-1000: $D_1' = 104,58$ мм.

$$d_1' = \frac{\pi}{z} \cdot D_1' - b_z, \quad (2.39)$$

ВД-120: $d_1' = 5,74$ мм.

ВД-1000: $d_1' = 4,63$ мм.

Площа для напівовального паза:

$$Q_{II} = \frac{\pi \cdot (D_1'^2 - D_2'^2)}{4} + \frac{\pi \cdot d_2'^2}{2} - b_z \cdot \frac{(D_1' - D_2')}{2}, \quad (2.40)$$

де D_1' – діаметр напівовальних пазів;

D_2' – діаметр кола якоря, відповідний розташування центрів менших діаметрів пазів якоря;

b_z – ширина зубця якоря;

d_2 – менший діаметр паза якоря.

ВД-120: $Q_{II} = 4,41 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

ВД-1000: $Q_{II} = 4,06 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Розрахунок магнітного ланцюга ВМД із тангенціальними постійними магнітами. Основний магнітний потік визначається як:

$$\Phi_{\delta} = 2 \cdot B_{\delta m} \cdot b_m \cdot l_m, \quad (2.41)$$

де $B_{\delta m}$ – індукція у робочій точці;

b_m – ширина магніту;

l_m – довжина магніту.

ВД-120: $\Phi_{\delta} = 1,29 \text{ Вб}$.

ВД-1000: $\Phi_{\delta} = 1,58 \text{ Вб}$.

$$\Phi'_{\delta} = 2 \cdot B_{\delta} \cdot b_n \cdot l_m, \quad (2.42)$$

де B_{δ} – розрахункова індукція у зазорі;

b_n – ширина полюса;

l_m – довжина магніту.

ВД-120: $\Phi'_{\delta} = 1,29 \text{ Вб}$.

ВД-1000: $\Phi'_{\delta} = 1,29 \text{ Вб}$.

Фактична індукція у спинці якоря

$$B_a = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot k_c \cdot h_a \cdot l_{\text{я}}}, \quad (2.43)$$

де Φ_{δ} – основний магнітний потік;

k_c – коефіцієнт заповнення сталлю;

h_a – висота спинки якоря;

l_y – довжина пакета якоря.

ВД-120: $B_a = 1,5$ Тл.

ВД-1000: $B_a = 1,6$ Тл.

Фактична індукція в зубцях якоря:

$$B_z = \frac{\pi \cdot D_a \cdot B_\delta}{2 \cdot k_c \cdot z \cdot b_z}, \quad (2.44)$$

де D_a – діаметр якоря;

B_δ – розрахункова індукція в зазорі;

k_c – коефіцієнт заповнення сталлю;

z – число пазів якоря;

b_z – Ширина зубця якоря.

ВД-120: $B_z = 1,5$ Тл.

ВД-1000: $B_z = 1,6$ Тл.

Довжина силової лінії зубцевої зони (на один полюс):

$$L_z = 0,5 \cdot (D'_1 - D_a), \quad (2.45)$$

де D'_1 – більший діаметр полуовального паза;

D_a – діаметр якоря.

ВД-120: $L_z = 10,97$ мм.

ВД-1000: $L_z = 12,09$ мм.

Довжина силової лінії у спинці якоря (на один полюс):

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_H - h_a)}{4 \cdot p} + 0,5 \cdot h_a, \quad (2.46)$$

де D_H – зовнішній діаметр статорного пакета;

h_a – висота спинки якоря;

p – число пар полюсів.

ВД-120: $L_a = 36,37$ мм.

ВД-1000: $L_a = 36,68$ мм.

МДС повітряного зазору:

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_\delta, \quad (2.47)$$

де B_δ – розрахункова індукція у зазорі;

μ_0 – магнітна постійна;

δ – повітряний зазор між статором і ротором;

k_δ – коефіцієнт повітряного зазору.

ВД-120: $F_\delta = 348,99$ А.

ВД-1000: $F_\delta = 585,05$ А.

2.3 Розрахунок проти-ЕРС

Вищі гармоніки ЕРС спотворюють напругу мережі, що призводить до додаткових втрат в електроприймачах і мережі. Вищі гармоніки також є причиною шумів і вібрацій в електричних машинах. Тому в електричних машинах вживаються заходи щодо придушення вищих гармонік. Першим із таких заходів є поліпшення форми кривої розподілу самого поля. Для поліпшення форми проти -ЕРС обмотка виконана розподіленою з укороченням кроку [15]. Пази статора (якоря) виконана зі скосом на 1 зубець.

Величина скосу:

Для поліпшення форми кривої ЕРС обмотки та інших цілей здійснюється скіс пазів щодо магнітного поля, що біжить. Він визначається з використанням діаграми, наведеної рис. 2.5.

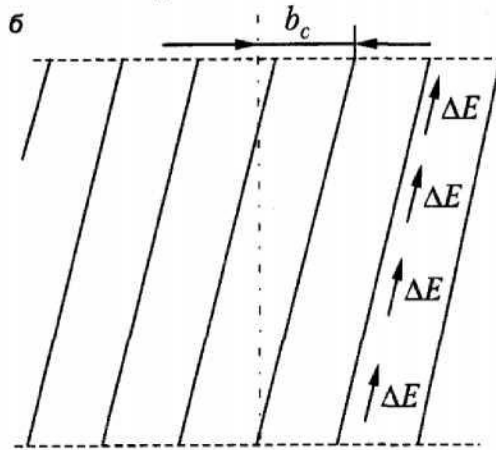


Рисунок 2.5 – ЕРС провідника при скосі пазів

$$b_c = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{z}, \quad (2.48)$$

де p – число пар полюсів;

τ – полюсний поділ;

z – число пазів якоря.

ВД-120: $b_c = 6,41$ мм.

ВД-1000: $b_c = 7,02$ мм.

Коефіцієнт скосу.

$$K_c = \frac{\sin\left(\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}, \quad (2.49)$$

де b_c – величина скосу;

τ – полюсний поділ.

ВД-120: $K_c = 0,99$.

ВД- 1000: $K_c = 0,99$.

Кут зсуву ЕРС сусідніх катушок (γ) відповідає куту зсуву катушок щодо один одного в магнітному полі (рис. 2.6).

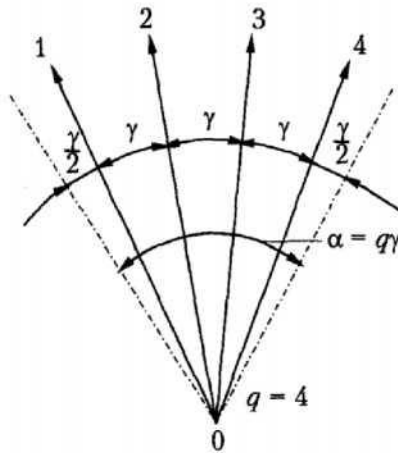


Рисунок 2.6 – ЕРС катушок катушкової групи

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z}, \quad (2.50)$$

де p – число пар полюсів;

z – число пазів якоря.

ВД-120: $\gamma = 33,07^\circ$.

ВД-1000: $\gamma = 33,07^\circ$.

При цьому вся група з катушок q займає по колу якоря кут (електричний) званий кутом фазної зони:

$$\alpha = q \cdot \gamma, \quad (2.51)$$

ВД- 120: $\alpha = 60^\circ$.

ВД- 1000: $\alpha = 60^\circ$.

Коефіцієнт розподілу обмотки характеризує зменшення ЕРС

котушкової групи внаслідок розподілу її витків в окремих пазах.

$$K_p = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2 \cdot q}\right)}, \quad (2.52)$$

ВД-120: $K_p = 0,97$.

