

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 613.313

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

 Вадим ЧУМАК

«17» 12 2022р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Електричні машини і апарати»

зі спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Магнітоелектричний двигун постійного струму з

порожнім ротором»

Виконав :
студент VI курсу, групи ЕМ-11мп
Уфимцев Максим Сергійович

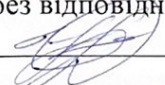
Науковий керівник:
д.т.н., професор Чумак Вадим Володимирович

Консультант з 3 розділу:
Доцент
Коваленко Михайло Анатолійович.

Рецензент:
Доцент, зав. кафедри теоретичної електротехніки
Островерхов Микола Яковлевич



Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) 

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електромеханіки

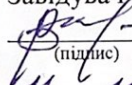
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-наукова програма «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 В.В. Чумак
(підпис) (ініціали, прізвище)

«16» 10 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Уфімцеву Максиму сергійовичу

1. Тема роботи «Магнітоелектричний двигун постійного струму з порожнистим ротором»
керівник роботи Чумак Вадим Володимирович, к.т.н., доцент
затверджені наказом по університету від « » 2022 р.
2. Строк подання студентом роботи до « » 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи: задані номінальна напруга живлення $U = 27$ В; номінальний крутний момент $M = 39,2 \cdot 10^{-3}$ Н·м, частота обертання при номінальних значеннях напруги живлення і крутного моменту $n = 6000$ об/хв, Частота обертання холостого ходу $n_0 = 8000$ об/хв, струм холостого ходу $I_0 = 1,3$ А, споживаний струм при номінальних значеннях напруги живлення і крутного моменту $I = 1,45$ А, початковий пусковий момент $\geq 392 \cdot 10^{-3}$ Н·м, Електромеханічна постійна часу $T_{EM} \geq 10 \cdot 10^{-3}$ с, зовнішній діаметр електродвигуна $D \leq 16$ мм, Кріплення електродвигуна в апаратурі споживача – за корпус, кількість вихідних кінців валу – 1.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): 1) аналіз номенклатури основних технічних параметрів використовуваних в якості вихідних даних при виконанні розрахунків; 2) визначення геометричних розмірів і співвідношень електродвигуна; 3) розрахунок магнітної системи і визначення величини магнітного потоку електродвигуна; 4) розрахунок механічних втрат у вузлах тертя і визначення моменту холостого ходу; 5) розрахунок обмотки якоря; 6) розрахунок електромеханічних параметрів електродвигуна; 7) тепловий розрахунок; 8)

зробити висновки по роботі; 9) дослідження динамічних режимів; 10) розробка стартап-проекту.

5. Перелік графічного матеріалу: плакат 1 – загальний вид електродвигуна з двома вихідними кінцями валу; плакат 2 – загальний вид електродвигуна з неявновираженою лобовою частиною обмотки якоря з одним виступаючим кінцем валу; плакат 3 – загальний вид електродвигуна з неявновираженою лобовою частиною обмотки якоря з кронштейном для розміщення підшипникової опори; плакат 4 – визначення робочої точки на діаграмі магніту.

6. Дата видачі завдання 11.10.2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз номенклатури основних технічних параметрів використовуваних в якості вихідних даних при виконанні розрахунків;	До 20.02.2022р.	
2	Визначення геометричних розмірів і співвідношень електродвигуна;	До 28.03.2022р.	
3	Розрахунок магнітної системи і визначення величини магнітного потоку електродвигуна;	До 25.04.2022р.	
4	Розрахунок механічних втрат у вузлах тертя і визначення моменту холостого ходу;	До 19.05.2022р.	
5	Розрахунок обмотки якоря;	До 15.06.2022р.	
6	Розрахунок електромеханічних параметрів електродвигуна;	До 12.07.2022р.	
7	Тепловий розрахунок;	До 19.09.2022р.	
8	Дослідження динамічних режимів	До 31.10.2022р.	
8	Зробити висновки по роботі	До 23.11.2022р.	
9	Оформлення пояснювальної записки, підготовка графічної частини	До 01.12.2022р.	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

М.С. Уфімцев

(ініціали, прізвище)

В.В. Чумак

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: сторінок – 78, рисунків – 18, таблиць – 34 та графічні матеріали на 4 плакатах. Робота присвячена теоретичному дослідженню та розрахунку магнітоелектричного двигуна постійного струму з порожнистим ротором.

В роботі здійснено аналіз номенклатури основних технічних параметрів використовуваних в якості вихідних даних при виконанні розрахунків, визначення геометричних розмірів і співвідношень електродвигуна, розраховано магнітоелектричний двигун постійного струму з порожнистим ротором.

Графічні матеріали відображають загальний вид магнітоелектричних електродвигунів та спосіб визначення робочої точки на діаграмі магніту.

ABSTRACT

The thesis contains: 78 pages, 18 figures, 34 tables and graphic materials on 4 posters. The work is devoted to the theoretical research and calculation of a DC magnetoelectric motor with a hollow rotor.

The paper analyzes the nomenclature of the main technical parameters used as input data when performing calculations, determining the geometric dimensions and proportions of the electric motor, calculates the DC magnetoelectric motor with a hollow rotor.

Graphic materials show the general view of magnetoelectric electric motors and the method of determining the operating point on the magnet diagram.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 НОМЕНКЛАТУРА ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	12
2. ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ І СПІВВІДНОШЕНЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	15
2.1. Вибір магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів	15
2.2. Вибір числа полюсів магнітної системи електродвигуна	16
2.3. Визначення основних геометричних розмірів і співвідношень магнітної системи	16
2.3.1. Вибір та визначення базового розміру магнітної системи	17
2.3.2. Визначення геометричних розмірів магнітної системи електродвигуна	18
3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ І ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	24
3.1. Структура магнітної системи, вихідні дані та прийняті допущення	24
3.2. Розрахунок конструкторських параметрів, що залежать від геометричних розмірів магнітної системи	25
3.3. Розрахунок провідності потоків розсіювання і коефіцієнту розсіювання магнітної системи	25
3.4. Розрахунок електромагнітних параметрів для побудови кривої намагнічування магнітної системи	26
3.5. Визначення робочої точки на діаграмі магніту	27
3.6. Визначення фактичних значень індукції в повітряному проміжку, в спинці магнітопроводу і величини магнітного потоку електродвигуна	27
4. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ВТРАТ В ВУЗЛАХ ТЕРТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ХОЛОСТОГО ХОДУ	29
4.1. Вихідні дані і прийняті допущення	30
4.2. Аналітичні вирази для розрахунку моменту холостого ходу та його складових. Визначення втрат холостого ходу	32
4.2.1. Складова моменту холостого ходу, обумовлена втратами в вузлах тертя (підшипникові вузли)	34

4.2.2. Складова моменту холостого ходу, що обумовлена тертям щіток у колекторі	35
4.2.3. Визначення моменту холостого ходу	35
4.2.4. Втрати холостого ходу	35
4.2.5. Побудова залежностей (при необхідності) виду	35
5. РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЯКОРЯ	36
5.1. Вихідні дані і прийняті допущення	36
5.2. Розрахунок електричних і конструктивних параметрів обмотки якоря	34
5.2.1. Визначення попередньої кількості ефективних провідників обмотки якоря	37
5.2.2. Визначення числа витків у секції виходячи з умови забезпечення заданого значення частоти обертання	38
5.2.3. Визначення числа витків секції виходячи з умови розміщення провідників обмотки в перерізі циліндра якоря	39
5.2.4. Вибір числа витків в секції і ефективного числа провідників обмотки якоря	40
5.2.5. Послідовність і порядок виконання розрахункових процедур	40
5.2.6. Розрахунок моменту інерції якоря	41
5.2.7. Розрахунок опору обмотки якоря та індуктивності обмотки якоря	43
6. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	45
6.1. Вихідні дані і прийняті допущення	45
6.2. Визначення електромеханічних параметрів	46
7. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК	47
7.1. Визначення температури нагрівання електродвигуна	47
7.2. Визначення сталої температури нагріву електродвигуна	48
8. РОЗРАХУНКИ	50
8.1. Короткий технічний опис на електродвигун	50
8.2. Технічне завдання	50
8.3. Вибір магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів (згідно з розділом 2)	52
8.4. Визначення основних геометричних розмірів і співвідношень магнітної системи (згідно з розділом 2)	52

8.5. Розрахунок магнітної системи та визначення магнітного потоку електродвигуна	53
8.6. Розрахунок механічних втрат в щітково-колекторному і підшипниковому вузлах	54
8.7. Розрахунок обмотки якоря (згідно з розділом 5)	55
8.8. Розрахунок електромеханічних параметрів (згідно з розділом 6)	56
8.9. Тепловий розрахунок і визначення температури нагріву електродвигуна (згідно з розділом 7)	56
9. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ	58
9.1. Математична модель мікродвигуна постійного струму	58
9.2. Розрахунок параметрів математичної моделі мікродвигуна постійного струму	60
9.3. Побудова моделі та моделювання режимів роботи мікродвигуна постійного струму в Simulink	63
9.3.1. Створення підсистеми та маскування моделі	64
9.3.2. Моделювання режимів роботи мікродвигуна постійного струму	67
10. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	70
10.1. Опис ідеї стартап-проекту	70
10.2. Технологічний аудит стартап-проекту	72
10.3. Аналіз ринку та можливість старту проекту	72
10.4. Фактори загрози	73
10.5. Аналіз ринку та можливість старту проекту	75
ВИСНОВОК	76
ЛІТЕРАТУРА	78

ВСТУП

У сучасному світі в умовах формування нової військової доктрини країни та зміни пріоритетів при проведенні військової реформи відбувається інтенсивне вдосконалення видів озброєння та військової техніки (далі: В та ВТ) при одночасному скороченні кількості перебувають у виробництві та експлуатації об'єктів цієї техніки Електропривод постійного струму, що містить колекторний електродвигун як виконавчий елемент, традиційно є "серцем" будь-якого автоматичного устрою військового та цивільного призначення. Мікроелектродвигуни автоматичних пристроїв, що випускаються промисловістю, часто не відповідають вимогам, що висувуються до них, зокрема, за енергетичними, масогабаритними характеристиками і швидкодією, зі збереження номінальних значень параметрів при напрацюванні, а також у процесі тривалого зберігання.

Останнім часом широке застосування в автоматичних пристроях різного виду, в тому числі спеціального призначення, отримали мікроелектродвигуни постійного струму з збудженням від постійних магнітів. Завдання їх удосконалення, у конструкторсько-технологічному сенсі, є актуальним з наступних причин:

1. Сучасні досягнення в галузі електротехнічного матеріалознавства дають можливість суттєво покращити електромеханічні характеристики двигунів при одночасному зменшенні їх габаритів та маси.

2. Збільшення терміну служби двигуна, у тому числі мінімального напрацювання на відмову та терміну зберігання в умовах штатного зберігання, дозволяє використовувати його в умовах жорстких тривалих механіко-кліматичних впливів зовнішніх факторів (далі – ВВФ).

3. Поєднання покращених динамічних якостей зі стійкістю до нагрівання в короткочасних або повторно короткочасних режими роботи визначають можливість застосування колекторного двигуна для засобів високоточних стежать систем разового використання.

4. Вищий коефіцієнт корисної дії порівняно з двигунами змінного струму дає можливість використовувати колекторний електродвигун у будь-якій апаратурі, що має обмежену потужність джерела живлення (акумулятора, генератора і т.п.) при одночасному зменшенні маси або польотної маси агрегату в цілому.

Особливе місце серед сучасних електродвигунів постійного струму займають двигуни з порожнім якорем. До їх безперечних переваг над іншими типами колекторних двигунів відносяться: низький власний момент інерції якоря, що обумовлює легкість і плавність регулювання швидкості; відсутність металевого магнітопроводу якоря, що призводить до виключення одного з суттєвих видів втрат - втрат у сталі та підвищує якість комутації; відсутність зубців на якорі, що дозволяє знизити власний момент торкання при пуску від мінімальної напруги (напруги торкання) і домогтися його незалежності від кута поворотувалу. Можливість виконати магнітоелектричне збудження як «зовнішнім» і «внутрішнім» стосовно якорю, призводить до великому розмаїттю конструкцій магнітних систем, що ставить завдання вибору оптимальної їх.

Під терміном "високовикористаний двигун" розуміється двигун постійного струму з магнітоелектричним збудженням з граничним рівнем електромагнітних та теплових навантажень, що забезпечує робочий процес у межах заданого технічного ресурсу, що володіє максимальними питомими характеристиками, такими як потужність і пусковий момент на одиницю об'єму, мінімальним енергоспоживанням та постійним часом.

Магнітоелектричний двигун постійного струму з порожнистим ротором є найбільш поширеним конструктивним типом з усієї номенклатури двигунів даного типу, що випускаються у наш час. З огляду на необхідність подальшого вдосконалення методів розрахунку обраного типу електродвигунів, проведено спеціальне теоретичне дослідження, пов'язане з особливостями розрахунку електродвигунів розглянутого конструктивного виконання.

Достовірність і справедливність результатів, які ми отримали, підтверджені експериментальними дослідженнями моделей і макетів, розроблених з урахуванням запропонованого методу розрахунку, а також даними випробувань

промислових зразків електродвигунів, наведених в [1, 2]. При цьому встановлено, що відносна похибка для основних електромагнітних і електромеханічних параметрів, що встановлюються за допомогою запропонованого методу, не перевищує 10%, що цілком прийнятно для використання в практичних розрахунках.

1. НОМЕНКЛАТУРА ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Проектування будь-якої електричної машини, як відомо, здійснюється на основі технічного завдання (ТЗ) і відповідно до чинних стандартів на конкретний вид продукції. Стосовно магнітоелектричного двигуна постійного струму з порожнистим ротором основоположним стандартом при проектуванні електродвигунів слід вважати ГОСТ РВ50726.1-94, де представлений номенклатурний ряд параметрів, які є нормованими і за якими визначається якість електродвигунів, що були випущені.

Цей ряд параметрів, найменування, умовне позначення і розмірність яких приведена в табл. 1.1, буде використовуватись в подальшому в якості вихідних даних при розрахунку електродвигунів.

Таблиця 1.1 – Номенклатурний ряд параметрів

Найменування параметру	Позначення	Розмірність
1. Номінальна напруга живлення	U	B
2. Номінальний крутний момент	M	H·m
3. Частота обертання при номінальних значеннях напруги живлення і крутного моменту	n	$c^{-1}(\frac{об}{хв})$
4. Споживаний струм при номінальних значеннях напруги живлення і крутного моменту	I	A
5. Струм холостого ходу	I ₀	A
6. Частота обертання холостого ходу	n ₀	$c^{-1}(\frac{об}{хв})$
7. Початковий пусковий момент	M _п	H·m

Окрім наведених параметрів в ряді випадків може задаватися (замість номінального крутного моменту) корисна потужність (P₂), яка пов'язана зі значеннями n і M наступними співвідношеннями:

$$P_2 = 6,15M \cdot n, \text{ Вт} - \text{якщо } n \text{ вказано в } c^{-1} \quad (1.1)$$

$$P_2 = 0,1025M \cdot n, \text{ Вт} - \text{якщо } n \text{ вказано в } \frac{об}{хв} \quad (1.2)$$

Якщо в технічному завданні не вказано значення частоти обертання холостого ходу (n_0), з тих чи інших причин, в подальших розрахунках значення n_0 може бути обрано як: $n_0 = (1,2 \div 1,3)n$. При конструюванні електродвигунів і виконанні розрахунків поряд з вказаними раніше електромеханічними параметрами у якості обов'язкової умови повинні враховуватися також експлуатаційні ф конструктивно-технічні показники, до яких відносяться габаритні розміри, електромеханічна стала часу, температура нагріву електродвигуна і його складових частин, маса, а також значення зовнішніх факторів, що впливають (температурний діапазон, вібраційні навантаження та ін.) при експлуатації електродвигуна в апаратурі споживача.

Слід мати на увазі, що зазначені в ТЗ значення корисної потужності (P), напруги живлення (U), частоти обертання (n) повинні відповідати значенням, встановленим на дані параметри згідно з ГОСТ 21128-83, ГОСТ 10683-73, ГОСТ 12139-84. У технічно обґрунтованих випадках допускаються відступи від вимог зазначених стандартів на дані параметри в частині чисельних значень.

На основі аналізу технічної літератури, наявних публікацій та спеціальних джерел сформульовано проблему вибору виконання у поєднанні з умовами застосування електродвигунів постійного струму в приводах спеціального та цивільного призначення стосовно сучасних тенденцій удосконалення видів та зразків нової техніки. Функціонально основні параметри силових та керованих двигунів доповнені такими характеристиками, як ресурс з напрацювання та збереження, спеціальні характеристики, умови зберігання та застосування, економічні параметри та ін.

На основі аналізу спеціальної літератури, реальних технічних завдань та перспективних проектів зроблено висновок про актуальність пошуку шляхів та дослідження способів отримання високовикористаних мікродвигунів із граничними ресурсними характеристиками. Перспективними в цьому плані є двигун постійного струму з порожнім якорем, переваги якого обумовлені відсутністю магнітопроводу, що вирішується разом з якорем. На основі аналізу наявних конструкцій найбільш повно відповідних максимальним значенням

синергетичного показника обрані перспективні типи магнітних систем (рис.1.1), що допускають застосування високоенергетичних постійних магнітів.

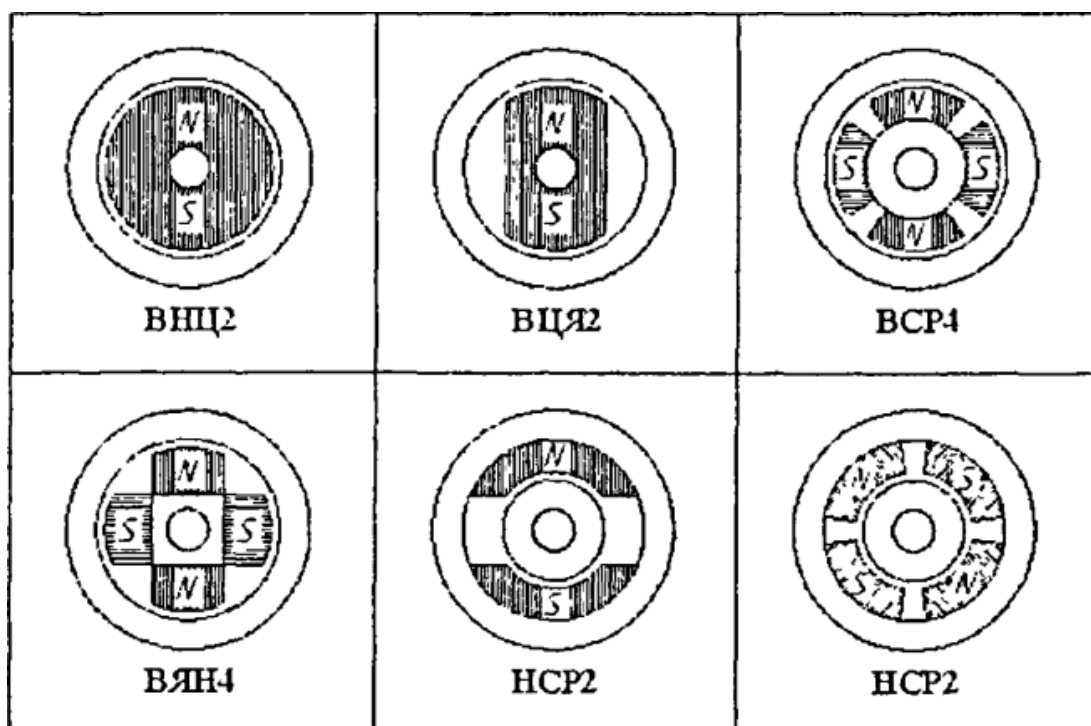


Рисунок 1.1 - Типи магнітних систем

Обґрунтовано доцільність використання сучасних програмних засобів Quick Field, ANSYS, що передбачають можливість реалізації моделей об'єкта та аналізу з застосуванням методу кінцевих елементів. Одночасно, на основі аналізу матеріалів з промислових випробувань та штатної експлуатації двигунів, сформульовано напрями оптимізації елементів щітковоколекторного вузла (ЩКУ) з метою досягнення граничних значень ресурсу з напрацювання та збереження, у тому числі в об'єкті призначення.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ І СПІВВІДНОШЕНЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1. Вибір магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів

Визначення геометричних розмірів і співвідношень, як свідчить практика проектування машин, передує етап вибору магнітом'яких і магнітотвердих матеріалів, що використовуються в конструкції машин.

Для електродвигунів даного конструктивного виконання відносно більший повітряний проміжок (δ) є характерною особливістю магнітної системи, сумірний з товщиною обмотки якоря (δ_0). У зв'язку з цим є доцільним і технічно обґрунтованим застосування високоенергетичних і висококоерцитивних магнітів на основі композицій NdFeB і S_mC_0 .

Магнітні характеристики і номенклатура магнітотвердих композицій, що рекомендовані до використання в даний час в мікромініатюрних безконтактних електродвигунах розглянутого конструктивного виконання приведена у табл. 2.1.

Рекомендуються до застосування в якості магнітом'яких сталей, що використовуються при виготовленні магнітопроводів (корпусів) електродвигунів, конструкційні низьковуглецеві сталі марок 05, 08, 10, 15, 20 по ГОСТ 1050-88, які поставляються у вигляді трубок і прутків необхідного діаметра, або високоякісні корозійностійкі сплави марок 36КНМ, 16Х, 49КФ, 27КХ, які поставляються у вигляді прутків необхідного діаметра по ГОСТ 10160-75.

Низьковуглецевих конструкційних сталей зазначених марок, у випадку необхідності застосування, їх застосування, як обов'язкову умову, повинно бути забезпечено гальванічне корозієстійке покриття магнітопроводів (корпусів) та їх елементів.

Таблиця 2.1 – Номенклатура і магнітні характеристики магнітотвердих композицій

Марка композиції	Магнітні характеристики			Примітки
	B_r , Тл	H_{CB} , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	
КС25ДЦ-240 Гост 21559-76	1,1	780	240	Марка містить у якості основних компонентів C_0 і S_m
ТУ-586250-86	1,2	850	280	NdFeB як основа композиції
E-28	1,0	640	200	NdFeB як основа композиції
E30	1,1	960	240	
E33	1,15	1140	256	
E38	1,2	960	288	
E42	1,28	500	320	

2.2. Вибір числа полюсів магнітної системи електродвигуна

Число полюсів магнітної системи, для електродвигунів розглянутого діапазону потужності, приймається рівним $2p = 2$. З практикою виробництва аналогічних магнітоелектричних двигунів постійного струму вітчизняними та зарубіжними виробниками дане положення добре узгоджується.

2.3. Визначення основних геометричних розмірів і співвідношень магнітної системи

Розрахунок згідно з класичною методологією будь-якої електричної машини постійного струму, як відомо, починається з визначення головних розмірів - довжини якоря (ротора) і діаметру, що є базою для і розрахунку на основі встановлених розмірів електромеханічних параметрів.

Стосовно до електродвигунів розглянутого типу, які є вбудованими виробами по суті, габаритні розміри, як правило, встановлюються замовником або споживачем і відповідно до технічного завдання на розробку електродвигуна вважаються заданими. На підставі цих габаритних розмірів в ході розробки

конструкторської документації і конструювання обираються основні співвідношення і геометричні розміри активної частини електродвигуна, що потім використовуються в електромеханічних і електромагнітних розрахунках.

Якщо габаритні розміри електродвигуна замовником або споживачем не визначені, в таких випадках їх знаходження може бути встановлене за допомогою методів, що зазначені в [1-2].

Розрахунок при цьому виконується в наступній послідовності.

2.3.1. Визначення базового розміру та вибір магнітної системи

Оскільки характерною ознакою магнітної системи даного типу електродвигунів є магнітом'яке зовнішнє ярмо (магнітопровід), циліндричний магніт і порожнистий якір з обмоткою з ізольованого приводу, який розташований у внутрішній порожнині якоря, то слід розглядати зовнішній діаметр магніту D_m в якості базового розміру магнітної системи, оскільки:

- джерелом е.р.с. електродвигуна є постійний магніт;
- середня величина силової лінії магніту (hm) визначається величиною D_m , а, отже, і робоча величина повітряного зазору (δ) і залежних від нього параметрів магнітного потоку ($\Phi\delta$), індукції в повітряному зазорі ($B\delta$), індукції в тілі магнітопроводу (Bc), товщини магнітопроводу (hc) та ін.

Зробивши відповідні перетворення, якщо скористуємось рівнянням максимальної електромагнітної потужності, що наведено в [3], то отримаємо:

$$D_m = 2.86 \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_{EM(max)} \cdot \lambda}{\beta_0 \cdot (1-k_0^2) n_0^2} \right)^{1/3}, \text{ м}, \quad (2.1)$$

де значення $P_{EM(max)}$, λ , k_0 приймаються відповідно до даних табл. 2.1, $n_0(c^{-1})$ - відповідно до даних вказаних у ТЗ (табл. 1.1), електромагнітна постійна β_0 - відповідно до даних у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Значення параметрів $P_{EM(max)}$, λ , k_0

Найменування, позначення параметру та розмірність	Значення параметру
Розрахункове значення максимальної електромагнітної потужності, $P_{EM(max)}$, Вт	$P_{EM(max)} = K_{EM} \cdot P_2$, де $K_{EM} = 1,5 \div 2$; P_2 – корисна потужність, встановлена відповідно до (1.1) – (1.2) або вказана в ТЗ
Відношення зовнішнього діаметру магніту до його аксіальної довжини	$\lambda = 0,45 \div 0,75$
Відношення діаметру отвору магніту до зовнішнього діаметру	$k_0 = 0,25 \div 0,45$

Таблиця 2.2 – Значення електромагнітної сталі

Значення $P_{EM(max)}$, Вт	Значення $\beta_0 \cdot 10^6, \frac{B\delta^2}{m^2}$
0,1 ÷ 1,0	0,6 ÷ 0,8
1,0 ÷ 2,5	0,8 ÷ 1,2
2,5 ÷ 7,5	1,2 ÷ 2,4
7,5 ÷ 15	2,4 ÷ 3,2
15 ÷ 30	3,2 ÷ 6,5

2.3.2. Визначення геометричних розмірів магнітної системи електродвигуна

По знайденому значенням D_m визначаються інші розміри магнітної системи електродвигуна. Найменування, розмірність, аналітичний вираз по визначенню розміру і умовне позначення наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок геометричних розмірів магнітної системи електродвигуна

Найменування розміру	Розмірність	Позначення	Формула розрахунку
1. Аксіальна довжина магніту	м	L_m	$L_m = \frac{D_m}{\lambda}$
2. Середня довжина силової лінії магніту	м	h_m	$h_m = 0.762D_m (1 + 308k_0)$
3. Величина повітряного проміжку між магнітом та корпусом (магнітопроводом)	м	δ	$\delta = (0.075 \div 0.1)h_m$
4. Аксіальна довжина магнітопроводу	м	L_A	$L_A = (1.2 \div 1.3)L_m$
5. Товщина спинки магнітопроводу	м	h_c	$h_c = 0.3 \cdot \frac{\pi D_m}{4p} \frac{L_m}{L_A}$
6. Внутрішній діаметр магнітопроводу	м	D_A	$D_m + 2\delta$
7. Зовнішній діаметр корпусу (магнітопроводу)	м	D	$D = D_A + 2h_c$

Другий габаритний розмір електродвигуна аксіальної довжини встановлюється за результатами визначення L_A і L_m з урахуванням технологічно-конструкторського опрацювання питань розміщення таких вузлів і елементів конструкції як колектор, якір, щіткотримач, монтажні плати, кришки підшипників і ін.

Подальше розрахункове технологічно-конструкторське опрацювання електродвигуна повинна включати:

- приведення розрахункових розмірів магніту (D_m , d_m , L_m) відповідно до нормалізованого ГОСТ 24936-89;

- приведення обраних або розрахункових конструктивно лінійних розмірів двигуна в цілому (L) і магнітної системи (D_m , D_A , L_A) відповідно до нормалізованого ГОСТ 6636-69;
- приведення у відповідність з ГОСТ 12126-86 розрахункового розміру D .

Після виконання перелічених процедур можна вважати завершеним вибір основних розмірів електродвигуна. Надалі можна приступити до розробки креслення загального вигляду, формування конструкції електродвигуна і виконання подальших розрахунків.

При розробці конструкції електродвигуна може бути обрано одне з можливих виконань в якості основи, зображених на рис. 2.1-2.3.

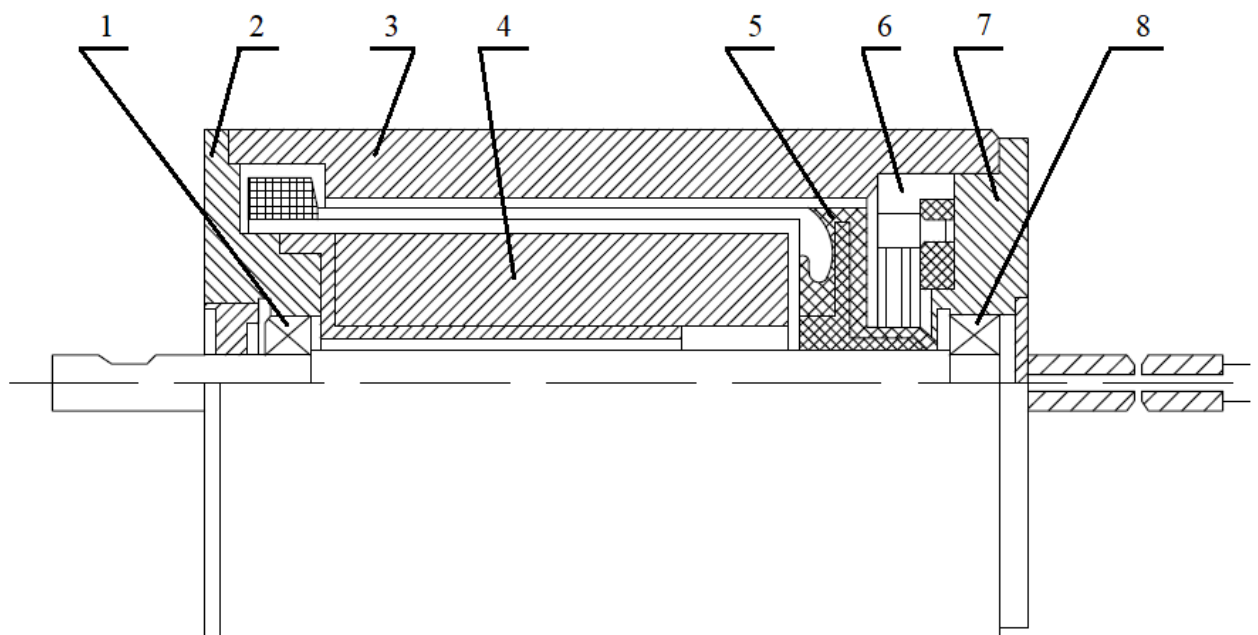


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд електродвигуна: 1-підшипник, 2-щит підшипниковий, 3-корпус (магнітопровід), 4-магніт, 5-якір з колектором, 6-щіткотримач із щітками, 7-щит підшипниковий, 8-підшипник

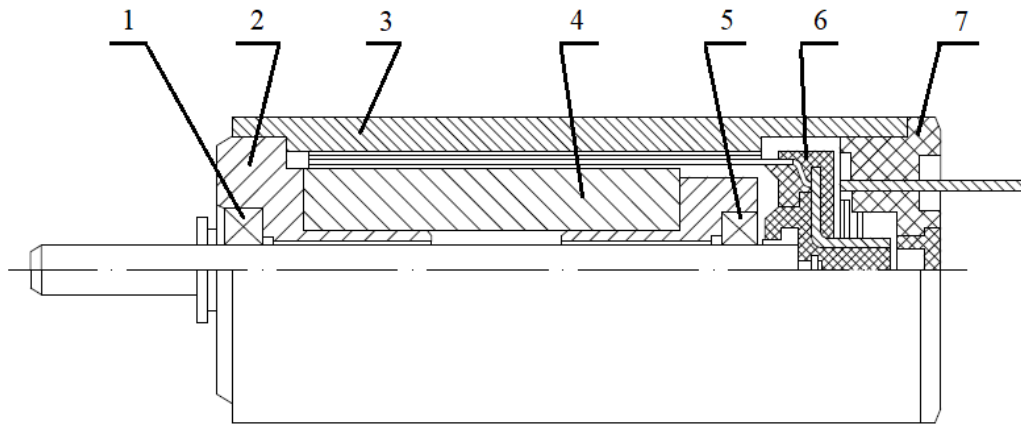


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд електродвигуна: 1-підшипник, 2-щит підшипниковий, 3-корпус, 4-магніт, 5-підшипник, 6-якір з колектором, 7- щіткотримач із щітками