ВД-1000: $K_p = 0,97$.

Кроком обмотки по пазах називається відстань між активними сторонами котушки (рис. 2.7).

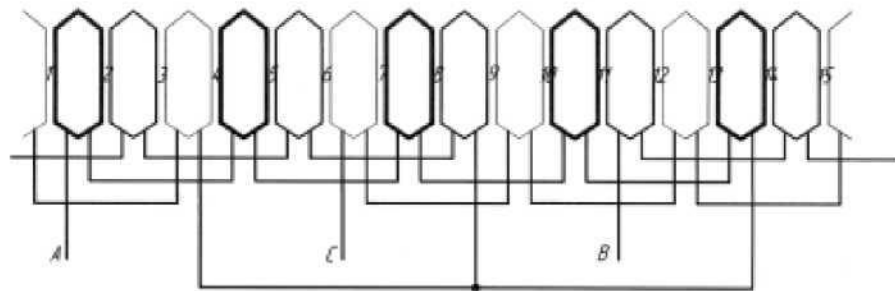


Рисунок 2.7 – Схема обмотки статора

$$y = \frac{z}{2 \cdot p} - 1, \quad (2.53)$$

де p – число пар полюсів;

z – число пазів якоря.

ВД-120: $y = 5$.

ВД-1000: $y = 5$.

Відносний крок

$$\beta = \frac{y \cdot 2 \cdot p}{z}, \quad (2.54)$$

де y – крок обмотки;

p – число пар полюсів;

z – число пазів якоря.

ВД-120: $\beta = 0,83$.

ВД-1000: $\beta = 0,83$.

Коефіцієнт укорочення кроку обмотки:

$$K_y = \sin \frac{\beta \cdot \pi}{2}, \quad (2.55)$$

де β – відносний крок обмотки.

ВД-120: $K_y = 0,97$.

ВД-1000: $K_y = 0,97$.

Коефіцієнт обмотки:

$$K_{o\bar{o}} = K_p \cdot K_y, \quad (2.56)$$

де K_p – коефіцієнт розподілу обмотки;

K_y – коефіцієнт укорочення кроку обмотки.

ВД-120: $K_{o\bar{o}} = 0,93$.

ВД- 1000: $K_{o\bar{o}} = 0,93$.

ЕРС витка дорівнює геометричній різниці ЕРС провідників (рис. 2.8)

$$E_{k0m} = 2 \cdot p \cdot f_{\epsilon} \cdot \Phi_{\delta} \cdot K_{o\bar{o}} \cdot K_c, \quad (2.57)$$

де f_{ϵ} – частота обертання ВД;

Φ_{δ} – основний магнітний потік;

$K_{o\bar{o}}$ – коефіцієнт обмотки;

K_c – коефіцієнт скосу.

ВД-120: $E_{k0m} = 0,19$ В.

ВД-1000: $E_{k0m} = 0,46$ В.

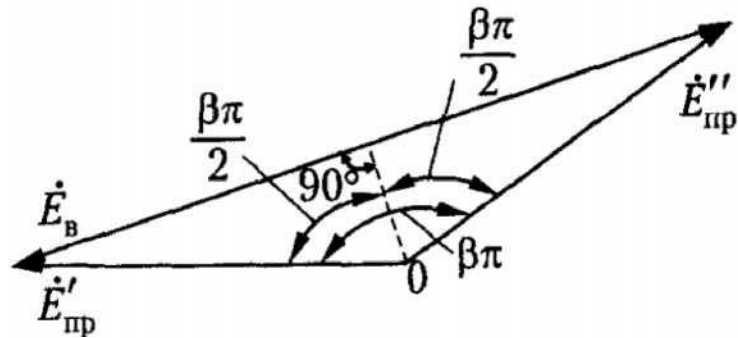


Рисунок 2.8 – Визначення ЕРС витка

Максимальне падіння напруги на обмотці та ключах комутатора (однакове для обох двигунів):

$$\Delta U_d = 1 \text{ В.}$$

Максимальне амплітудне значення протиЕРС кожної обмотки. Обмотки включені за схемою "зірка", як показано на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Схема зірка

Обмотки управляються із трифазного інвертора з векторним управлінням. Таким чином, лінійна напруга обмоток відповідає напрузі шини постійного струму мінус падіння напруги на ключах і активному опорі обмоток.

$$E_{m_max} = \frac{U_{d\min} - \Delta U_d}{\sqrt{3}}, \quad (2.58)$$

де $U_{d\min}$ – напруга живлення мінімальна;

ΔU_d – максимальне падіння напруги на обмотці та ключах комутатора.

ВД-120: $E_{m_max} = 11,2$ В.

ВД-1000: $E_{m_max} = 11,2$ В.

Необхідна кількість витків у розрахунку на 1 паз та 1 пару полюсів (ціле число)

$$W_n = \frac{E_{m_max}}{E_{k0m} \cdot p \cdot q}, \quad (2.59)$$

де E_{m_max} – максимальне амплітудне значення протиЕРС;

E_{k0m} – ЕРС витка амплітудна;

p – число пар полюсів;

q – число пазів на полюс та фазу.

ВД-120: $W_n = 15$.

ВД-1000: $W_n = 4$.

Уточнимо амплітудне значення протиЕРС після округлення

$$E_m = E_{k0m} \cdot p \cdot q \cdot W_n, \quad (2.60)$$

де E_{k0m} – ЕРС витка амплітудна;

p – число пар полюсів;

q – число пазів на полюс та фазу;

W_n – необхідна кількість витків.

ВД-120: $E_m = 11,19$ В.

ВД-1000: $E_m = 11$ В.

Чинне значення протиЕРС (форма близька до синусоїдальної)

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.61)$$

де E_m – амплітудне значення протиЕРС.

ВД-120: $E_{rms} = 7,91$ В.

ВД-1000: $E_{rms} = 7,78$ В.

Чинне значення струму в обмотках

$$I_w = \frac{P_m}{E_{rms} \cdot 3}, \quad (2.62)$$

де E_{rms} – чинне значення протиЕРС ;

P_m – потужність ВД.

ВД-120: $I_w = 5,06$ А.

ВД-1000: $I_w = 42,84$ А.

2.4 Активні та індуктивні опори

Коефіцієнтом заповнення паза називається та частка поперечного перерізу паза, яка може бути зайнята провідниками з їхньою ізоляцією. Його величина залежить від форми паза - вона тим більше, чим закругленіший

обрис паза, і зростає зі збільшенням його розмірів (отже, вище у більших машин), але майже не залежить від діаметра провідника, і тільки при дуже значному збільшенні останнього помітно зменшується, оскільки дуже товсті провідники погано укладаються в паз.

На основі конструктивних особливостей пазів статора обох ВД приймемо коефіцієнт заповнення рівним $k_{zn} = 0,6$.

Коефіцієнт заповнення міддю лобових частин $k_{zn} = 0,6$.

Визначається максимальний переріз жили обмотки по заповненню:

$$S_w = \frac{Q'_n \cdot k_{zn}}{W_n}, \quad (2.63)$$

де Q' – площа для напівовального паза;

k_{zn} – коефіцієнт заповнення паза;

W_n – число витків.

ВД-120: $S_w = 1,76 \text{ мм}^2$.

ВД-1000: $S_w = 6,09 \text{ мм}^2$.

Щільність струму фактична:

$$j_w = \frac{I_w}{S_w}, \quad (2.64)$$

де I_w – чинне значення струму в обмотках;

S_w – максимальний переріз жили обмотки.