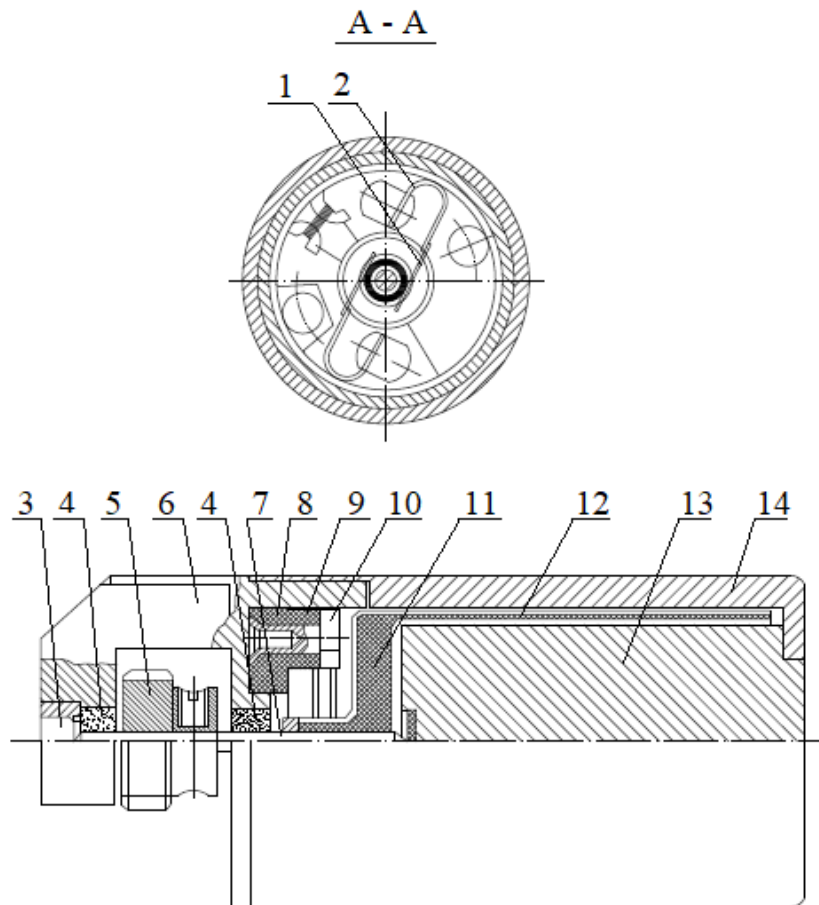


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд електродвигуна: 1-щітка, 2-пластина, 3-гвинт, 4-підшипник, 5-трібка, 6-кронштейн щіткотримача, 7-вал, 8-плата щіткотримача, 9-стійка, 10-основа щіткотримача, 11-ламелль колектора, 12-обмотка якоря, 13-магніт, 14-корпус (магнітопровід)

Конструктивно-технічна характеристика зображених виконань електродвигуна вказана в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Конструктивно-технічна характеристика виконань електродвигуна

Виконання конструкції електродвигуна	Характеристика виконань
Згідно з рис.2.1	<p>Виконання дозволяє конструкцію електродвигуна виконувати як з явновираженою, так і з неявновираженою лобовою частиною обмотки якоря. При необхідності можливе виконання двигуна з двома вихідними кінцями валу. Можливе виконання конструкції електродвигуна як з мідним колектором і вуглеграфітовою (срібнографітовою) щіткою, так і з чистометалевою щіткою і колектором з дорогоцінних металів або їх сплавів. Можливе виконання електродвигуна на підшипниках ковзання, або підшипниках кочення, або на комбінованому типі опори (підшипники кочення і підшипник ковзання).</p>
Згідно з рис.2.2	<p>Виконання дозволяє виконати конструкцію електродвигуна лише з неявновираженою лобовою частиною обмотки якоря, щітково-колекторним вузлом на основі чистометалевої щітки, відносно малим діаметром колектора (завдяки консольній установці якоря з колектором на валу) і колектором з дорогоцінних металів і їх сплавів. Можливе виконання електродвигуна на підшипниках ковзання або підшипниках кочення, або на комбінованому типі опори (підшипник кочення і підшипник ковзання). Особливість конструкції - це можливість виконання електродвигуна з одним виступаючим кінцем валу.</p>

Продовження таблиці 2.4.

Виконання конструкції електродвигуна	Характеристика виконань
Згідно з рис.2.3	<p>Особливість конструкції, в порівнянні з конструкцією, представленої на рис. 2.2, є:</p> <ul style="list-style-type: none"> • можливість без внутрішнього отвору використання магніту; • наявність, для розміщення підшипникової опори, своєрідного кронштейна; • можливість, для зняття потужності в механічному редукторі або іншому механізмі споживача, розміщення на валу зубчастого колеса (трибки); • можливість в опорах практично без осьового люфту центрування валу електродвигуна.

3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ І ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

3.1. Структура магнітної системи, вихідні дані та прийняті допущення

При розрахунку прийняті наступні вихідні дані та припущення в якості основи:

- відповідно до вибраного конструктивним виконанням електродвигуна (рис 2.1-2.3) приймається структура магнітної системи;
- використовуються розрахункові розміри магнітної системи в якості чисельних значень геометричних розмірів магнітної системи, які встановлені відповідно до п.1.2.3. і уточнені відповідно до нормалізованого ряду з ГОСТ 6636-69, ГОСТ 24936-89, ГОСТ 12126-86;
- марка магніту відповідає обраної з табл. 2.1;
- залежність $B_r = f(H_{св})$ на діаграмі магніту є лінійною;
- в якості матеріалу корпусу (магнітопроводу) використовується одна з марок сталі (сплаву), вказівки в п. 2.1;
- обираються за основними таблицями намагнічування значення напруженості магнітного поля у спинці магнітопроводу, що містяться в довідковій та нормативно-технічній літературі;
- розмірність геометричних розмірів, при розрахунку магнітної системи, задається в см з урахуванням зазначеної при розрахунку аналітичних виразах розмірності у використовуваних;
- побудова кривої намагнічування магнітної системи при знаходженні робочої точки на діаграмі магніту здійснюється графоаналітичним методом;
- при визначенні коефіцієнта розсіювання магнітів системи і потоків розсіювання магніту використовуються вирази, приведені в [3].

3.2. Розрахунок конструкторських параметрів, що залежать від геометричних розмірів магнітної системи

Дані розрахунку наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані розрахунку конструкторських параметрів

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Тиск полюсний, см	$\tau_m = \frac{\pi D_m}{2p}$
Дуга полюсна, см	$B_p = \alpha \tau_m = \frac{2\tau_m}{\pi}$
Полюсна площа поверхні, см ²	$S_m = B_p L_p$
Площа повітряного проміжку між магнітопроводом та магнітом, см ²	$S_\delta = \alpha \frac{\pi(D_m + \delta)}{2p} (L_m + 2\delta)$
Площа перерізу спинки магнітопроводу, см ²	$S_A = 0.5(D - D_A)L_A$
Середня довжина силової лінії магнітопроводу, см	$L_S = 0.785(D + D_A)$

3.3. Розрахунок провідності потоків розсіювання і коефіцієнту розсіювання магнітної системи

Дані розрахунку наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані розрахунку провідності потоків розсіювання і коефіцієнту розсіювання магнітної системи

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Провідність основного потоку розсіювання, Вб/А	$\tau_\delta = \frac{\alpha \cdot \pi(D_m + \delta)(L_m + 2\delta)}{2p\delta} \mu_0,$ де $\mu_0 = 1.25 \cdot 10^{-8}$ Гн/см

Продовження таблиці 3.2.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Провідність з торцевих поверхонь потоку розсіювання на межі розділу полюсів, Вб/А	$\lambda_{P1} = (D_m - d_v)0.26\mu_0$
Провідність з торцевих поверхонь магніту між поверхнею валу (при наявності феромагнітного валу) та полюсом (магнітом), Вб/А	$\lambda_{P2} = \frac{(D_m - d_m)}{2} 0.52\mu_0,$ де d_v – діаметр валу
Сумарна провідність торцевого розсіювання, Вб/А	$\sum \lambda = 2(\lambda_{P2} + 2\lambda_{P2})\mu_0$
Коефіцієнт розсіювання магнітної системи	$\sigma = 1 + \frac{\sum \lambda}{\lambda_\delta}$

3.4. Розрахунок електромагнітних параметрів для побудови кривої намагнічування магнітної системи

Дані розрахунку наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Дані, для побудови кривої намагнічування магнітної системи, розрахунку електромагнітних параметрів

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Індукція у повітряному зазорі, Тл	$B_\delta = \frac{B_m S_m}{\sigma S_\delta},$ де B_m – індукція в тілі магніту
М.р.с. повітряного зазору, А	$F_\delta = 1.6B_\delta\delta \cdot 10^4$
Індукція у спинці магнітопроводу, Тл	$B_C = B_\delta \frac{S_\delta}{2S_A}$

Продовження таблиці 3.3.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
М.р.с. магнітопроводу, А	$F_C = H_C L_S$, де H_C – напруженість магнітного поля у тілі магнітопроводу
Сумарна м.р.с. приведена до силової лінії магніту, А/см	$F_m = \frac{F_\delta + F_C}{h_m}$

3.5. Визначення робочої точки на діаграмі магніту

Визначення на діаграмі робочої точки магніту проводиться з урахуванням наступних положень:

- крива розмагнічування магнітної композиції обраної відповідно до таблиці 2 марки магніту прийнята в якості вихідної кривої розмагнічування магніту, яка в загальному вигляді представлена на рис. 3.1;
- згідно з даними табл. 3.4 проводиться розрахунок кривої намагнічування магнітної системи для трьох значень індукції B_{mi} у тілі магніту.

На графіку рис. 3.1 за значеннями параметрів, наведених в табл. 3.4, будується крива намагнічування магнітної системи виду $F_m = f(B_{mi})$, перетин якої з кривою розмагнічування магніту з координатами B_{m0} , H_{m0} визначає положення робочої точки на діаграмі магніту (точка М).

3.6. Визначення фактичних значень індукції в повітряному проміжку, в спинці магнітопроводу і величини магнітного потоку електродвигуна

Використовуючи дані табл. 3.4, за обчисленому значенню B_{m0} легко визначити індукцію насичення спинки магнітопроводу (B_{C0}), а також встановити фактичне значення індукції в повітряному проміжку ($B_{\delta 0}$).

Встановлюються значення магнітного потоку магнітної системи електродвигуна за визначеному значенню $B_{\delta 0}$:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta 0} \cdot S_{\delta} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб} \quad (3.1)$$

Таблиця 3.4 – Дані для розрахунку магнітної системи постійних магнітів

Позначення параметру та розмірність	Значення параметру у фіксованих точках на кривій розмагнічування магніту		
	$B_{m(1)} = 0.5B_r$, Тл	$B_{m(2)} = 0.75B_r$, Тл	$B_{m(3)} = 0.9B_r$, Тл
B_{δ} , Тл			
F_{δ} , А			
B_c , Тл			
F_c , А			
F_m , А/см			

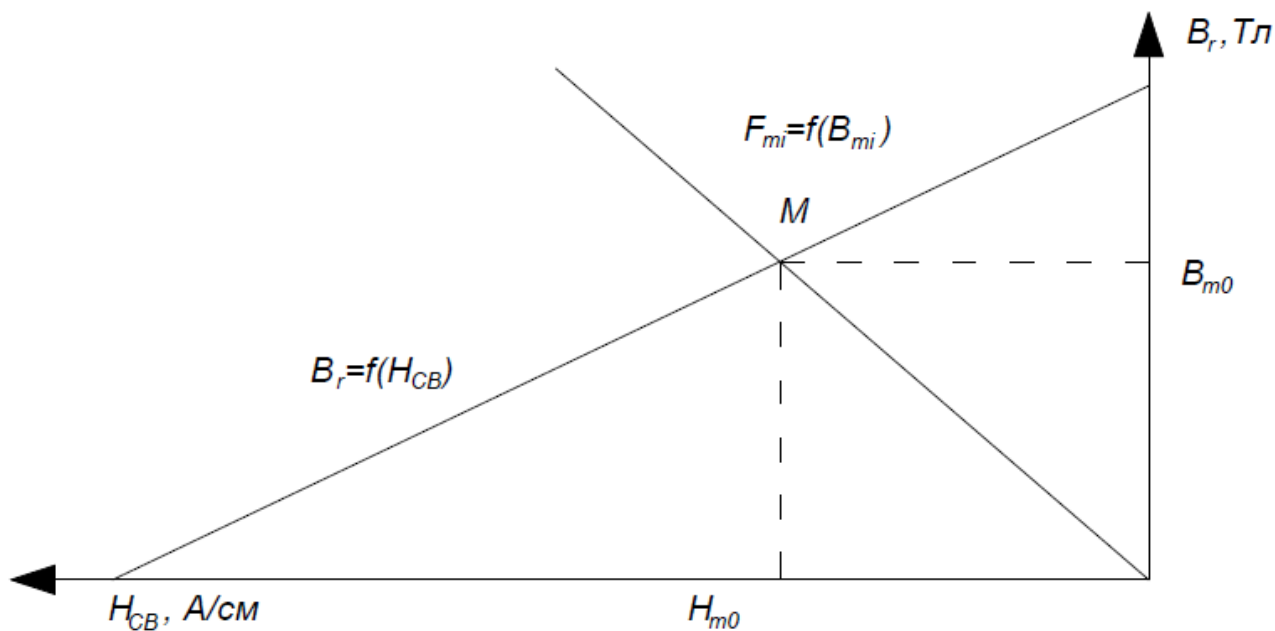


Рисунок 3.1 – Визначення робочої точки (B_{m0} , H_{m0}) на діаграмі магніту

4. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ВТРАТ В ВУЗЛАХ ТЕРТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ХОЛОСТОГО ХОДУ

Розрахунок втрат механічних в вузлах тертя і подальше визначення моменту холостого ходу здійснюється за результатами технологічно-конструкторського опрацювання питань конструкції електродвигуна, в ході якого проводиться вибір і пошук технічного раціонального рішення щодо встановлення конструкції підшипникового і щітково-колекторного вузлів відповідно заданим умовам експлуатації електродвигуна. При цьому реалізація і пошук зазначених рішень повинні бути спрямовані на мінімізацію складових холостого ходу і його моменту (M_0).

Цій умові найбільш повно задовольняють наступні рішення:

- використання колектора і чистометалевої щітки з низьковольтних срібнографітових щіток у поєднанні з мідним колектором або дорогоцінних металів і їх сплавів, які мають гальванопокриття на основі паладію;
- використання прецизійних підшипників кочення або прецизійних підшипників ковзання з бронзи високопористої, просочених приладовими рідкими мастилами.

У разі використання колектора і чистометалевої щітки з дорогоцінних металів та їх сплавів, що є виправданою необхідністю при низьких значеннях напруги живлення електродвигуна забезпечення малих контактних натискань щітки на колектор, доцільними являються наступні технічні рішення:

- виконання мікрорельєфу поверхні колектора, який контактує, відповідно до рекомендацій, представленими [4];
- виконання пари «щітка-колектор» на основі сплавів ЗлХ-2.8, ЗлМ800, СрМ900, ПдСрЗлПлЦнМ в поєднанні, зазначеному в [4];
- виконання з окремих контактних елементів конструкції щіткового вузла обраного виконання згідно [4];

- встановлення кількості контактних елементів (m) і ширини контактного елемента щітки (a) відповідно до [5] виходячи з величини допустимої щільності струму під щіткою (j_A);
- використання згідно [5] з високими діелектричними властивостями мастил пластичних, які змінюють характер тертя в зоні контакту, зменшують коефіцієнт тертя і підвищують його стабільність, а також забезпечують захист зони контактування від впливу вологості і агресивних середовищ.

У разі використання срібнографітових (вуглеграфітових) щіток в поєднанні з мідним колектором і нанесеним гальванопокриттям з паладію технічно обґрунтовано є застосування стрічкового (зі спіральною пружиною) або куркового типу щіткотримача в поєднанні, згідно з технічними умовами ТУ16-538.373-2003, зі щіткою марок СГН88, СГІ2, СГІ1.

Викладені раніше міркування дозволяють більш повно сформулювати вихідні дані, прийняті допущення і аналітичну схему розрахунку.

4.1. Вихідні дані і прийняті допущення:

- відповідно до нормальних кліматичних умов проводяться розрахунки;
- механічні втрати в вузлах тертя включають в себе дві складові втрати від тертя підшипникових опор і втрати від тертя щіток об колектор; з огляду на їх мізерно малу величину в розрахунок втрати від тертя поверхонь якоря об повітря (вентиляційні втрати) не приймаються;
- використовуються радіальні однорядні підшипники кочення з класу мініатюрних прецизійних підшипників в якості підшипникових опор, основні технічні дані надані в табл. 4.1, або прецизійні підшипники ковзання з високопористої бронзи з готовим каліброваним отвором діаметра d (в мм) ряду 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0.
- враховуються тільки реакції опор від маси якоря з валом в розрахунок, не враховується зусилля реакції опор від радіального натискання елементів приводу на вихідний кінець валу;

- по центру відстані між підшипниковими опорами розташована точка докладання зусиль від маси якоря з валом;
- на підставі експериментальних даних технологічний коефіцієнт (K_{Π}), який враховує збільшення моменту тертя в підшипникових опорах через вплив магнітного потоку розсіювання магніту на обертові елементи підшипникової опори (кульки, вал), приймається в межах $K_{\Pi} = 1,25 - 2,5$;
- ширина контактного елемента (α) і кількість контактних елементів чистометалевої щітки (m) обираються з урахуванням забезпечення лінійного струму з конструктивних міркувань (струм на одиницю довжини лінії контакту), що задовольняє умові:

$$j_A = \frac{I}{\alpha \cdot m} \leq 0.2, \text{ А/мм} \quad (4.1)$$

де I – споживаний струм електродвигуна (струм, який протікає через контактну пару);

- на підставі усталеної практики зусилля натискання (F) контактного елемента чистометалевої щітки на колектор вибирається з умови:

$$F = (0,5 \div 0,8) \cdot 10^{-2} \text{ Н};$$

- зусилля натискання щітки срібнографітової на колектор визначається геометричними розмірами площі контакту поверхонь питомим тиском щітки, встановленим для розглянутих раніше марок в межах:

$$F = (4 \div 7) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$$

Таблиця 4.1 – Основні технічні дані підшипників

Тип підшипника	Позначення підшипника	Габаритні розміри		
		d, мм	D, мм	B, мм
Радіальні однорядні	1000091	1,0	4,0	1,6
	2000154	1,5	4,0	1,7
	82	2,0	5,0	2,5
	1000092	2,0	6,0	2,3
	1000083	3,0	7,0	2,0
	2000083	3,0	7,0	2,5
	1000093	3,0	8,0	3,0
	64	4,0	7,0	2,5
Радіальні однорядні із захисними шайбами	2060154	1,5	4,0	1,7
	80082	2,0	5,0	2,5
	3080092	2,0	6,0	3,0
	80063	3,0	8,0	3,5
	3080093	3,0	8,0	4,0
	60064	4,0	7,0	2,5
	80004	4,0	8,0	3,0

- для значень частоти обертання n_0 і n , зазначених в табл 1.1 з розмірністю в об / хв від підшипникового вузла (МТП) і від щітково-колекторного вузла (МТК), а також розрахункового коефіцієнта C_v проводиться розрахунок складових моменту холостого ходу;
- відповідно до методів, наведених ними в [4] для двох значень частоти обертання n_0 і n проводиться розрахунок моменту холостого ходу електродвигуна (M_0) і його складових (МТП і МТК).

4.2. Аналітичні вирази для розрахунку моменту холостого ходу та його складових. Визначення втрат холостого ходу

Необхідно визначити геометричні розміри колектора, якоря і валу, які впливають на величину цих складових, перш ніж перейти до визначення аналітичних виразів з розрахунку складових моменту холостого ходу. Для визначення зазначених розмірів в якості основи служать розміри магнітної системи електродвигуна, наведені в табл. 2.4.

Умовне позначення, найменування, аналітичний вираз щодо визначення розмірів якоря, розмірність наведені в табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Визначення розмірів якоря.

Найменування розміру	Розмірність	Позначення	Формула розрахунку
1. Внутрішній діаметр якоря	м	D_B	$D_B = D_m + 2\delta_k$
2. Зовнішній діаметр якоря	м	D_H	$D_H = D_A - 2\delta_k$
3. Товщина стінки якоря	м	δ_0	$\delta_0 = 0.5(D_H - D_B)$
4. Аксіальна довжина якоря	м	L_1	$L_1 = (1.25 \div 1.4)L_m$
5. Діаметр робочої поверхні колектору	м	d_k	$d_k = (0.25 \div 0.35) D_B$
6. Аксіальна довжина робочої поверхні колектору	м	L_k	$L_k = l_p + (1.5 \div 2.0) \text{ мм},$ де $l_p = \alpha \cdot m$

Конструктивний проміжок δ , у представленій табл. 4.2, між внутрішньою поверхнею якоря і зовнішньою поверхнею циліндра магніту, а також між зовнішньою поверхнею якоря і внутрішньою поверхнею магнітопроводу на підставі виробничо-експериментальних даних приймається рівним 0,15 - 0,2 мм.

Значення розмірів, d_k , L_1 , l_p , L_k , а також довжина валу (l_v) і діаметр валу (d_v) встановлюються остаточно в ході розробки конструкторської документації і конструювання електродвигуна. Уточнені зазначені геометричні розміри в ході технологічно-конструкторського відпрацювання електродвигуна цілком достатні для виміру маси якоря електродвигуна (G_A) за допомогою загальновідомих способів, включаючи масу валу і колектору.

Надалі розрахунок моменту втрат холостого ходу електродвигуна відбувається з урахуванням, наведених в [4], використання аналітичних виразів

4.2.1. Складова моменту холостого ходу, обумовлена втратами в вузлах тертя (підшипникові вузли)

На основі підшипників кочення для підшипникових вузлів:

$$M_{\text{ТП}} = 1,3D_0 \cdot A \cdot C_{\psi}C_vK_{\text{П}}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.2.1)$$

На основі підшипників ковзання з високопористої бронзи, які просочені рідкими приладовими мастилами, для підшипникових вузлів:

$$M_{\text{ТП}} = 0,084 \cdot |R_A|d_{\text{ц}} \cdot K_v, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.2.2)$$

У цих виразах: K_v – поправочний коефіцієнт, що враховує можливу неспіввісність підшипників ковзання та приймається рівним $1,2 \div 1,8$; $d_{\text{ц}}$ – діаметр валу в підшипнику ковзання в м; D_0 – діаметр розташування центрів шариків кочення в м; C_v та C_{ψ} – поправочні коефіцієнти, що залежать від частоти обертання та величини реакції в підшипниках кочення; A – конструктивний коефіцієнт, що залежить від реакції в підшипниковій опорі ($|R_A|$) від маси якоря (G_A).

Значення $|R_A|$, D_0 , A , C_v , C_{ψ} визначаються з виразів:

$$D_0 = 0,5(d + D), \text{ м} \quad (4.3)$$

де d і D обираються за даними табл. 4.2;

$$|R_A| = 9,85 \frac{G_A}{2}, \text{ Н} \quad (4.4)$$

$$A = |R_A| \{0,14 + \exp[-(0,3 + 5R_A)]\} \quad (4.5)$$

$$C_{\psi} = \frac{[1+\exp(-4A)]}{[1-\exp(-4A)]} \quad (4.6)$$

$$C_v = (3 \cdot 10^{-4} n^{0.5} + 0.01) \quad (4.7)$$

4.2.2. Складова моменту холостого ходу, що обумовлена тертям щіток у колекторі

Для щітко-колекторної пари з використанням срібнографітових щіток:

$$M_{TK} = \mu_1 d_K F, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.8)$$

Для щітко-колекторної пари на основі колектору з дорогоцінних металів та їх сплавів і чистометалевої щітки:

$$M_{TK} = m \cdot \mu_2 F \cdot d_K, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.9)$$

Тут μ_1 та μ_2 – коефіцієнти тертя, відповідно, складають $0,3 \div 0,35$ та $0,3 \div 0,4$; F – зусилля натиску щітки або її контактного елемента на колектор, Н; d_K – діаметр колектору в м.

4.2.3. Визначення моменту холостого ходу

$$M_0 = M_{TK} + M_{ТП}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (4.10)$$

4.2.4. Втрати холостого ходу

$$P_0 = 0.1025 n_0 M_0, \text{ Вт} \quad (4.11)$$

4.2.5. Побудова залежностей виду

$$P_0 = f(n) \text{ та } M_0 = f(n),$$

де n – поточне значення частоти обертання електродвигуна, що обирається з ряду $0,1n_0, 0,25n_0, 0,5n_0, 0,75n_0, n_0$.

5. РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Характерним для даного типу електродвигуна є застосування трисекційних розімкнутих і простих петльових обмоток [5], залитих термореактивним компаундом (для додання жорсткості якоря) і виконаних обмотувальним проводом з емалевою ізоляцією.

По конструкції якоря поділяються:

- на якорі з явновираженою лобовою частиною і прямокутною формою секції (рис. 2.1);
- на якорі з неявновираженою лобовою частиною і ромбовидної формою секції (рис. 2.2, рис. 2.3).

В [5] наведені технологічно-конструктивні особливості намотування таких якорів.

5.1. Вихідні дані і прийняті допущення

- тільки з умови максимально можливого заповнення міддю обмотки якоря проводиться розрахунок, максимально допустиме значення коефіцієнта заповнення обмотки полого якоря ізолюваним проводом при цьому (f_p) приймається:
 - 1) 0,4 - для обмоток з ромбовидної формою секції;
 - 2) 0,6 - для обмоток з прямокутною формою секції.
- в ході розрахунків по використанню обмотки в частині потокозчеплення (K_o) значення коефіцієнта приймається:
 - 1) в межах 0,9-0,95 для обмоток з прямокутною формою секції.
 - 2) в межах 0,73-0,85 для обмоток з ромбовидної формою секції;
- кількість секцій (K_s) обмотки якоря (колекторних ламелей) обирається з конструктивних міркувань з ряду: 3, 5, 7, 9, 11;
- при розрахунку електричних параметрів обмотки якоря: числа ефективних провідників (N_0), опору обмотки якоря (R), числа витків в секції (W_c), діаметра голого (d_0) і ізолюваного (d_u) провідника, при необхідності індуктивності обмотки якоря (L_{0A}) вихідними даними є

значення I , M , U , n , наведені в табл. 1.1, а також значення магнітного потоку, обчисленого згідно з п. 3.6;

- при розрахунку діаметра ізолюваного дроту (d_u) і середньої довжини піввитка обмотки (l_c) використовуються геометричні розміри магнітної системи – δ , D_m , δ_0 , L_m , уточнені і обчислені раніше в ході конструкторсько-технологічно відпрацювання електродвигуна;
- номінальне значення діаметру ізолюваного (d_u) та голого (d_0) дроту обираються з табл. 4.3.

•

Таблиця 4.3 – Номінальне значення діаметру голого та ізолюваного дроту.

d_0 , мм	d_u , мм	d_0 , мм	d_u , мм	d_0 , мм	d_u , мм
0.071	0.10	0.120	0.150	0.160	0.198
0.8	0.11	0.125	0.154	0.170	0.210
0.9	0.12	0.130	0.160	0.190	0.230
0.10	0.128	0.140	0.170	0.200	0.240
0.112	0.140	0.150	0.190	0.210	0.250

5.2. Розрахунок електричних і конструктивних параметрів обмотки якоря

Розрахунок конструктивних і електричних параметрів обмотки якоря відбувається у наступній послідовності.

5.2.1. Визначення попередньої кількості ефективних провідників обмотки якоря

$$N_i = \frac{(M + M_0)}{C_1 \cdot I}$$

де $C_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \Phi_\delta \cdot K_0 K_E$ – для простої петльової обмотки;

$C_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \Phi_\delta \cdot K_0 \cdot K_E$ – для трисекційної розімкнутої обмотки;

$K_E = 1$ – для простої петльової обмотки;

$K_E = 0,827$ – для трисекційної розімкнутої обмотки;

Розмірності параметрів, які використовуються: Φ_δ в Вб, I в А, M_0 , M в Н·м.

Знайдена попередня кількість провідників (N_i), згідно з (4.12), уточнюється (округлення з надлишком) до значення N_0 , що задовольняє умові:

$$W_{(1)} = \frac{N_0}{2K_S} = \text{ціле число},$$

де $W_{(1)}$ – число витків у секції.

Знайдені значення $W_{(1)}$ і N_0 , що визначені з умови забезпечення заданого значення (табл.1.1) споживаного струму (умова 1).

5.2.2. Визначення числа витків у секції виходячи з умови забезпечення заданого значення частоти обертання.

виходячи з умови забезпечення заданого значення частоти обертання (умова 2), для визначення числа витків у секції необхідно перед усім встановити діаметр голого (d_0) та ізольованого (d_u) дроту обмотки якоря, середню довжину піввитка обмотки якоря (l_c), з допомогою приведених нижче виразів, тобто:

$$l_c = (L_m + 2\delta) \cdot \frac{\pi(D_m + \delta)}{2} \quad (5.1)$$

для обмотки з прямокутною формою секції;

$$l_c = \frac{\pi(D_m + \delta)}{2\cos\alpha} \quad (5.2)$$

для обмотки з ромбоподібною формою секції,

де

$$\alpha = \arctg \frac{2(L_m + 2\delta)}{\pi(D_m + \delta)} \quad (5.3)$$

$$d_{ui} = \left[\frac{(D_m + \delta) \cdot \delta_0 \cdot f_p}{N_0} \right]^{0.5} \quad (5.4)$$

Знайдене значення d_{ui} , згідно з (5.4), уточнюється (округлення з нестачею) по табл. 4.3 до значення d_u і відбувається вибір діаметру голого дроту (d_0). Потім, виходячи з заданої величини частоти обертання (n), відбувається розрахунок числа витків секції (W_2), використовуючи наступний вираз:

$$W_{(2)} = \left[\frac{(U - \Delta U_m)}{2K_S \cdot \Phi_\delta \cdot K_0 \cdot n \cdot C_E} - \frac{(M + M_0 \cdot l_c \cdot \rho)}{K_S (\Phi_\delta \cdot K_0)^2 \cdot n \cdot C_E \cdot d_0^2} \right] \quad (5.5)$$

де ΔU_m – перехідний спад напруги під щіткою, що приймається рівним:

$\Delta U_m = (0,1 - 0,15)$ В – для срібнографітових щіток,

$\Delta U_m = (0,05 - 0,07)$ В – для чистометалевих щіток з дорогоцінних металів та їх сплавів.

ρ – питомий електричний опір міді, який дорівнює $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Використовується при розрахунку параметрів згідно з (5.1 – 5.5) і в наступних розрахунках наступна розмірність вхідних величин:

$$D_m, L_m, \delta, \delta_0, l_c, d_u, d_0 \text{ в м; } n \text{ в с}^{-1}.$$

5.2.3. Визначення числа витків секції виходячи з умови розміщення провідників обмотки в перерізі циліндра якоря

Виходячи з умови розміщення в перерізі циліндра якоря провідників обмотки, визначення числа витків секції проводиться з метою встановлення здійсненності технологічної обмотки з обраним по (5.4) діаметром при числі ефективних провідників ізолюваного дроту, встановленим у відповідності з (4.12). Розрахунок за даною умовою (умова 3) округляється до цілого числа в меншу сторону і проводиться за виразом:

$$W_{(3)} = \frac{2\delta_0(D_m + \delta)f_p}{d_u^2 \cdot K_S} \quad (5.6)$$

5.2.4. Вибір числа витків в секції і ефективного числа провідників обмотки якоря.

Наступним чином виконується вибір числа витків. З двох значень $W_{(2)}$ і $W_{(1)}$ обирається більше, яке округляється до цілого числа W_C при необхідності (округлення з недоставею), а потім прирівнюється з $W_{(3)}$

$$W_C \leq W_{(3)} \quad (5.7)$$

$$d_u \leq 0.475\delta_0 \quad (5.8)$$

Коли забезпечується виконання умов (5.7) і (5.8), у тих випадках можна вважати завершеним вибір обмотувальних даних. За допомогою загальновідомих методів після цього визначається опір обмотки якоря, а при необхідності і індуктивність обмотки якоря, за допомогою виразів, наведених в [5].

5.2.5. Послідовність і порядок виконання розрахункових процедур

Розрахунок обмотки якоря, як впливає з п. 5.2.1-5.2.4, є цілком закінченою логічною операцією, що може виконуватися як за допомогою ЕОМ, так і при ручному рахунку. Розрахунок обмотки зі спрощеним циклом процедур (перебір по d_u і d_0) наведено в [5], а приклад розрахунку обмотки якоря на ЕОМ наведено в [6].

В ході розрахунку за складеним алгоритмом (перебір по d_u і d_0 при визначенні $W_{(3)}$ і $W_{(2)}$) можливі ситуації, що можна назвати нештатними. У табл. 5.1 наведені випадки таких ситуацій і дані рекомендації щодо їх усунення.

Таблиця 5.1 – Нештатні ситуації при розрахунку за складеним алгоритмом

№ п/п	Признак (умова) ситуації	Спосіб усунення ситуації
1	$W_{(2)} \leq 0$ при одному чи декількох значень d_0 в табл. 4.3.	При виборі d_0 в табл. 4.3 необхідний перехід на декілька або одну строку униз до отримання $W_{(2)}$, який задовольняє умові: $W_{(2)} > 0$; $W_{(2)} \approx W_{(1)}$
2	$W_{(2)} \leq 0$ у всьому діапазоні d_0 в табл. 4.3.	Низ табл. 4.3 необхідно доповнити новими значеннями d_0 або змінити початкові дані: U – у сторону збільшення, M – у сторону зменшення.
3	$W_C > W_{(3)}$	Необхідний перехід по d_0 в табл. 4.3 на декілька або один рядок уверх, або змінити початкові дані: n , I – у сторону збільшення, U , M – у сторону зменшення.
4	$d_u > 0.475\delta_0$	Необхідний перехід по d_0 в табл. 1.13 на декілька або один рядок уверх, або змінити початкові дані: n , I , M – у сторону зменшення, U – у сторону збільшення.

У випадку, якщо зміною вихідних даних I , M , U , n не є можливе забезпечення умов (5.7) і (5.8), необхідно ввести в розрахунок зміну вихідних даних поряд зі зміною електромеханічних параметрів, які визначають величину робочого проміжку (δ), товщину циліндра якоря (δ_0) і залежних від них параметрів.