ВД-120: $j_w = 2,87 \text{ А /мм}^2$.

ВД-1000: $j_w = 7,03 \text{ А /мм}^2$.

Максимальний діаметр джгута в лобовій частині:

$$d_{wq} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_w \cdot W_n \cdot (2 \cdot q + 1)}{4 \cdot k_{3л}}}, \quad (2.65)$$

де W_n – число витків;

S_w – максимальний переріз жили обмотки;

$k_{3л}$ – коефіцієнт заповнення міддю лобових частин;

q – число пазів на полюс та фазу.

ВД-120: $d_{wq} = 16,76$ мм.

ВД-1000: $d_{wq} = 16,08$ мм.

Середня довжина напіввитку обмотки якоря розраховується за формулою (2.65):

$$l_{cp} = l_{я} + 1,9 \cdot (D_a + D'_1) \cdot \frac{y}{z}, \quad (2.66)$$

де D'_1 – більший діаметр полуовального паза;

D_a – діаметр якоря;

$l_{я}$ – довжина пакета якоря;

y – крок обмотки;

z – число пазів якоря.

ВД-120: $l_{cp} = 97,47$ мм.

ВД-1000: $l_{cp} = 93,82$ мм.

Сумарна довжина жили обмотки:

$$l_w = l_{cp} \cdot 2 \cdot W_n \cdot q \cdot p, \quad (2.67)$$

де l_{cp} – середня довжина напіввитку обмотки якоря;

q – число пазів на полюс та фазу;

W_n – число витків;

p – число пар полюсів.

ВД-120: $l_w = 11,7$ м.

ВД-1000: $l_w = 4,5$ м.

Питомий опір міді є фізичною константою: $\rho_M = 0,0175$ Ом · мм²/м

$$R_w = \rho_M \cdot \frac{l_w}{S_w}, \quad (2.68)$$

де ρ_M – питомий опір міді;

S_w – максимальний переріз жили обмотки;

l_w – сумарна довжина жили обмотки.

ВД-120: $R_w = 0,12$ Ом.

ВД-1000: $R_w = 0,01$ Ом.

2.5 Втрати сталі, механічні та додаткові втрати

Втрати у міді обумовлюються наявністю у дротах обмоток двигуна електричного опору. Струм, що протікає в обмотці, створює на такому провіднику падіння напруги. На обмотці розвивається деяка електрична потужність і частина енергії перетворюється на тепло, що нагріває обмотку.

$$\Delta P_M = I_w^2 \cdot 3 \cdot R_w, \quad (2.69)$$

де I_w – чинне значення струму в обмотках;

R_w – опір обмотки.

ВД-120: $\Delta P_M = 8,9$ Вт.

ВД-1000: $\Delta P_M = 71,24$ Вт.

Втрати сталі. Основна складова втрат – втрати в якорі. Поле індуктора

практично незмінне, тому втрати у сталі ротора не враховуються.

Вибирається листова сталь марки 2412 завтовшки 0,35 мм.

Щільність сталі визначається з характеристик цієї марки сталі:

$$\rho_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3.$$

Маса ярма якоря (спинки):

$$m_a = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D_1'^2)}{4} \cdot l_{я} \cdot \rho_{ст}, \quad (2.70)$$

де D_H – зовнішній діаметр статорного пакета;

D_1' – більший діаметр напівовального паза;

$l_{я}$ – довжина пакета якоря;

$\rho_{ст}$ – щільність сталі.

ВД-120: $m_a = 0,92$ кг.

ВД-1000: $m_a = 1,54$ кг.

Маса зубців якоря:

$$m_z = \frac{\pi \cdot (D_1' - D_a)}{2} \cdot b_z \cdot z \cdot l_{я} \cdot \rho_{ст}, \quad (2.71)$$

де D_1' – більший діаметр напівовального паза;

D_a – діаметр якоря;

z – число пазів;

b_z – ширина зубця якоря;

$l_{я}$ – довжина пакета якоря;

$\rho_{ст}$ – щільність сталі.

ВД-120: $m_z = 0,36$ кг.

ВД-1000: $m_z = 0,67$ кг.

Частота електрична:

$$f_{эл} = f_B \cdot p, \quad (2.72)$$

ВД-120: $f_{эл} = 50$ Гц.

ВД-1000: $f_{эл} = 150$ Гц.

Індукція у спинці якоря та зубцях (визначені раніше у (2.42) та (2.43).

ВД-120: $B_a = 1,5$ Тл.

ВД-1000: $B_a = 1,6$ Тл.

Питомі втрати на частоті 50 Гц та індукції 1 Тл визначені за таблицею магнітних властивостей марки 2412 (рис. 2.10).

Сортамент	Розмір	H_c	B_{max}	$P_{1.0/50}$	$P_{1.5/50}$	B_{100}	B_{500}	B_{1000}	B_{2500}	B_{5000}	B_{10000}	B_{30000}
-	мм	А/м	МГн/м	Вт/кг	Вт/кг	А/м	А/м	А/м	А/м	А/м	А/м	А/м
Лист тонкий холоднокат	0.5			1.3	3.1			1.35	1.5	1.6	1.7	1.95
Лист тонкий холоднокат	0.35			1.15	2.5			1.35	1.5	1.6	1.7	1.95

Рисунок 2.10 – Магнітні властивості сталі 2412

$P_{1.50} = 1,15P$ В/кг – однаково обох двигунів, оскільки марка сталі однакова.

Коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу та технологічних факторів. Для двигунів малої потужності прийняті рівними:

$$k_{\partial a} = 1,4,$$

$$k_{\partial z} = 1,7.$$

Для сталі марки 2412 показник залежності втрат від частоти дорівнює $\beta = 1,4$.

Втрати у сталі

$$\Delta P_{CT} = P_{1_50} \cdot \left(\frac{f_{эл}}{50} \right)^{\beta} \cdot \left[\left(\frac{B_a}{1T} \right)^2 \cdot m_a \cdot k_{\partial a} + \left(\frac{B_z}{1T} \right)^2 \cdot m_z \cdot k_{\partial z} \right], \quad (2.73)$$

де P_{1_50} – питомі втрати на частоті 50 Гц та індукції 1 Тл;

$f_{эл}$ – електрична частота;

B_a – фактична індукція в спинці якоря;

B_z – фактична індукція у зубцях якоря;

m_a – фактична індукція в зубцях якоря;

m_z – маса зубців якоря;

$k_{\partial a}, k_{\partial z}$ – коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу .

ВД-120: $\Delta P_{CT} = 4,91$ Вт.

ВД-1000: $\Delta P_{CT} = 45,29$ Вт.

Сумарні втрати:

$$\Delta P_{сум} = \Delta P_M + \Delta P_{CT}, \quad (2.74)$$

де ΔP_M – втрати у міді;

ΔP_{CT} – втрати у сталі.

ВД-120: $\Delta P_{сум} = 13,81$ Вт.

ВД-1000: $\Delta P_{сум} = 116,53$ Вт.

Отриманий ККД:

$$\eta = \frac{P_B}{\Delta P_{сум} + P_B}, \quad (2.75)$$

Розрахований ККД однаковий для обох двигунів і дорівнює $\eta = 0,9$.

2.6 Висновки до розділу 2

У цьому розділі проведено розрахунок основних параметрів вентильного двигуна. Наведено основні переваги в порівнянні з іншими типами двигунів.