5.2.6. Розрахунок моменту інерції якоря

Геометричні розміри використовуються в якості вихідних даних, раніше встановлені в ході розрахунку і уточнені при розробці конструкції електродвигуна з конструктивних міркувань. Момент інерції (J) полого якоря, з огляду на його складну конфігурацію, доцільно представити у вигляді суми моментів інерції окремих простих геометричних форм елементів якоря, включаючи:

- момент інерції колектору (J_1);
- момент інерції частини якоря в місці розташування друкованої плати (J_2);
- момент інерції полого циліндра якоря в місці розташування активних провідників (J_3);
- момент інерції кільця явновираженої лобової частини (J_4).

В результаті матимемо:

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 \quad (5.9)$$

для виконання з явновираженою лобовою частиною (рис. 2.1);

$$J = J_1 + J_2 + J_3 \quad (5.10)$$

для виконання якоря з неявновираженою лобовою частиною (рис. 2.2, 2.3).

При цьому складові моменту інерції визначаються за допомогою виразів:

$$J_1 = \frac{\pi\gamma_K}{32} d_K^4 \cdot L_K \quad (5.11)$$

$$J_2 = \frac{\pi\gamma_a}{32} D_H^4 \cdot l_{\Pi} \quad (5.12)$$

$$J_3 = \frac{\pi\gamma_a}{32} (D_H^4 - D_B^4) \cdot (L_m + 2\delta) \quad (5.13)$$

$$J_4 = \frac{\pi\gamma_a}{32} [(D_B^4 + 6\delta_0)^4 - D_B^4] \cdot \left(L_1 - \frac{\pi D_H}{2K_S} \right) \quad (5.14)$$

У зображених виразах:

δ_0 , δ , d_K , L_m , D_B , D_H , L_K , L_1 обираються за даними табл. 4.2 і табл. 2.3 з наступним уточненням при розробці конструкції електродвигуна;

l_{Π} – товщина печатної плати з конструктивних міркувань обирається у межах $1,2 \div 1,8$ мм;

середнє значення питомої ваги якоря (провідники обмотки залиті термореактивним компаундом) і вузла колектору складають відповідно: $\gamma_a \cong 4,8$ г/см³, $\gamma_k \cong 5,6$ г/см³.

При виконанні розрахунків зручно використовувати наступну розмірність величин, згідно з (5.9)-(5.14): моменти інерції в г·см²; геометричні розміри в см.

5.2.7. Розрахунок опору обмотки якоря та індуктивності обмотки якоря

За встановленими параметрами обмотки у ході розрахунку (K_S , W_C , d_o , N_o , l_c) відбувається визначення опору обмотки якоря та, при необхідності, індуктивності обмотки якоря у ході подальшого розрахунку.

Дані розрахунку приведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Дані розрахунку індуктивності обмотки якоря та опору обмотки якоря.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
<p>Опір обмотки якоря, Ом:</p> <ul style="list-style-type: none"> - для простої петльової обмотки - для трисекційної розімкнутої обмотки 	$R = \rho \frac{l_c \cdot N_o}{\pi \cdot d_o^2},$ $R = 2.67 \cdot \rho \frac{L_c \cdot N_o}{\pi \cdot d_o^2}, \text{ де } \rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м},$ <p>d_o, l_c в м.</p>
<p>Індуктивність секції обмотки якоря, мГн</p> <p>Індуктивність обмотки якоря, мГн:</p> <ul style="list-style-type: none"> - для простої петльової обмотки - для трисекційної променевої обмотки з 60° секційною зоною 	$L_0 = \frac{2}{\pi} \cdot l_c \cdot W_C^2 \left(\frac{\pi \cdot W_C \cdot d_u}{2l_c} + 0.44 \right) \cdot 10^{-5},$ $L_{OA} = L_0 (K_S - 1) \cdot K_{CB} \cdot K_\mu$ $L_{OA} = 4L_0 (K_S - 2) \cdot K_{CB} \cdot K_\mu,$ <p>де l_c, d_u в см, $K_{CB} = (0,75 \div 0,85),$ $K_\mu = (1,6 \div 2,0)$</p>

Індуктивність обмотки якоря у представленій табл. 5.2 приведена для випадку зібраної машини. Коефіцієнти K_{μ} і K_{CB} враховують магнітний зв'язок обмотки якоря (K_{μ}) і електромагнітний зв'язок між суміжними секціями (K_{CB}) з близько розташованим феромагнітним контуром (магніт, зовнішній магнітопровід – корпус) електродвигуна.

6. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА.

6.1. Вихідні дані і прийняті допущення

Наведені в табл. 1.1 приймаються значення параметрів в якості вихідних даних, і значення параметрів, встановлені в ході попередніх розрахунків.

При розрахунку струму споживаного струму (I), холостого ходу (I_0), початкового пускового моменту (M_{Π}) розрахунковий коефіцієнт C_1 за даними п. 5.2.1 приймається в залежності від типу використовуваної обмотки (трисекційна розімкнута або проста петльова).

При розрахунку номінальної частоти обертання (n) частоти обертання холостого ходу (n_0), розрахунковий коефіцієнт C_E приймається рівним:

$C_E = 0,605$ – для трисекційної розімкненої обмотки,

$C_E = 1$ – для простої петльової обмотки,

за обраним значенням по п. 5.2.2 приймається перехідне падіння напруги під щітками (ΔU_m).

При розрахунку номінальної частоти обертання (n), частоти обертання холостого ходу (n_0), електромеханічної сталої часу (T_{EM}), початкового пускового струму (I_{Π}) опір якоря (R), в залежності від типу використовуваної обмотки, приймаються за даними табл. 5.2.

При розрахунку параметрів n і n_0 розрахунковий коефіцієнт використовуваної обмотки K_0 , в залежності від прийнятої конфігурації секції (ромбовидної або прямокутної форми), приймається за даними п.5.1.

Використовується наступна розмірність величин при розрахунку електромеханічних параметрів: момент (M, M_0, M_{Π}) в Н·м, магнітний потік ($\Phi\delta$) в Вб, частота обертання (n_0, n) в s^{-1} , струм (I, I_0, I_{Π}) в А, потужність (P_2) в Вт, напруга ($\Delta U_m, U$) в В, момент інерції якоря (J) в $kg \cdot m^2$. Розрахунок проводиться для нормальних кліматичних умов.

6.2. Визначення електромеханічних параметрів

Значення електромеханічних параметрів, що отримані за результатами розрахунку, порівнюються зі значеннями, заданими відповідно до табл. 1.1.

Результати розрахунку вважаються задовільними, якщо розрахункові значення параметрів відрізняються від заданих значень в межах не більше $\pm 10\%$. В іншому випадку вживаються заходи до усунення невідповідностей та аналізуються їх причини шляхом вживаються заходи до їх усунення уточнення методу розрахунку та вживаються заходи до їх усунення.

Дані розрахунку наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Дані розрахунку електромеханічних параметрів.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Струм холостого ходу, А	$I_0 = \frac{M_0}{C_1 \cdot N_0}$
Частота обертання холостого ходу, об/хв	$n_0 = \frac{(U - I_0 R - \Delta U_m)}{N_0 \cdot \Phi_\delta \cdot K_0} \cdot C_E$
Споживаний струм при номінальному крутному моменті, А	$I = \frac{(M - M_0)}{C_1 \cdot N_0}$
Частота обертання при номінальних значеннях напруги живлення і крутному моменті, об/хв	$n = \frac{(U - IR - \Delta U_m)}{N_0 \cdot \Phi_\delta \cdot K_0} \cdot C_E$
Номінальна корисна потужність, Вт	$P_2 = 6.15 \cdot M \cdot n$
Номінальний пусковий струм, А	$I_{\Pi} = \frac{U - \Delta U_m}{R}$
Початковий пусковий момент, Н·м	$M_{\Pi} = C_1 \cdot N_0 \cdot I_{\Pi} - M_0$
Електромеханічна постійна часу, с	$T_{EM} = J \cdot R \left[\frac{I}{M_0 + M} \right]^2$
Коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі роботи	$\eta = \frac{P_2}{U \cdot I}$

7. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

7.1. Визначення температури нагрівання електродвигуна

Для випадку роботи електродвигуна в номінальному режимі тепловий розрахунок проводиться за спрощеною методикою.

Такі вихідні дані та припущення використовуються при виконанні розрахунку:

- в силу малої маси та розмірів електродвигун розглядається як окрема система;
- механічні втрати холостого ходу (P_0), електричні втрати в обмотці якоря (P_m), створюють загальний нагрівуючий ефект;
- відводяться сумарні втрати двома торцевими та циліндричною поверхнями електродвигуна;
- температура нагріву електродвигуна (θ_n), гранично допустима, яка складається з власного нагріву, який обумовлений сумарними втратами ($\sum P$), і температури навколишнього середовища (θ_0) не повинна перевищувати допустимої температури нагріву магніту і температурний індекс обмотувального дроту, встановлених відповідними технічними умовами;
- якщо не визначено попередньо, температура навколишнього середовища (θ_0), відповідно до ГОСТ 16962-71, приймається рівною 25°C для нормальних кліматичних умов;
- визначається в ході розрахунку температура нагріву корпусу електродвигуна ($\Delta\theta_k$) і температура нагріву обмотки якоря ($\Delta\theta_m$) від впливу електричних (P_m) і механічних (P_0) втрат в обмотці, а також повна температура нагрівання корпусу (θ_k) і нагріву обмотки (θ_a) з урахуванням температури навколишнього середовища (θ_0);
- для сталої температури розрахунок проводиться з урахуванням використання теплових опорів виду:
- опір переходу «якір-корпус» - R_{th1} ,

- опір переходу «корпус-навколишнє середовище (повітря)» з наведених в [7] використанням методів, - R_{th2} ;
- для розрахунку площ сходу теплових потоків в якості вихідних даних використовуються геометричні розміри електродвигуна, які уточнені при конструкторському відпрацюванні електродвигуна і установлені в ході електромеханічного розрахунку.

7.2. Визначення сталої температури нагріву електродвигуна

Дані розрахунку наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 - Дані розрахунку для визначення сталої температури нагріву електродвигуна.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Поверхня сходу теплового потоку обмотки якоря, см ²	$S_0 = \frac{\pi(D_H + D_B)}{2} L_1$ де D_H, D_B, L_1 , в см (табл. 1.12)
Поверхня сходу теплового потоку із зовнішніх поверхонь електродвигуна, см ²	$S_B = \pi D L \frac{2\pi D^2}{4}$ де D, L – відповідно зовнішній діаметр і аксіальна довжина електродвигуна
Тепловий опір перепаду температур від зовнішньої поверхні електродвигуна в навколишнє середовище, °С/Вт	$R_{th2} = \frac{1}{S_B \alpha_{\Pi}}$ де α_{Π} – коефіцієнт тепловіддачі поверхні, рівний: $18 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{градус}}$
Тепловий опір перепаду температур від обмотки статора до зовнішньої поверхні електродвигуна, °С/Вт	$R_{th1} = R_{th2} \frac{S_0}{S_B}$
Електричні втрати в міді обмотки якоря, Вт	$P_M = I^2 R$

Продовження таблиці 7.1.

Найменування параметру та розмірність	Позначення параметру та формула розрахунку
Сумарні втрати в електродвигуні, Вт	$\Sigma P = P_0 + P_M$, де P_0 – механічні втрати при частоті обертання n
Сумарний тепловий опір, °C/Вт	$R_{th} = R_{th1} + R_{th2}$
Нагрівання обмотки якоря від втрат в міді, °C	$\Delta\theta_M = \frac{R_{th} \cdot P_M}{1 - R_{th} \cdot P_M \cdot \alpha_{cu}}$ де $\alpha_{cu} = 3,92 \cdot 10^{-3}$ – постійна міді, °C ⁻¹
Нагрівання обмотки якоря від сумарних втрат, °C	$\theta_M = \Delta\theta_M \frac{\Sigma P}{P_M}$
Нагрівання корпусу електродвигуна від сумарних втрат, °C	$\Delta\theta_K = \Delta\theta_M \frac{R_{th}}{R_{th2}}$
Повний нагрів обмотки якоря, °C	$\theta_a = \theta_0 + \theta_M$
Повний нагрів корпусу електродвигуна, °C	$\theta_K = \theta_0 + \Delta\theta_K$

Відбувається перевірка умови після завершення теплового розрахунку:

$$\theta_a \leq \theta_{П(1)} \quad (7.1)$$

$$\theta_K \leq \theta_{П(2)} \quad (7.2)$$

де $\theta_{П(2)}$ - встановлений технічними умовами на використовувану марку магніту гранично допустимий нагрів магніту (магнітної композиції) до досягнення незворотних втрат індукції в тілі магніту; $\theta_{П(1)}$ – відповідно до встановленого технічними умовами на дріт температурного індексу гранично допустимий нагрів використовуваного обмотувального дроту.

Вживаються заходи щодо зниження втрат в електродвигуні та переглядаються умови розрахунку, якщо умови (7.1) і (7.2) не задовольняються.

8. РОЗРАХУНКИ

8.1. Короткий технічний опис на електродвигун.

Для розрахунку було обрано електродвигун колекторний ДПР-72-Н4-01 постійного струму із збудженням від постійних магнітів без стабілізації частоти обертання із кріпленням за корпус та одним вихідним кінцем валу.

Обраний двигун призначений для роботи як силовий двигун для приводу різних механізмів короткочасної, повторно-короткочасної та безперервної дії. Він використовується в системах автоматики, радіоелектроніки та телемеханіки як привод різних механізмів в обладнанні загального і спеціального призначення. Електродвигун реверсивний забезпечує роботу при обох напрямках обертання валу. Має тривалий режим роботи. Двигун ДПР-72-Н4-01 може також працювати при повторно-короткочасному реверсивному режимі при живленні напругою синусоїдальної форми, амплітудою до 6, частотою до 2,5 Гц (тривалість роботи не більше 60 хв з наступною перервою не менше 60 хв).

Виконання двигуна безфланцеве, кріплення проводиться за корпус за допомогою немагнітних металевих деталей, що охоплюють його. Робоче становище двигуна у просторі довільне.

Електродвигун допускає експлуатацію за температури навколишнього середовища від -60 до +70 °С, атмосферному тиску від 535 до 3040 ГПа, відносної вологості 98 % при 40 °С. Стійкий до дії вібрації в діапазоні частот 5-2000 Гц із прискоренням до 10g та ударних навантажень до 50g.

8.2. Технічне завдання.

Технічним завданням магістерської дисертації є розрахувати магнітоелектричний двигун постійного струму з порожнистим ротором широкого функціонального застосування з технічними параметрами згідно табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – Технічні параметри.

$U, В$	27
$M, Н·м$	$39,2 \cdot 10^{-3}$
$n, об/хв$	6000
$n_0, об/хв$	8000
$I_0, А$	1,3
$I, А$	1,45
$M_{П}, Н·м$	$392 \cdot 10^{-3}$
$T_{EM}, с$	$\leq 10 \cdot 10^{-3}$

Зовнішній діаметр електродвигуна (D) не повинен перевищувати 22 мм. Кількість вихідних кінців валу – 1, кріплення електродвигуна в апаратурі споживача відбувається за корпус.

робочі характеристики електродвигуна (рис. 8.1) за результатами розрахунків повинні мати наступний вигляд:

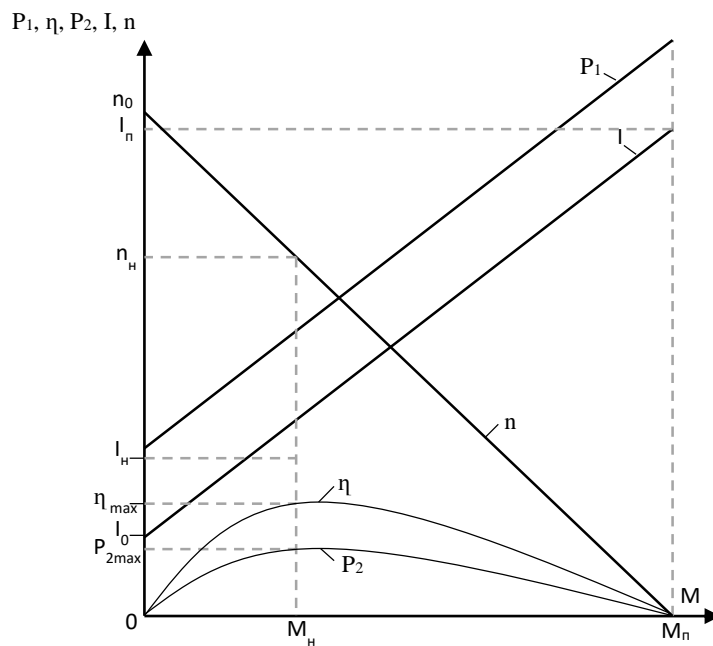


Рисунок 8.1 – Загальний вид робочих характеристик електродвигуна

8.3. Вибір магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів (згідно з розділом 2)

Обрані на основі аналізу вартісних показників і магнітних характеристик:

- сплав по ГОСТ 10160-75 16Х для використання в якості корпусу (магнітопроводу) електродвигуна;
- для використання в якості магніту магнітної системи марки E-28 композиція NdFeB з характеристиками $H_{CB} \geq 640$ кА/м, $B_r \geq 1,0$ Тл.

8.4. Визначення основних геометричних розмірів і співвідношень магнітної системи. (згідно з розділом 2)

Обрані і розраховані значення параметрів наведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Обрані і розраховані значення параметрів

Обрані значення параметрів	Розрахункові значення параметрів
Тип конструкції за рис. 1.2; $K_{EM} = 2$; $k_0 = 0.36$;	$P_2 = 17,99$ Вт (1.2). $P_{EM(max)} = 35,98$ Вт (табл. 2.1). $n_0 = 133$ с ⁻¹ (табл. 1.1).
$\lambda = 0,735$; $\beta_0 = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Вб ² /м ²	$D_m = 20,77 \cdot 10^{-3}$ м, з округленням до $D_m = 21 \cdot 10^{-3}$ м (2.1). $h_m = 17,9 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta = 0,07h_m = 0.125 \cdot 10^{-3}$ м; $L_m = 28,5 \cdot 10^{-3}$ м; $L_A = 1.4L_m = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $h_C = 35 \cdot 10^{-3}$ м; $D_A = 21 \cdot 10^{-3}$ м; $D = 28 \cdot 10^{-3}$ м (табл. 2.3);

8.5. Розрахунок магнітної системи та визначення магнітного потоку електродвигуна

Розрахункові значення приведені в табл. 8.3-8.5.

Таблиця 8.3 – Розрахункові значення параметрів магнітної системи

Обрані значення параметрів і фізичні константи	Розрахункові значення параметрів
<p>Число полюсів $2p = 2$;</p> <p>Коефіцієнт полюсної дуги $\alpha = \frac{2}{\pi}$;</p> <p>Діаметр валу</p> <p>$d_b = 1,5$ см;</p> <p>$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-8}$ Гн/см</p>	<p>$\tau_m = 3,3$ см;</p> <p>$b_p = 2,1$ см;</p> <p>$S_m = 5,94$ см²; $S_\delta = 6$ см²;</p> <p>$S_A = 1,4$ см²;</p> <p>$L_S = 3,85$ см (табл. 3.1).</p> <p>$\lambda_\delta = 482,5\mu_0$, Вб/А; $\lambda_{p1} = 0,156\mu_0$, Вб/А;</p> <p>$\lambda_{p2} = 0,246\mu_0$, Вб/А;</p> <p>$\sum\lambda = 1,344\mu_0$, Вб/А; $\sigma \cong 1,05$ (табл. 3.2).</p>

Таблиця 8.4 – Значення параметру у фіксованих точках

Позначення параметру та розмірність	Значення параметру у фіксованих точках на кривій розмагнічування магніту		
	$B_{m(1)} = 0.5B_r$, Тл	$B_{m(2)} = 0.75B_r$, Тл	$B_{m(3)} = 0.9B_r$, Тл
B_δ , Тл	0,518	0,778	0,93
F_δ , А	1,2	1,82	2,18
B_C , Тл	538	810	970
F_C , А	6,5	240	400
F_m , А/см	9,25	342	570
	585	1240	1650

Таблиця 8.5 – Визначення магнітного потоку

Позначення параметру та розмірність	Значення параметру	Примітка
B_{m0} , Тл	0,790	Точка (B_{m0} ; H_{m0}) визначена на перетині лінії виду: $B_r = f(H_{CB})$ і $F_m = F(B_{mi})$
H_{m0} , А/см	1300	
$B_{\delta 0}$, Тл	0,683	
B_{C0} , Тл	1,60	
Φ_{δ} , Вб	$1,24 \cdot 10^{-4}$	

8.6. Розрахунок механічних втрат в щітково-колекторному і підшипниковому вузлах

Приймаються наступні виконання підшипникового вузлів і щітково-колекторного відповідно до обраного типу конструкції (рис. 2.2):

- колектор зі сплаву CrM900, на основі чистометалевої щітки щітково-колекторний вузол зі сплаву ЗлМ800;
- на основі підшипників кочення підшипниковий вузол, при цьому використовуються підшипники одного і того ж типу.

Результати розрахунку механічних втрат наведені у табл. 8.6.

Таблиця 8.6 – Розрахунок механічних втрат

Обрані значення параметрів	Розрахункові значення параметрів
$F = 0,7 \cdot 10^2$ Н; $m = 3$; $\alpha = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; Підшипник типу 2000154. Коефіцієнти: $K_{II} = 2,5$ $\mu_2 = 0,35$	$D_0 = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м; $G_A = 5,3 \cdot 10^{-3}$ кг; $ R_A = 23 \cdot 10^{-3}$; $A = 20,5 \cdot 10^{-3}$ Н; $C_{\psi} = 25$; $M_{TK} = 0,22 \cdot 10^{-4}$ Н·м З частотою обертання n_0 : $C_v = 0,0368$; $M_{ТП} = 1,69 \cdot 10^{-4}$ Н·м; $M_0 = 1,92 \cdot 10^{-4}$ Н·м; $P_0 = 0,157$ Вт. З частотою обертання n : $C_v = 0,0332$; $M_{ТП} = 1,52 \cdot 10^{-4}$ Н·м; $M_0 = 1,74 \cdot 10^{-4}$ Н·м; $P_0 = 0,107$ Вт.

8.7. Розрахунок обмотки якоря (згідно з розділом 5)

Вид обмотки - проста петльова, кількість секцій – 9, форма секції - ромбовидна; між магнітом і обмоткою, а також між магнітопроводом і обмоткою конструктивний проміжок (δ_K) приймається рівним 0,15 мм.

Розрахункові значення параметрів:

1) $C_1 = 18,8 \cdot 10^{-4}$, при $K_0 = 0,8$;

2) $N_i = 408$ з округленням до $N_0 = 414$, при якому $W_{(1)} = 23$ – ціле число;

3) $d_u = 0,125 \cdot 10^{-3}$ м з округленням до стандартного значення (табл. 5.1), що дорівнює $d_u = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м при номінальному значенні $d_0 = 0,09 \cdot 10^{-3}$ м;

4) $\alpha = 41^\circ$;

5) $l_C = 24,4 \cdot 10^{-3}$ м.

6) $W_{(2)} = 23,4$ з округленням до $W_{(2)} = 23$;

7) $W_{(3)} = 25$.

8) Обираємо $W_C = 23$.

Перевірка умови: $W_C \leq W_{(3)}$, $d_u \leq 0,475 \cdot \delta$.

9) $l_p = 0,06$ см;

10) $L_K = 0,26$ см;

11) $J_1 = 11,6 \cdot 10^{-4}$ Г·см²;

12) $D_H = 1,2$ см;

13) $D_B = 1,13$ см;

14) $J_2 = 0,147$ Г·см²;

15) $J_3 = 0,37$ Г·см²;

16) $J = 0,516$ Г·см²;

17) $R = 5$ Ом;

18) $L_0 = 5,1 \cdot 10^{-3}$ мГн;

19) $L_{0A} = 32,6 \cdot 10^{-3}$ мГн без феромагнітного контуру;

20) $L_{0A} = 17,8 \cdot 10^{-3}$ мГн з феромагнітним контуром у зібраному електродвигуні з $K_{CB} = 0,8$ та $K_\mu = 2$.

8.8. Розрахунок електромеханічних параметрів (згідно з розділом 6)

Під щітками перехідне падіння напруги приймаємо рівним $\Delta U_m = 0,05$ В.

Наступні результати розрахунку наведені нижче:

- 1) $I_0 = 1,29$ А при $n_0 = 133$ с⁻¹ (8000 об/хв);
- 2) $I_0 = 1,26$ А при $n_0 = 100$ с⁻¹ (6000 об/хв);
- 3) $n_0 = 140$ с⁻¹ (8400 об/хв);
- 4) $I = 1,448$ А;
- 5) $n = 101,5$ с⁻¹ (6100 об/хв);
- 6) $I_{II} = 14,5$ А;
- 7) $P_2 = 25$ Вт;
- 8) $M_{II} \cong 391,95 \cdot 10^{-3}$ Н·м;
- 9) $T_{EM} \cong 8,45 \cdot 10^{-3}$ с;
- 10) $\eta = 0,64$.

За результатами розрахунку електромеханічних параметрів можна побудувати робочі характеристики (рис. 8.2).

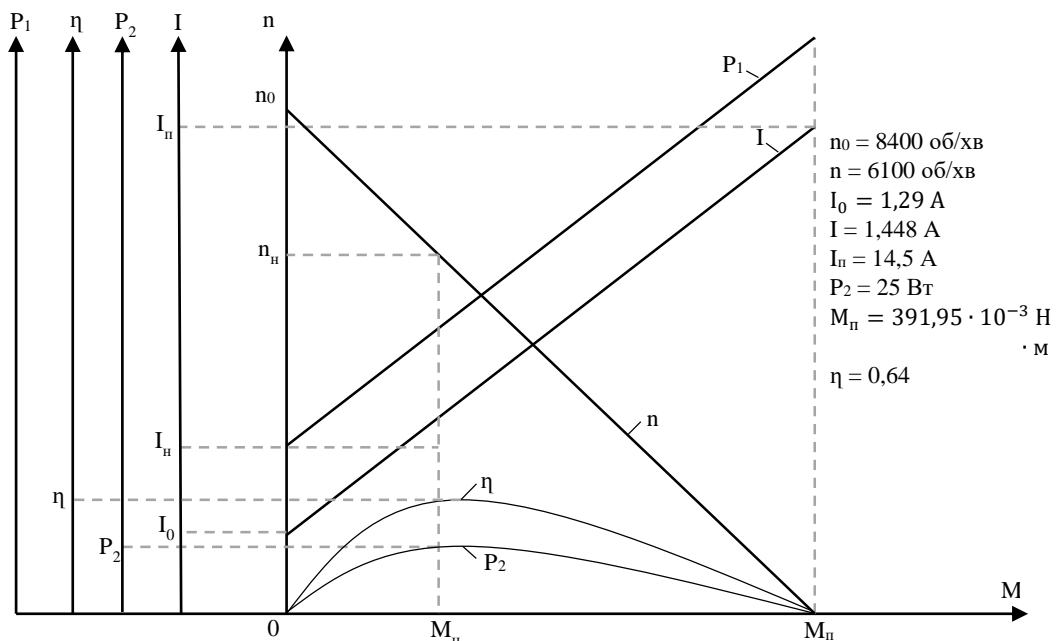


Рисунок 8.2 – Робочі характеристики електродвигуна.

8.9. Тепловий розрахунок і визначення температури нагріву електродвигуна (згідно з розділом 7)

Результати розрахунків наведені нижче:

- 1) $S_0 = 7,7$ см², де D_H , D_B , L відповідно 1.2, 1.3, 2.1 см;

2) $S_B = 18 \text{ см}^2$, де D, L відповідно 1.6, 2.8 см;

3) $R_{th2} = 31 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$;

4) $R_{th1} = 13,2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$;

5) $R_{th1} = 44,2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$;

6) $P_M = 0,458 \text{ Вт}$;

7) $\sum P = 0,565 \text{ Вт}$;

8) $\Delta\theta_M = 22 \text{ }^\circ\text{C}$;

9) $\theta_M = 27 \text{ }^\circ\text{C}$;

10) $\Delta\theta_K = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$;

11) $\theta_a = 52 \text{ }^\circ\text{C}$;

12) $\theta_K = 36,5 \text{ }^\circ\text{C}$;

Перевірка умови: $\theta_a \leq \theta_{П(1)}$; $\theta_K \leq \theta_{П(2)}$.

9. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ

9.1. Математична модель мікродвигуна постійного струму

Схема підключення магнітоелектричного двигуна постійного струму представлена на рис. 9.1, де: U – напруга живлення кола якоря, В; I – струм якоря, А; E – ЕРС двигуна, В.

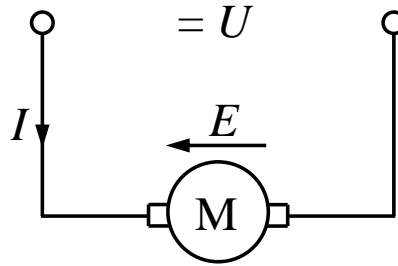


Рисунок 9.1 – Схема підключення двигуна постійного струму

На її основі отримується схема заміщення кола якоря магнітоелектричного двигуна постійного струму, що зображена на рис. 9.2, де: $L_{я}$ – індуктивність кола якоря, Гн; $R_{я}$ – активний опір кола якоря, Ом.

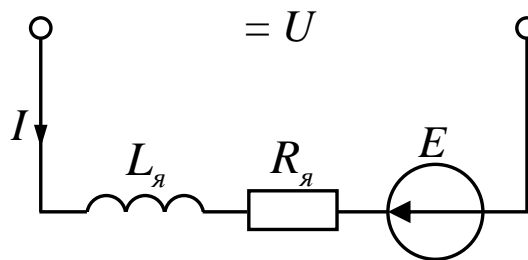


Рисунок 9.2 – Схема заміщення кола якоря мікродвигуна постійного струму

За другим законом Кірхгофа складається рівняння для цього кола

$$L_{я} \frac{dI}{dt} + I \cdot R_{я} = U - E. \quad (9.1)$$

ЕРС двигуна визначається за наступним виразом

$$E = c\Phi\omega, \quad (9.2)$$

де $c\Phi$ – коефіцієнт кола збудження, В·с;

c – конструктивна стала;

Φ – магнітний потік, Вб;

ω – кутова швидкість, рад/с.

Механічна частина магнітоелектричного двигуна постійного струму представляється одномасовою розрахунковою схемою та описується відомим рівнянням руху

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (9.3)$$

де J – момент інерції двигуна, кг·м²;

M – момент двигуна, Нм;

M_c – момент навантаження двигуна, Нм.

Електромагнітний момент двигуна знаходиться за формулою

$$M = c\Phi I. \quad (9.4)$$

Таким чином, магнітоелектричний двигун струму описується системою двох диференціальних рівнянь першого порядку та двох алгебричних рівнянь першого порядку (9.5), яка складена на основі (9.1)-(9.4)

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L_{\text{я}}} [U - E - I \cdot R_{\text{я}}] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [M - M_c] \\ E = c\Phi\omega \\ M = c\Phi I \end{cases} \quad (9.5)$$

9.2. Розрахунок параметрів математичної моделі мікродвигуна постійного струму

Вхідними сигналами математичної моделі (9.5) є дві зовнішні дії: керування – це напруга якоря U , В; збурення – це момент навантаження двигуна M_c , Нм.

Параметрами математичної моделі (9.5) є: $L_{\text{я}}$ – індуктивність кола якоря, Гн; $R_{\text{я}}$ – активний опір кола якоря, Ом; $c\Phi$ – коефіцієнт кола збудження, В·с; J – момент інерції двигуна, кг·м². Значення зовнішніх дій та параметрів математичної моделі знаходяться за результатами розрахунків, наведених у попередньому розділі:

$U_n = 27$ В – номінальна напруга якоря;

$M_c = M_n = 0,0391$ Нм – номінальний момент навантаження;

$L_{\text{я}} = 0,0681$ Гн – індуктивність кола якоря;

$R_{\text{я}} = 5$ Ом – активний опір кола якоря, Ом;

$J = 516 \cdot 10^{-7}$ кг·м² – момент інерції двигуна.

Параметри математичної моделі можна також знайти на основі паспортних даних мікродвигуна. Двигун характеризується наступними паспортними даними:

1) P_{2n} , Вт – номінальна потужність, це – механічна потужність на валу двигуна, на яку може розраховувати користувач;

2) U_n , В – номінальна напруга якоря;

- 3) I_n , А – номінальний струм якоря;
- 4) n_n , об/хв – номінальна частота обертання;
- 5) η_n – номінальний ККД.

За цими паспортними даними можна обчислити:

- 1) $\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$ – номінальна кутова швидкість, рад/с;
- 2) $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$ – номінальний механічний момент двигуна, Нм;
- 3) $P_{1n} = U_n I_n$ – номінальна електрична потужність, яка споживається двигуном, Вт;
- 4) $R_n = \frac{U_n}{I_n}$ – номінальний електричний опір двигуна, Ом;
- 5) $R_y \approx 0,75 \cdot R_n (1 - \eta_n)$ – приблизне значення електричного опору кола якоря мікродвигуна, Ом;
- 6) $L_y \approx 0,6 \frac{U_n}{p I_n \omega_n}$ – приблизне значення індуктивності кола якоря, Гн (найчастіше для мікромашин $p=1$);
- 7) $c\Phi = \frac{U_n - I_n R_y}{\omega_n}$ – коефіцієнт кола збудження, В·с;
- 8) $\eta_n = \frac{P_{2n}}{P_{1n}}$ – номінальний ККД (якщо його не вказано);
- 9) $I_n = \frac{P_{2n}}{U_n \eta_n}$ – номінальний струм якоря, А (якщо його не вказано).

Наприклад, магнітоелектричний двигун марки ДПР-72-Н4-01 характеризується наступними даними:

- 1) $P_{2n}=25$ Вт – номінальна потужність;
- 2) $U_n=27$ В – номінальна напруга;
- 3) $I_n=1,45$ А – номінальний струм;
- 4) $n_n=6000$ об/хв – номінальна частота обертання.