Основні технічні параметри розрахованих вентильних двигунів зведено до табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Основні параметри вентильних двигунів

Найменування параметра	Двигун ВД-120	Двигун ВД-1000
Частота обертання, об/хв	1500	3000
Потужність споживана, Вт	120	1000
ККД, %	90	90
Напруга живлення,	24	24
Крутний момент валу, Нм	0,76	3,183
Діаметр ротора, мм	48	80
Довжина ротора, мм	50	45
Зовнішній діаметр статорного пакета, мм	90	129
Довжина пакету якоря, мм	50	45
Повітряний зазор, мм	0,5	0,7
Кількість магнітів	8	12

Розраховані в цьому розділі параметри повністю визначають конструктивні параметри двигунів та можуть бути використані для розробки РКД двигунів ВД-120 та ВД-1000.

3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Опис системи стеження

Досліджувана мехатронна система, представлена на рис. 3.1 відноситься до електроприводу, що стежить, узгоджених поворотів сонячних батарей по двох осях кутів азимуту і місця.

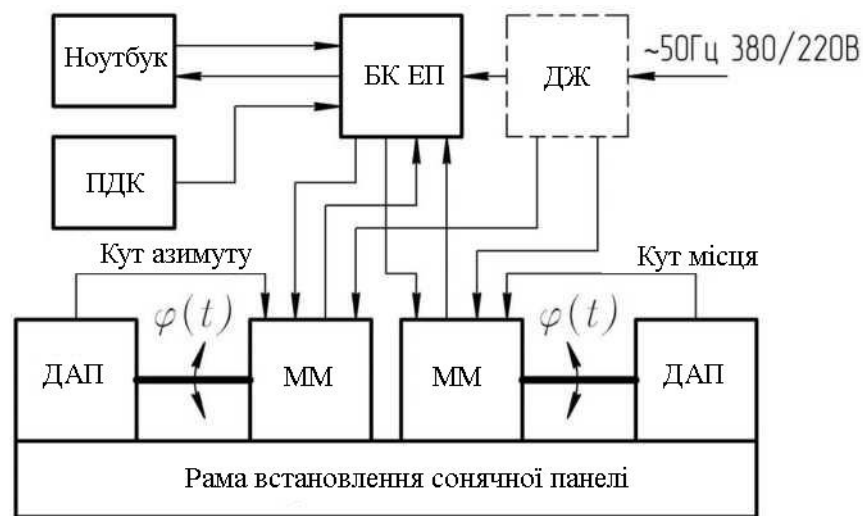


Рисунок 3.1 – Структурна схема мехатронної системи

До складу цієї мехатронної системи входять такі компоненти:

- рама із встановленою на ній пристроєм стеження;
- датчик абсолютного становища;
- два мехатронні модулі, що поєднують двигун і редуктор;
- блок керування електроприводу;
- пульт дистанційного керування з ноутбуком.

Мехатронні модулі виконують рух до заданих координат по командах від блоку управління. Цей блок забезпечує узгоджені та синхронні повороти обох мехатронних модулів за допомогою електричних двигунів.

На підставу структурної схеми була складена операторно структурна схема. Схему складено з урахуванням кінцевої жорсткості вузла з'єднання рами сонячних батарей з вихідним валом мехатронного модуля, яка є

типовою двомасовою системою слідкуючого електроприводу з пружним механічним зв'язком (рис. 3.2).

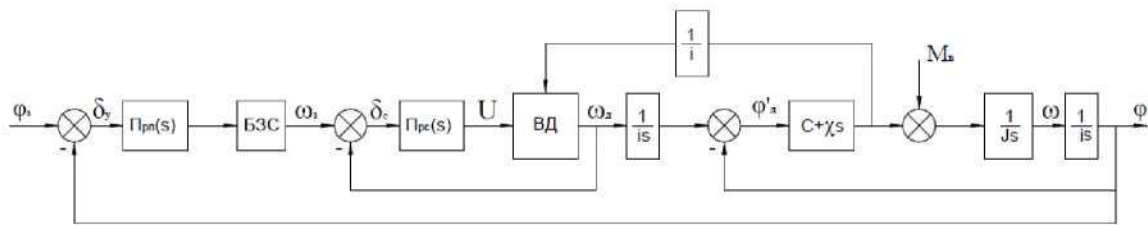


Рисунок 3.2 – Операторно-структурна схема системи управління СЕС

У схемі стеження, що досліджується:

- φ_s , φ – задане та фактичне значення кута повороту однієї з осей електроприводу;
- s – оператор Лапласа;
- J – момент інерції пристрою стеження;
- φ'_d – кут закручування вихідного валу, викликаний його кінцевою жорсткістю;
- U – керуюча напруга;
- C , χ – коефіцієнт жорсткості та дисипативних втрат у кінематиці нежорсткого з'єднання редуктор-рама;
- ω_d , ω , n_p – кутова швидкість валу двигуна та вихідний осі електроприводу, робоча кутова швидкість;
- δ_y , δ_c – помилки електроприводу по куту та швидкості;
- i – передатне число редуктора;
- M_B – момент зовнішніх сил, зокрема, момент, викликаний вітровим навантаженням;
- $\Pi_{pn}(s)$, $\Pi_{pc}(s)$ – передавальні функції регулятора положення та регулятора швидкості;
- БЗШ – блок завдання швидкості двигуна.

3.2 Моделювання системи стеження

Така система стеження схильна до появи в режимі автоколивань, що викликали кінцеву жорсткість конструкції кріплення рами сонячних батарей до валу електроприводу. Автоколивання зменшують динамічну точність позиціонування та її плавність руху, а також виникає постійна нецільова витрата енергії електричними двигунами [16]. Додатковими факторами погіршення основних динамічних характеристик системи орієнтації є зазор у механічній частині, викликаний люфтом редуктора. У кінематичному ланцюгу з урахуванням наявності люфта електроприводу було складено модель серед програмування MATLAB. Ця модель системи орієнтації представлена рис. 3.3. Тут як задає сигнал управління є інтерполяційне значення кута програми наведення.

Поліпшення електроприводів, що стежать, сонячних батарей подібного застосування відносять до класу автоматичних систем, алгоритми управління яких забезпечують високу точність орієнтації СЕС. У роботі проведено аналіз динамічних характеристик електроприводу, що слідкує, мехатронної системи СЕС, яка здійснює стеження за переміщенням сонця на основі його координат у небесному просторі, що задаються керуючому сигналом. На рис. 3.3 показана модель системи орієнтації СЕС, розроблена в системі Simulink. У моделювання було прийнято наступне значення параметрів кінематики електроприводу: люфт – 1 хв.; жорсткість з'єднання – 10^{10} нм/рад; коефіцієнт дисипативних втрат у вузлі нежорсткого кріплення рами – 10 нмсек /рад; момент інерції панелі – 600 кг-м^2 .

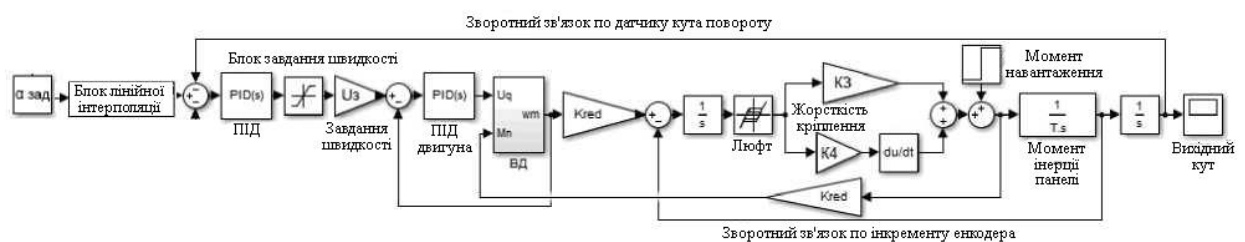


Рисунок 3.3 – Модель системи стеження.

Необхідна точність наведення пристрою сонячної батареї та зниження споживання електроенергії в покроковому режимі роботи електроприводу, що стежить, досягається за допомогою відповідного вибору параметрів датчиків положення і швидкості [16]. Як датчики положення та швидкості в системі орієнтації були обрані ізодромні регулятори. Налаштування регуляторів виконані за допомогою СН-методу та модифікованого методу Циглера-Нікольса.

В автономних системах орієнтації СЕС найбільше придатними для обмеження споживання електроенергії є вентильний двигун. Параметри цього двигуна були розраховані раніше. Для даного типу електродвигунів конструктивно можна досягти малого споживання електроенергії за однакових умов експлуатації. Вентильний двигун потужністю 120 Вт, при передатному відношенні редуктора рівному 21000, забезпечує розрахунковий статичний крутний момент рівний 16 000 Нм. Дане рішення, хоч і забезпечує прийнятне споживання електроенергії, зменшує жорсткість кінематичних вузлів електроприводу, що стежить, викликано це малим розміром двигуна, на валу якого встановлено великих розмірів редуктор. Для того, щоб знизити вплив люфту на точність орієнтації, було обрано спеціально розроблений хвильовий редуктор для СЕС.

Для спрощення математичного опису ВД використовується система координат dq жорстко пов'язана з ротором, при цьому вісь d поєднується з напрямком магнітного поля ротора [17]. У цьому випадку операторні рівняння, якими описуються електромагнітні та електромеханічні процеси у ВД мають вигляд:

$$U_d = R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q;$$

$$U_q = R(T_q s + 1)i_q - \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega;$$

$$M = p \frac{m}{2} (\psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q);$$
(3.1)

$$s\omega_m = \frac{1}{J} (M - M_H);$$

$$s\theta_m = \omega_m;$$

$$\omega = p\omega_m.$$

У (3.1) U_d, U_q, i_d, i_q – проекції напруги та струму статора на осі:

$$T_d = \frac{L_d}{R},$$

$$T_q = \frac{L_q}{R},$$

де L_d, L_q – постійні часу та індуктивність обмотки статора по поздовжній та поперечній осях;

R – Опір статорної обмотки;

ω_m – механічна кутова швидкість;

M – електромагнітний момент;

M_H – момент навантаження;

m – механічний кут повороту валу;

J – момент інерції ротора.

За математичним описом вентильного двигуна та розрахованими параметрами в попередньому розділі складено модель, що використовується в електроприводі СЕС у середовищі MATLAB, показана на рис. 3.4. Особливістю даної моделі є її універсальність, маючи основні параметри двигуна, можна провести його моделювання.

3.3 Результати моделювання системи стеження

На рис. 3.5 та рис. 3,6 представлені графіки залежності помилки орієнтації та швидкості обертання електродвигуна за зміни жорсткості конструкції рами сонячних батарей. Виникаюча коливальність системи призводить до появи розсинхронізації швидкості повороту осі електроприводу, що стежить, і швидкості спостереження за сонцем по небосхилу [18]. Можна помітити, що амплітуда коливань помилки орієнтації не змінюється збільшенням жорсткості конструкції, у той час як амплітуда коливань швидкості зменшується, отже, це веде до зменшення споживання електроенергії двигуном в режимі стеження, що встановився.

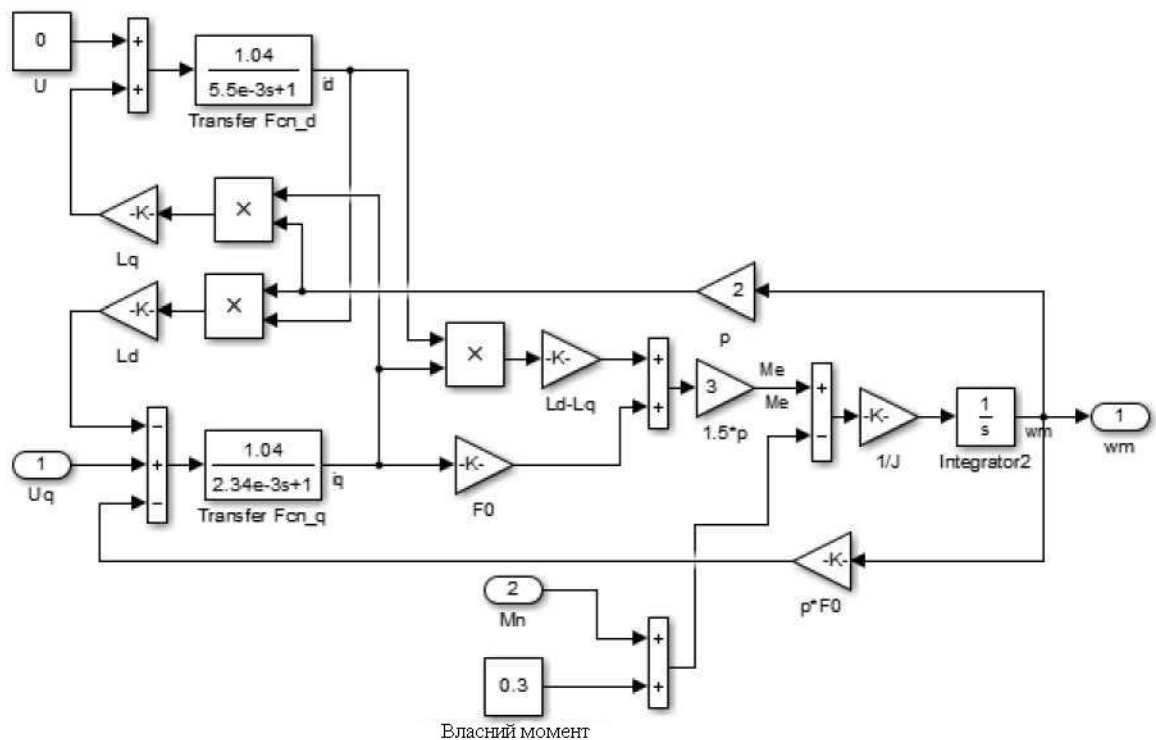


Рисунок 3.4 – Модель вентиального двигуна потужністю 120 Вт

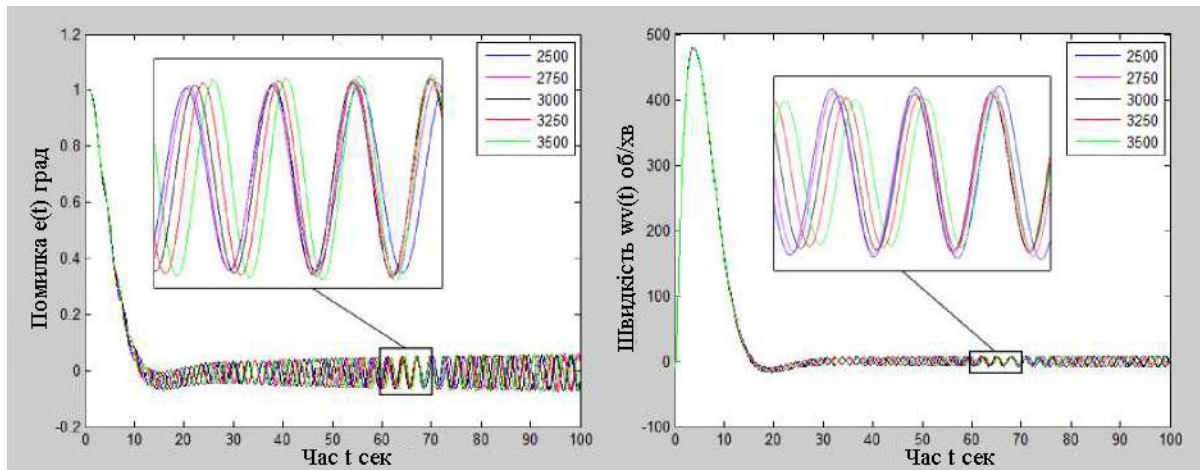


Рисунок 3.5 – Залежність помилок позиціонування та швидкості при різних жорсткості конструкції

Момент навантаження на вихідному валу електроприводу, що стежить, є ще одним фактором, що впливає на точність орієнтації. На рис. 3.7 та рис. 3.8 представлені графіки залежності динамічної помилки наведення та помилки швидкості обертання електродвигуна від моменту вітрового навантаження [19, 20].