За цими даними знаходяться параметри математичної моделі. Номінальна кутова швидкість

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 6000}{30} = 628 \text{ рад/с.}$$

Номінальний механічний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{25}{628} = 398,089 \cdot 10^{-4} \text{ Нм.}$$

Номінальна електрична потужність

$$P_{1H} = U_H I_H = 27 \cdot 1,45 = 39,15 \text{ Вт.}$$

Номінальний електричний опір

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \frac{27}{1,45} = 18,62 \text{ Ом.}$$

Номінальний ККД

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{25}{39,15} = 0,638.$$

Приблизне значення електричного опору кола якоря

$$R_{\text{я}} \approx 0,75 \cdot R_H (1 - \eta_H) = 0,75 \cdot 18,62 (1 - 0,638) = 5,055 \text{ Ом.}$$

Приблизне значення індуктивності кола якоря

$$L_{\text{я}} \approx 0,6 \frac{U_H}{p I_H \omega_H} = 0,6 \frac{27}{1 \cdot 1,45 \cdot 628} = 0,0178 \text{ Гн.}$$

Коефіцієнт кола збудження

$$c\Phi = \frac{U_H - I_H R_{я}}{\omega_H} = \frac{27 - 1.45 \cdot 5.055}{628} = 0.0313 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

9.3. Побудова моделі та моделювання режимів роботи мікродвигуна постійного струму в Simulink

За рівняннями моделі (9.5) побудується структурна схема магнітоелектричного двигуна в Matlab/Simulink [21], яка представлена на рис. 9.1.

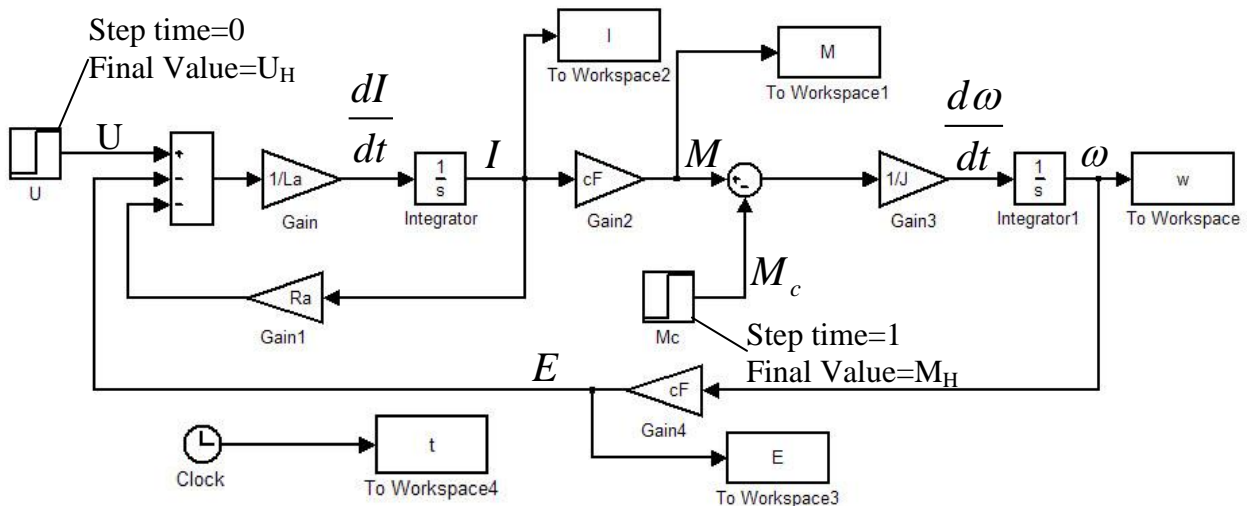


Рисунок 9.1. – Структурна схема мікродвигуна постійного струму

У схемі передбачено, що напруга живлення двигуна U подається на двигун стрибком (прямий пуск в холосту без навантаження) за допомогою блоку Step в заданий момент часу $\text{Step time}=0$. Момент навантаження M_c накидається стрибком через одну секунду після пуску $\text{Step time}=1$ за допомогою іншого блоку Step. Значення параметрів моделі можна задати безпосередньо у блоках Gain або за допомогою M-файлу. Для побудови графіків змінних під час перехідних процесів їх значення (час, струм, момент, ЕРС, швидкість) запам'ятовується в робочому просторі Matlab за допомогою блоків To Workspace. Для перегляду перехідних процесів за результатами моделювання можна підключити

паралельно до блоків To Workspace блоки осцилографів Scope. За допомогою структурної схеми на рис. 9.1 можна провести моделювання необхідних динамічних процесів (пуск, реверс, зупинка, накидання та скидання навантаження, зменшення та збільшення напруги живлення або навантаження) та отримати графіки перехідних процесів змінних мікродвигуна.

9.3.1. Створення підсистеми та маскування моделі

Для створення підсистеми необхідно виділити модель за допомогою комп'ютерної мишки при натиснутій лівій клавіші та в меню Edit вибрати рядок Create Subsystem. Після перейменування вхідних та вихідних портів отримується структурна схема, що показана на рис. 9.2.

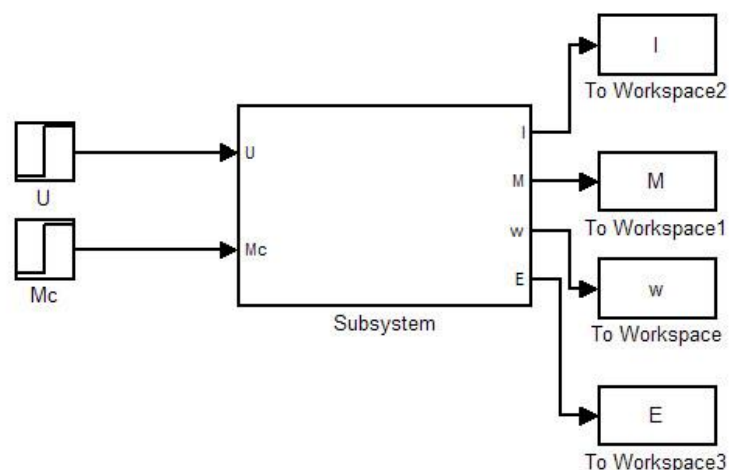


Рисунок 9.2 – Підсистема магнітоелектричного двигуна постійного струму

Для маскування підсистеми магнітоелектричного двигуна постійного струму необхідно виділити підсистему, вибрати в меню Edit рядок Mask Subsystem та зробити бажане налаштування [21]. Вікно з параметрами маски, що вводяться користувачем, показано на рис. 9.3. Вікно можливих розрахункових параметрів представлено на рис. 9.4. Вікно з налаштуванням піктограми показано на рис. 9.5. Результуюча структурна схема представлена на рис. 9.6.

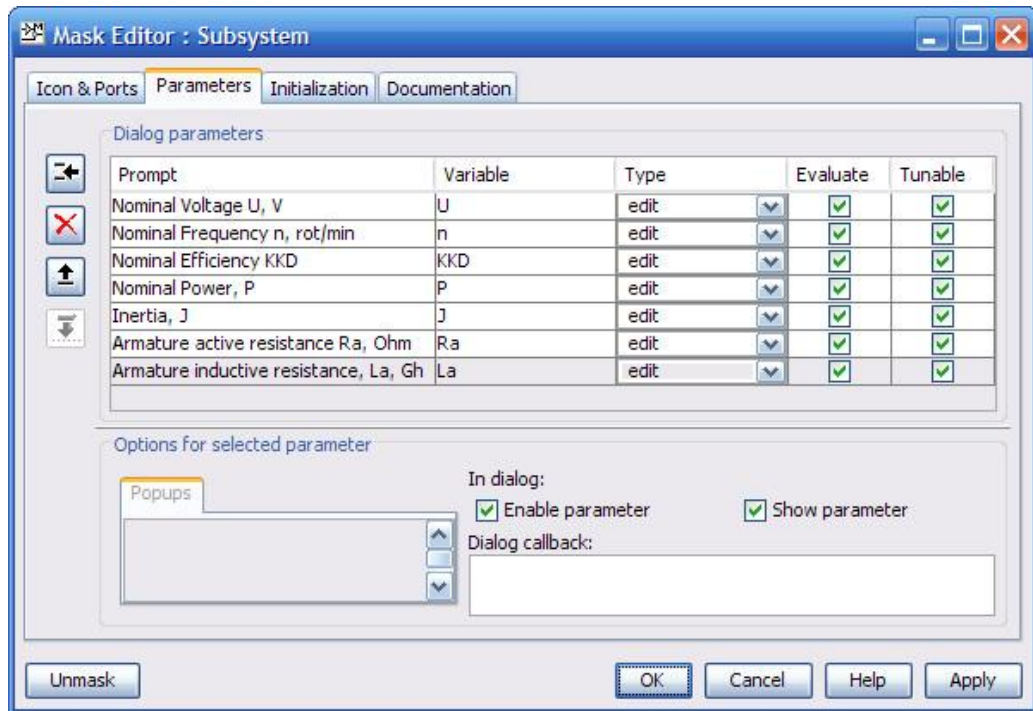


Рисунок 9.3 – Вікно з параметрами маски, що вводяться користувачем

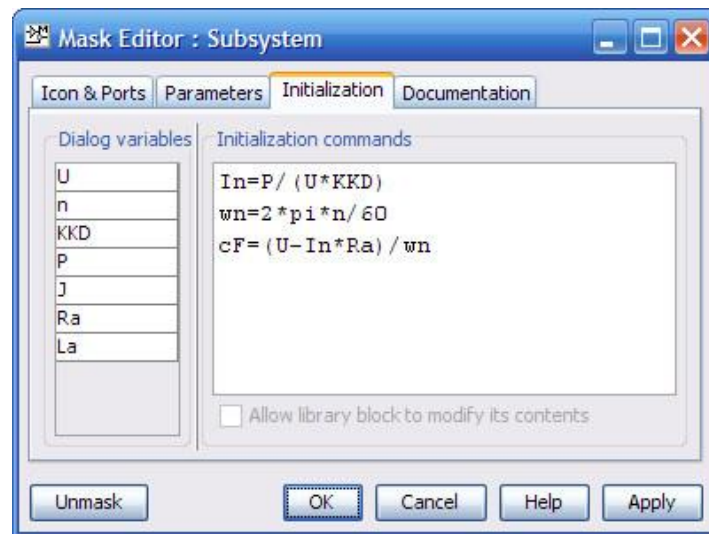


Рисунок 9.4 – Вікно розрахункових параметрів

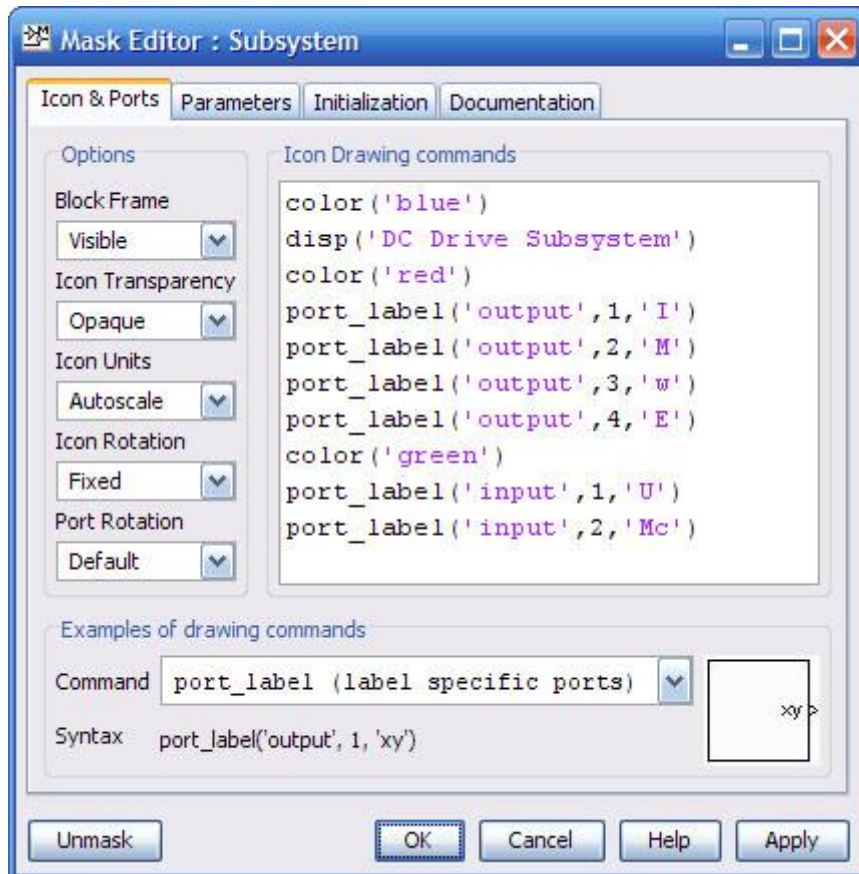


Рисунок 9.5 – Вікно з налаштуванням піктограми

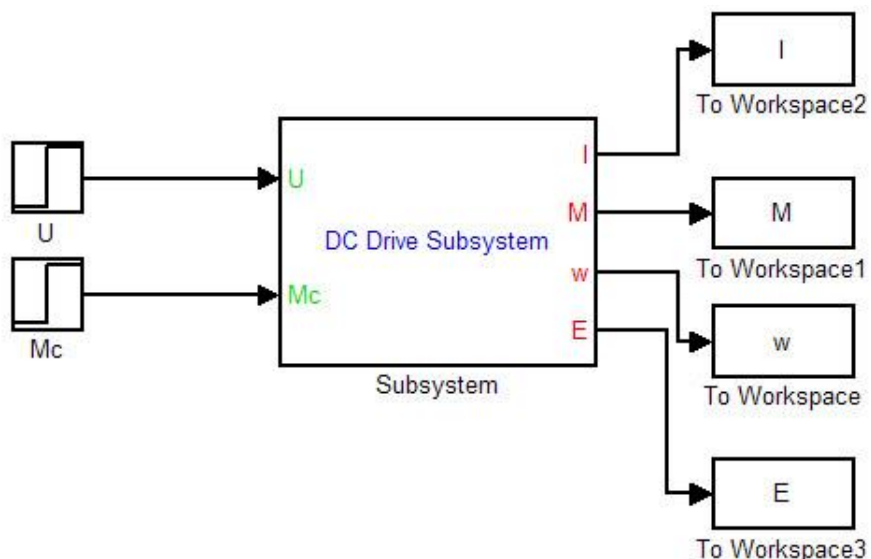


Рисунок 9.6 – Результуюча підсистема двигуна постійного струму

9.3.2. Моделювання режимів роботи мікродвигуна постійного струму

Програма моделювання режимів роботи включає чотири етапи, зокрема прямий пуск двигуна в холосту на номінальну напругу живлення, а після виходу на усталену швидкість – накидання номінального моменту навантаження. Після завершення перехідного процесу здійснюється скидання момент навантаження, а потім зменшення стрибком напруги живлення. За результатами моделювання необхідно отримати перехідні процеси струму, моменту двигуна, швидкості, ЕРС, моменту навантаження та напруги живлення. Структурна схема для реалізації цих режимів роботи зображена на рис. 9.7.

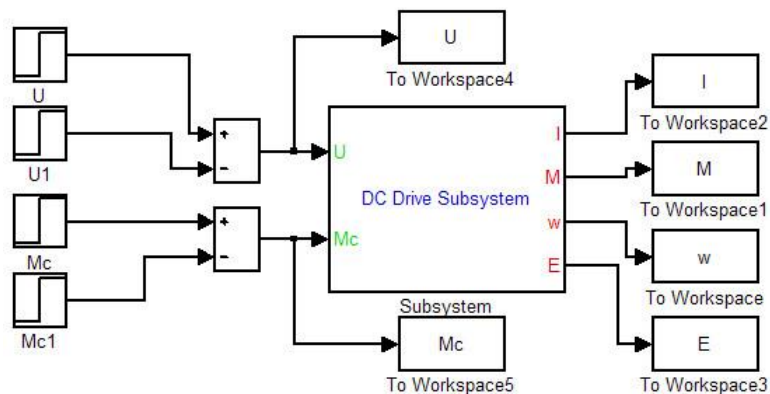


Рисунок 9.7 – Підсистема для забезпечення заданих режимів роботи

Графік перехідного процесу швидкості з поясненнями, представлено на рис. 9.8.