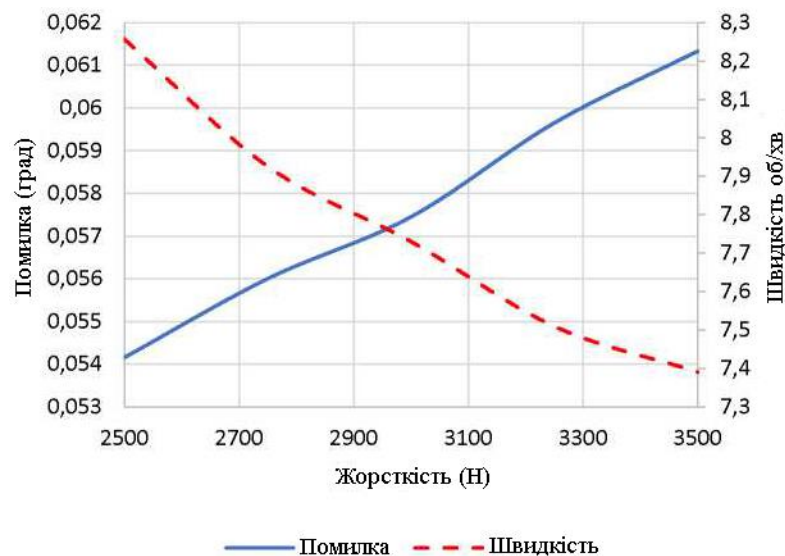


Рисунок 3.6 – Залежність амплітуди помилок позиціонування та швидкості при різних жорсткості конструкції

З графіка випливає, що амплітуда коливань в режимі, що встановився, зростає зі збільшенням вітрового навантаження практично лінійним чином.

Для того щоб знизити вплив навантаження на валу електроприводу, що слідує, на точність орієнтації СЕС слід використовувати класичний ізодромний регулятор швидкості і положення, що забезпечує астатизм другого порядку контурів регулювання швидкості і положення. Результати проведених досліджень підтверджують можливість зниження коливності системи та похибки позиціонування до прийнятних величин шляхом підбору основних коефіцієнтів ізодромних регуляторів швидкості та положення.

У момент появи сонця з обрію воно рухається з малою швидкістю по відношенню до спостерігача. Але з наближенням сонця до сходження, його кутова швидкість швидко зростає щодо спостерігача. Також потрібно враховувати, що чим нижчу пролягає орбіта наростає кутова швидкість. Так як в режимі програмного наведення для керування приводом системи, що стежить, лінійна інтерполяція при прискореному переміщенні між двома сусідніми значеннями координат небесного об'єкта формується безперервна зміна завдання швидкості і кутів положення, то динаміка його зміни може вплинути на похибку стеження.

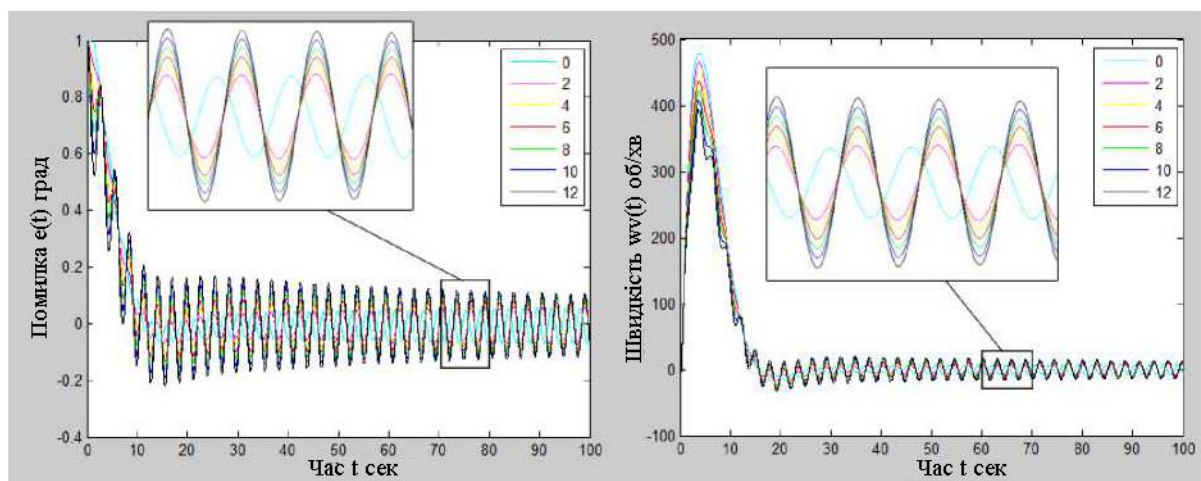


Рисунок 3.7 – Залежність помилки позиціонування та помилки швидкості двигуна за різних моментів навантаження

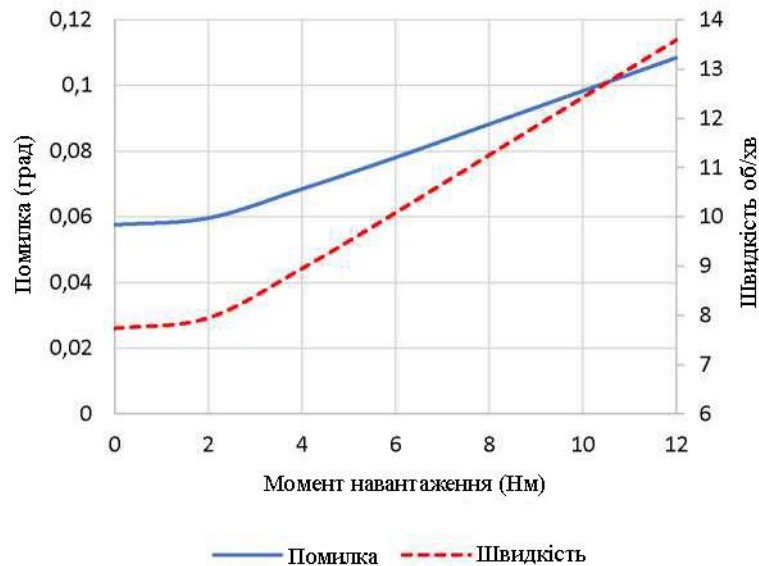


Рисунок 3.8 – Залежність амплітуди помилки позиціонування та помилки швидкості двигуна за різних моментів навантаження

У такому разі з'являється швидкісна помилка. Тому будь-який класичний ізодромний датчик не може забезпечувати нульову статичну помилку позиціонування [21]. Це призводить до появи похибки орієнтації СЕС протягом усього інтервалу часу між заданими значеннями координат, тоді система не може досягти необхідної точності стеження. Для того щоб усунути швидкісну помилку електроприводу СЕС, що слідкує, слід використовувати ПД-регулятор з подвійною інтегруючою складовою. Використання такого регулятора забезпечує астатизм контуру автоматичного регулювання навіть за умови постійної зміни швидкості. Але дослідити таку систему виявляється проблематичним навіть при моделювання. У зв'язку з цим було ухвалено рішення щодо зменшення часового інтервалу завдання координат сонця до кількох секунд. Цей спосіб дозволить зменшити помилку стеження до необхідної величини.