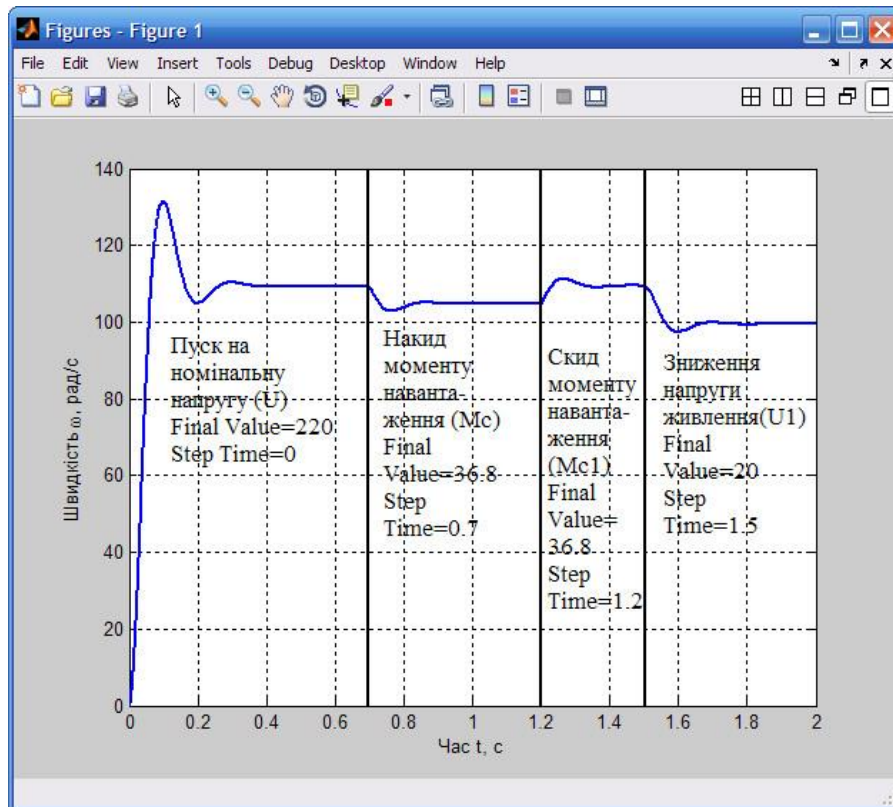


Рисунок 9.8 – Графік перехідного процесу кутової швидкості обертання валу двигуна

Графіки перехідних процесів всіх змінних двигуна зображено на рис. 9.9.

Програма у М-файлі для побудови графіків має наступний вигляд:

```
figure; %створення графічного вікна
subplot(3,2,1); %відкриття першого графічного підвікна
plot(t,w,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка w(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей та графіка
ylabel('\omega, рад/с');
grid; %активація сітки
subplot(3,2,2); %відкриття другого графічного підвікна
plot(t,M,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка M(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей
ylabel('M, Н*м');
grid; %активація сітки
subplot(3,2,3); %відкриття третього графічного підвікна
plot(t,I,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка I(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей
ylabel('I, А');
grid; %активація сітки
subplot(3,2,4); %відкриття четвертого графічного підвікна
plot(t,E,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка E(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей
ylabel('E, В');
grid; %активація сітки
```

```

subplot(3,2,5); %відкриття п'ятого графічного підвікна
plot(t,U,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка U(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей
ylabel('U, В');
axis([0 2 0 250]); %масштабування графіка напруги
grid; %активація сітки
subplot(3,2,6); %відкриття п'ятого графічного підвікна
plot(t,Mc,'b-','LineWidth',2); %побудова графіка Mc(t)
xlabel('Час t, с'); %підписи осей
ylabel('Mc, Н*м');
grid; %активація сітки

```

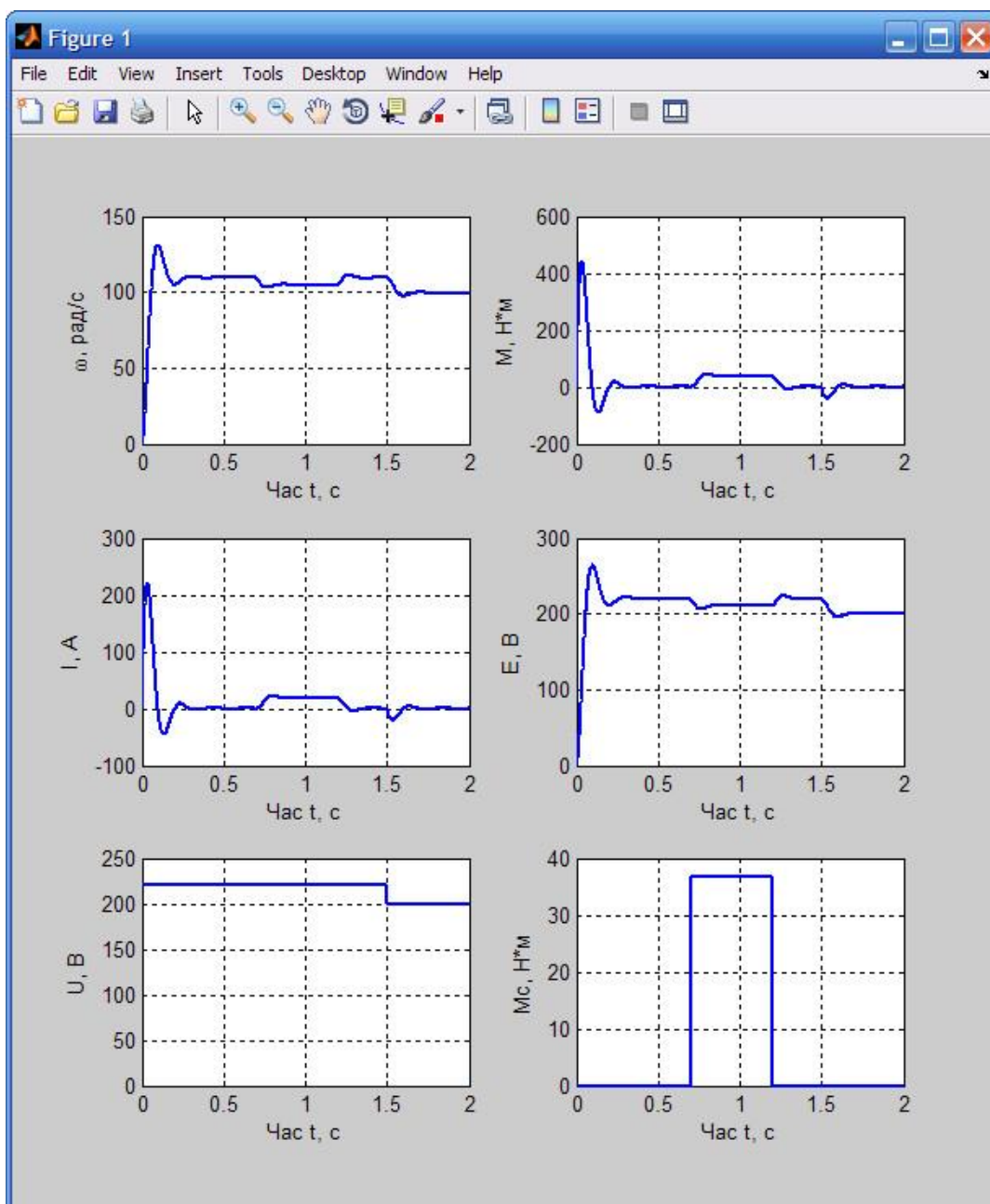


Рисунок 9.9 – Графіки перехідних процесів у двигуні постійного струму для заданих режимів роботи

10. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап – це новітній проект, який розвивається в умовах невизначеності, пошуку оптимальних бізнес ідей та їх фінансування та спрямований на розроблення інноваційних товарів або послуг, а також технологій їх виробництва.

Розробка інноваційних продуктів є актуальною як у всьому світі, так і в Україні. Кількість інноваційних ідей зростає завдяки інструментам комунікацій, які спростили систему пошуку ресурсів, технологій, інвесторів, споживачів та виробників. Ринок стартапів розвивається і поширюється. Проте успішними стають лише 10-20 % розроблених і запропонованих стартап-проектів. Важливо не тільки розробити інноваційний продукт, а й перетворити ідею проекту у працюючу бізнес-модель, яка враховує цінність продукту або послуги, сегмент споживачів, канали збуту, взаємодія з споживачами, монетизація, визначені ключові види діяльності, ресурси та партнери.[8]

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.[9]

10.1 Опис ідеї стартап-проекту

Ідеєю стартапу було обрано: вдосконалення методів розрахунку обраного типу електродвигунів

Напрямами стартапу є: системи автоматики, радіоелектроніки та телемеханіки як привод різних механізмів в обладнанні загального та спеціального призначення..

У разі реалізації проекту до потенційних вигоди слід віднести: економія на матеріалах та економічні переваги.

Таблиця 10.1. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів		сторона Слабка	сторона Нейтральна	сторона Сильна
1	ККД	0,64	0,61	+		
2	Можливість використання в інших галузях	Так	Так		+	

10.2 Технологічний аудит стартап-проекту

Таблиця 10.2. Технологічна реалізація проекту

Ідея проекту	Технологія реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Аналіз Розрахунок Впровадження	Магнітоелектричний двигун постійного струму з порожнистим ротором	Важкодоступна

10.3 Аналіз ринку та можливість старту проекту

Таблиця 10.3. Характеристика ринку

	Показник стану ринку (найменування)	Характеристики
1	Кількість конкурентів, од	1
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Стартовий капітал
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	23%

Таблиця 10.4. Характеристика потенційних клієнтів стартапу

	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Велика потреба у галузях використання	Вузько направлені спеціалізовані технічні підприємства	Залежність від державного фінансування	Енергоефективність Економічність Надійність

Таблиця 10.5. Фактори загрози

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкуренція	<p>1) Сучасні підприємства, які мають більше фінансування.</p> <p>2) Виникнення більш кращого продукту, за рахунок розвитку технології.</p>	<p>1) Патентування;</p> <p>2) збільшення інвесторних груп (які будуть дозволяти створювати конкуренцію за рахунок наймання більш кращих спеціалістів);</p> <p>3) створення дослідницького відділу, який буде спрямований на поліпшення продукту.</p>

Таблиця 4.6. Порівняння сильних та слабких сторін

Фактор конкурентоспроможності	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розробленим						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна					+		
Якість				+			
Впізнаваність	+						

Таблиця 10.7. SWOT-аналіз

<p>Сильні сторони: Допускає експлуатацію у високому діапазоні температури, тиску та вологості. Стійкий до високих вібрацій та ударних навантажень. Не велика вага та компактні розміри.</p>	<p>Слабкі сторони: Мала впізнаваність бренду Низький рівень інвестицій.</p>
<p>Можливості: Збільшення спектру галузей застосування.</p>	<p>Загрози: Збільшення конкуренції у даній сфері.</p>

10.4 Аналіз ринку та можливість старту проекту

Таблиця 10.8. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є першопрохідником на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	На початковому етапі слід сформулювати список можливих кандидатів з числа студентів та працівників інших підприємств. У подальшому створити систему, яка дозволить забирати найкращих працівників	В режимі технологічної конкуренції між компаніями по виготовленню автономних транспортних засобів якщо це не є корпоративною таємницею, по можливості вкласти договір.	Агресивна конкуренція, максимально швидкий розвиток технологій.

Таблиця 10.10. Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Ціни власного продукту становить 95% від середньої ринкової вартості	110%	Від 2 млн грн	25000 - 35000 грн

Таблиця 10.11. Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Державні закупівлі за оптовими цінами	Продаж та обслуговування	Держані канали	Власна

10.5 Висновки до розділу 4

Проведені дослідження щодо можливостей маркетингу та реалізації показали високі перспективи магнітоелектричних двигунів постійного струму з порожнистим ротором. Аналіз ринку показує зріст попиту в спеціальних підприємствах. Через це даний стартап проект є привабливим для вітчизняних та іноземних інвесторів.

Даний стартап-проект є комерційно успішним та перспективним, враховуючи потреби в сучасних обставинах. Але є перешкоди на шляху реалізації і до них слід віднести значну конкуренцію на ринку електроприладів іноземного походження, занадто мале фінансування в даній галузі, також сильною стороною компанії не є відомість торгової марки. Слід зазначити що для кожного стартап-проекту перші декілька років є важкими через конкуренцію, що хоч і не є монополістичною, але у багатьох галузях є великі компанії-монополії, які намагаються винищити або придбати молоді компанії-конкуренти. Саме через це на початковому етапі важливо мати інвесторів які будуть зацікавлені в виготовленні надійних двигунів даного типу, які зможуть фінансувати стартап до моменту формування обороту компанії.

ВИСНОВОК

1. Запропоновано комплексне поняття "високовикористаний двигун" стосовно методики його проектування та експлуатаційних вимог; встановлені причиннонаслідкові зв'язки між показниками призначення та типом застосовуваної магнітної системи, а також між синтезованими критеріями оптимальності та одержуваної при цьому геометрією поперечного перерізу двигуна з порожнистим ротором.

2. Обґрунтовано критерії ефективності магнітних систем двигунів з порожнім якорем щодо максимального використання матеріалу магніту та забезпечення максимальної щільності енергії в немагнітному зазорі, що дозволяють вибрати тип та визначити оптимальні геометричні розміри активних частин з урахуванням заданого функціонального призначення машини.

3. Встановлено оптимальні співвідношення між величиною повітряного зазору та параметрами магнітів для різних магнітних систем, що забезпечує цілеспрямоване рішення задачі високого використання двигуна, його швидкодії, економічності та ресурсу.

4. Запропоновано методи синтезу геометрії активних частин двигунів з порожнистим якорем шляхом багатофакторної оптимізації параметрів та характеристик магнітних систем за допомогою сучасних програмних засобів, а також математична модель та методика оптимізаційного розрахунку двигуна з порожнім якорем; сформовано методику оптимального проектування серії двигунів за обмотувальними даними, за стандартизованою шкалою потужностей та показниками призначення, що дає можливість виконати проектні розрахунки з урахуванням специфіки зберігання та експлуатації. Достовірність методики підтверджується результатами випробувань двигунів різного габариту та призначення.

5. Визначено способи збільшення ресурсу електродвигунів з порожнім якорем на базі застосування покриттів колектора та підбору відповідних марок щіток. Надано рекомендації щодо регламентованого мікрорельєфу та покриття

колектора, типів щіткотримачів, що забезпечує підвищення ресурсу «високовикористаних» двигунів з напрацювання та терміну зберігання.

6. Теоретично та експериментально визначено вимоги до характеристик щіткових матеріалів, мікрорельєфу поверхні колектора, багатокомпозиційним покриттям для отримання конструкції стійких до широкого комплексу механіко-кліматичних ВВФ;

7. Отримано велику кількість експериментального матеріалу, що дозволяє прогнозувати ресурс двигунів щодо збереження у різних кліматичних зонах країни, у тому числі й рекомендації щодо прискорених випробувань на напрацювання та збереження.

8. Рекомендації, отримані в роботі, спрямовані на вдосконалення конструкції електродвигуна з порожнім якорем, а розроблена методика розрахунку підтверджена досвідом проектування та промислового випуску виробів і може бути включена до системи автоматизованого проектування таких машин.

9. На підставі даних розрахунку у п. 8,6 та 8,7 впливають висновки:

- тепловий стан електродвигуна, що розраховувався, задовільний з достатнім запасом за тепловим фактором;
- розрахункові значення параметрів електродвигуна відповідають значенням, заданим ТЗ (табл. 8.1) з достатнім ступенем точності;

На закінчення слід зазначити, що наведені вище розрахункові значення електромеханічних, конструктивних і теплових параметрів підтвержені експериментально на електродвигуні типу ДПР-72-Н4-01, розробленому на основі даних табл. 8.1 і впровадженого в промислове виробництво. Це свідчить про можливість використання запропонованого методу розрахунку в практичних цілях.

За даними розрахунків була опублікована стаття [10].

ЛІТЕРАТУРА

1. Maryam Shokri, Naghi Rostami, Vahid Behjat Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Different Magnet Shapes // IEEE Transactions on Magnetics December 2015 – p. 16-24.
2. Sahib Khan. Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications [Електронний ресурс] / Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro //IEEE Access. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8918177>.
3. Кафтанатий В.Т. Синтезованні критерії оптимальності магнітних систем і магнітотвердих сплавів / Кафтанатий В.Т. 1/ Електротехніка. - 1988. - 5. С. 66-69.
4. Ferhat Daldaban, Emrah Çetin Prototyping of Axial Flux Permanent Magnet Motors // Conference: isites 15 At: Valencia. – 2015. – p. 3-9.
5. Gonzalez-Lopez A. D., Tapia A. J., Wallace R., Valenzuela A. Design and test of an axial flux permanent-magnet machine with field control capability. IEEE Transactions on magnetics. 2008. Vol. 44. № 9. P. 2168 – 2173.
6. Metin A. Design, Analysis, and Control of a Hybrid Field-Controlled Axial-Flux Permanent-Magnet Motor. IEEE Transactions on industrial electronics. 2010. № 57 (1). P. 78 – 87
7. Paplicki P. Modified concept of axial-flux permanent magnet machine with field weakening capability. Archives of electrical engineering. 2014. № 63(2), P. 177-185.
8. Що таке стартап? 2017 [online] (останнє оновлення вересень 2017) Доступно: <https://biznesua.com.ua/shho-take-startap> [Дата звернення 25.04.2018].
9. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с
- 10.