3.4 Висновок до розділу 3

Через мінливість орбітальної швидкості пересування сонця та вітрового навантаження виникають відхилення швидкості повороту рами сонячної

батареї від необхідної. Це призводить до появи помилки позиціонування по всьому інтервалі роботи системи. Для вирішення цієї проблеми було обрано регулятор швидкості, що забезпечує астатизм контурів регулювання положення сонячної батареї та швидкості електроприводу системи стеження.

Виникнення коливань швидкості слідкуючого електроприводу через кінцеву жорсткість вузла з'єднання рами сонячної батареї з редуктором і через наявність люфту в редукторі в режимі, що встановився, призводить до додаткового безперервних втрат електроенергії орієнтації СЕС, викликаним періодичним розгоном електродвигуна з. Коливання динаміки системи негативно впливають на енергоефективність роботи, частина електроенергії витрачається на непродуктивну роботу електроприводу СЕС. Дослідження роботи моделі показали, що за допомогою вибору необхідних коефіцієнтів регулятора, амплітуду цих коливань можна зменшити і тим самим забезпечити зниження споживання електроенергії електроприводом СЕС, що стежить.

Для забезпечення необхідної точності орієнтації СЕС необхідно збільшити жорсткість кінематики на валу електроприводу, а також конструктивно посилити жорсткість вузлів кріплення рами сонячної батареї, що дозволить знизити амплітуду та збільшити частоту коливань системи в режимі стеження. Останнє є обов'язковою умовою до динаміки електроприводу, що стежить, при зменшенні часового інтервалу оновлення значень координат сонця.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це соціально технічна дисципліна, що включає в себе: виробничу санітарію, техніку безпеки, пожежо- і вибухобезпеку, законодавство по охороні праці.

Основним законодавчим актом по охороні праці є Закон України «Про охорону праці», прийнятий Верховною Радою 14.10.1992 р., що складаються з восьми розділів:

- загальні положення;
- гарантії прав громадян на охорону праці;
- організація охорони праці;
- стимулювання охорони праці;
- державні міжгалузеві і галузеві нормативні акти про охорону праці;
- державне керування по охороні праці;
- державний нагляд і суспільний контроль над охороною праці;
- відповідальність працівників за порушення законодавства про охорону праці.

Безпечні умови праці повинні бути створені на базі сучасних досягнень науки і техніки та підвищення культури виробництва. Трудове законодавство ставить за обов'язок адміністрації підприємств проводити інструктаж і регулярне навчання робітників безпечному виконанню робіт. На підприємствах чисельністю понад 50 людей створюються служби по охороні праці, в інших випадках функції цієї служби можуть виконувати особи, які пройшли перевірку знань по охороні праці. Підвищення безпеки праці приводить до зниження травматизму, і в такий спосіб до зниження витрат на виплату компенсацій за випадки травматизму і професійних захворювань, викликаних несприятливими умовами праці. Важливе місце в поліпшенні умов праці займає санітарно-гігієнічний благоустрій промислових підприємств.

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів, характерних при роботі електричного двигуна

Небезпечним виробничим фактором називається такий виробничий фактор, вплив якого на працюючого, у певних умовах приведе до травми або до іншого раптового погіршення здоров'я.

Шкідливим виробничим фактором називається такий виробничий фактор, вплив якого на працюючого, у певних умовах, приводить до захворювання і зниження працездатності.

Нещасний випадок – це випадок впливу на людину шкідливого виробничого фактору.

Професійне захворювання – це випадок впливу на людину шкідливого виробничого фактору.

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів має на меті обґрунтувати конструктивні зміни в обладнанні, пристосуваннях, інструменті на робочому місці, удосконалювання організаційних і захисних заходів.

Найголовнішим небезпечним виробничим фактором, характерним як для всіх електроустановок, так і для електроприводів зокрема, незалежно від потужності і живлячої напруги, є ураження електричним струмом. Із загального числа нещасних випадків зі смертельним результатом основне місце займають нещасні випадки, що відбуваються в результаті ураження електричним струмом. Тому питанням електробезпеки необхідно приділяти велику увагу.

Основними причинами ураження електричним струмом при роботі електродвигуна є:

- випадковий дотик або наближення до струмоведучих частин, перебувають під напругою;
- поява напруги на металевих конструктивних частинах двигуна – корпусі, валу і т.д.;

– поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, внаслідок помилкового включення двигуна.

Проходячи через організм, електричний струм виконує термічну, електролітичну і біологічну дії. Все це різноманіття дій електричного струму приводить до двох видів ураження: електричним травмам і електричним ударам.

Електричні травми – це чітко виражені місцеві ушкодження тканин організму, викликані впливом електричного струму і електричної дуги. Розрізняють наступні види електричних травм: електричний опік, електричні знаки, металізація шкіри і механічні ушкодження.

Електричний удар – це порушення живих тканин організму електричним струмом, що проходить через нього і супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів.

При роботі електродвигуна виникає електромагнітне поле (ЕМП), що не виявляється органами почуттів людини.

Ступінь впливу ЕМП на організм людини залежить від напруженості електричного і магнітного полів, щільності потоку енергії, тривалості впливу, частоти коливань, індивідуальних особливостей організму. Найпоширенішим засобом захисту від впливу ЕМП є екрани. Для зниження щільності потоку енергії використовують спеціальні поглиначі.

До шкідливих виробничих факторів, характерних для електродвигунів, відносяться шум і вібрація. Питання боротьби із шумом і вібрації мають велике значення у всіх областях механіки, особливо в машинобудуванні, на транспорті та в енергетиці.

В результаті дослідження із впливу шуму на організм людини встановлено, що в умовах шуму значно вповільнюється реакція, послабляється увага, швидко настає втома. Ступінь шкідливого впливу шуму враховується при нормуванні, головним чином залежить від рівнів звукового тиску, частотного спектру шуму і тривалості впливу. Основні напрямки робіт зі зниження шуму: зниження шуму джерел, ослаблення

коливальної енергії.

За результатами аналізу вібрації було відзначено, що при цьому порушуються функції центральної нервової і серцево-судинної систем, опорно-рухового апарата. Тривалий вплив вібрацій приводить до розвитку, так званої вібраційної хвороби, що може привести до часткової або повної втрати працездатності. Загальну вібрацію, що впливає на людину, можна знизити зменшенням рівня вібрації джерел, за рахунок зрівноважування обертових або мас, що рухаються. Застосовують також віброізоляцію джерела робочого місця.

4.2 Розрахунки захисного заземлення для проведення експериментів в лабораторії

Метою розрахунків захисного заземлення є знаходження заземлюючого пристрою з такими параметрами, щоб його опір розтікання був менше або дорівнював припустимому значенню.

Заземлюючий пристрій – це сукупність заземлювача – металевих привідників, що перебувають у безпосередньому контакті із землею.

Нижче приведено приклад розрахунку заземлюючого пристрою для електроустановки з номінальною напругою 220В.

Найбільш припустимий опір заземлюючого пристрою для електроустановки з напругою до 1000В $R_d = 4 \text{ Ом}$.

Питомий електричний опір ґрунту, у випадку наприклад для глини, $\rho = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Вибираємо трубчастий або стрижневий заземлювач, з розмірами:

- довжина труби $L = 2,5 \text{ м}$;
- зовнішній діаметр $d = 0,07 \text{ м}$;
- глибина закладання труби, рівна відстані від поверхні землі до середини труби $t = 2,05 \text{ м}$;
- глибина закладання труби від поверхні землі $t_0 = 0,8 \text{ м}$.

Визначимо опір розтікання одного заземлювача:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{d}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4t + L}{4t - L}\right),$$

$$R_1 = \frac{60}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.5} \ln\left(\frac{2 \cdot 2.5}{0.07}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4 \cdot 2.05 + 2.5}{4 \cdot 2.05 - 2.5}\right) = 17.5 \text{ Ом.}$$

Оскільки опір заземлювача більше припустимого опору заземлюючого пристрою ($R_1 > R_D$), то необхідно застосувати декілька заземлювачів з'єднаних паралельно.

Необхідне число паралельно з'єднаних заземлювачів розраховується за формулою:

$$n' = \frac{R_1}{\eta_B \eta_D} = \frac{17.5}{4 \cdot 1} \approx 4 \text{ шт.}$$

де $\eta_B = 1$ — коефіцієнт використання заземлювачів, що враховує їхній взаємний вплив.

Фактичний коефіцієнт використання заземлювачів $\eta_\phi = 0.78$, при розміщенні заземлювачів по контуру і відстані між ними, рівному $a = 2L$.

Визначаємо фактичний опір вертикальних заземлювачів:

$$R_{B\phi} = \frac{R_1}{\eta_B \eta_\phi} = \frac{17.5}{4 \cdot 0.78} = 5.6 \text{ Ом.}$$

Для зв'язку вертикальних електродів і в якості самостійного горизонтального електрода використовуємо сталь круглого перерізу діаметром $d = 0.01$ м.

Довжина смуги визначається за наступною формулою:

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 5 \cdot 4 = 21 \text{ м.}$$

Глибину закладання смуги приймаємо рівній глибині закладання труби від поверхні $t=t_0=0,8$ м.

Опір розтікання сполучної смуги визначаємо за формулою:

$$R_{1\Pi} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{L^2}{d \cdot t}\right) = \frac{60}{2\pi 21} \ln\left(\frac{21^2}{0,01 \cdot 0,8}\right) = 4,97 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт використання смуги $\eta_r = 0,55$.

Опір сполучної смуги визначаємо за формулою:

$$R_{\Pi} = \frac{R_{1\Pi}}{\eta_r} = \frac{4,97}{0,55} = 9,04 \text{ Ом.}$$

Фактичний опір заземлюючого пристрою, що складається з вертикального заземлювача і сполучної смуги, визначається як еквівалентний опір при паралельному з'єднанні:

$$R_E = \frac{R_{B\Phi} \cdot R_{\Pi}}{R_{B\Phi} + R_{\Pi}} = \frac{5,6 \cdot 9,04}{5,6 + 9,04} = 3,46 \text{ Ом.}$$

В результаті ми отримали заземлюючий пристрій, що задовольняє умові $R_E \leq R_d$ ($3,46 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$).

4.3 Розробка заходів щодо забезпечення електробезпеки під час проведення експериментів з електричним двигуном в лабораторії

При розробці та тестуванні електричного двигуна завжди існує

небезпека випадкового дотику до струмоведучих частин, тому слід дотримуватись правил техніки безпеки в лабораторії.

Застосування ізолюваних проводів вже забезпечує достатній рівень захисту від напруги при дотику до них. Живлення до електродвигуна має підводитись спеціальним кабелем з міцною ізоляцією, кабель повинен проходити у недоступному місці або в кожусі, щоб виключити його пошкодження.

Для запобігання замикання на землю і інших пошкоджень ізоляції, при яких виникає небезпека ураження електричним струмом і виходу двигуна з ладу необхідно проводити профілактичні випробування і контроль опору ізоляції. При експлуатаційному контролі ізоляції проводиться вимір опору ізоляції при прийманні двигуна, після монтажу, періодично в строки або при виявленні дефектів.

Захисне відключення забезпечує автоматичне відключення установки при виникненні в ній небезпеки поразки електричним струмом. Захисне відключення буде здійснюватися при замиканні на землю і при несправностях пристрою захисного відключення.

Захисними засобами є:

- електровимірювальні кліщі і покажчики напруги;
- діелектричні гумові вироби і ізолюючі підставки;
- монтажний інструмент з ізолюваними рукоятками;
- попереджувальні вивіски («Не вмикати працюють люди»), які вивішуються на відключених рубильниках для запобігання включенню установки.

Для забезпечення електробезпеки двигуна під час проведення експериментів в лабораторії застосовуються наступні технічні захисні заходи:

- диференційне реле (захист від випадкового дотику до струмоведучих частин);
- візуальний огляд (контроль і профілактика пошкоджень ізоляції);

- металеві заземлювачі (захисне заземлення);
- захисний автомат (захисне відключення);
- застосування електрозахистного електроінструменту і запобіжних пристосувань (діелектричні рукавиці, пасатиджі, електричні запобіжники).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Keller L. and Affolter P. Optimizing the Panel Area of Photovoltaic System in Relation to Static Inverter Practical Results. // SE.-1995. - Vol. 55 № 1, P. 1-7.
2. P. Roth, A. Georgiev , H. Boudinov . Cheap two axis sun following device Energy Conversion and Management, Volume 46, Issue 7, Pages 1179-1192.
3. Т. Томсон. Discrete 2-positional tracking of solar collectors Renewable Energy, 33 (2008), pp. 400-405
4. JT Agee, A. Obok-Opok , MD Lazzer . Solar tracker technologies: market trends and field applications Advanced Materials Research, 18-19 (2007), pp. 339-344.
5. YV Pavel, HJ Gonzalez, YV Vorobiev . Optimization of solar energy collection in tracking and no-tracking PV solar system Proceedings of 1st international conference on electrical and electronics engineering, ICEEE, Acapulco, Mexico, September 8-10 (2004), pp. 310-314.
6. R. Mamlook , S. Nijmeh , SM Abdallah. Програмне забезпечення логічного контролера до контролю двох аксісів Sun Tracking System Information Technology Journal, 5 (6) (2006), pp. 1083-1087.
7. S. Gagliano , N. Savalli , G. Tina, N. Pitrone . Two-axis sun tracking system: design and simulation Eurosun 2006, Glasgow, UK, June 27-30 (2006) Tracstar . Should you install a solar tracker. [Електронний ресурс]: режим доступу - <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/> .
8. S. Abdallah, S. Nijmeh . Два axes sun tracking system with PLC control. Energy Conversion and Management, Volume 45, Issue 11, Pages 1931 – 1939.
9. Clifford MJ, Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker. Solar Energy 2004 ; 77:9 .
10. Duryea S, Syed I, Lawrence W, Automated Battery Management System для Photovoltaic Systems, International Journal of Renewable Energy

Engineering, Vol 1, No 2, Aug 1999.

11. J. Rizk , Y. Chaiko . Solar Tracking System: Більше Efficient Use of Solar Panels // World Academy of Science, Engineering and Technology 17 2008.