

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОМЕНТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТм-63

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Каспрук В. В.	(прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Андрійчук В. А.	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Коваль В. П.	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Коваль В. П.	(прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Микитишин А. Г.	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Каспруку Володимирі Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання характеристик моментного двигуна з постійними магнітами

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» жовтня 2024 року № 4/7-983
2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2024 року
3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
1 Аналітичний розділ
2 Проектно-конструкторський розділ
3 Розрахунково-дослідницький розділ
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Клепчик В. М. ст. викладач		
Нормоконтроль	Коваль В. П. к.т.н. доцент		

7. Дата видачі завдання 14 жовтня 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Каспрук В. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Андрійчук В. А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Каспрук В. В. Моделювання характеристик моментного двигуна з постійними магнітами. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-63. – Тернопіль: ТНТУ, 2024

сторінок. – 68, рисунків - 43; таблиць -3; джерел – 13.

У даній кваліфікаційній роботі запропоновано тип обмотки якоря електромеханічного перетворювача — стрічкову обмотку з бічними вирізами, яка підвищує ефективність тепловідведення, забезпечує високе струмове навантаження і збільшує механічний момент більш ніж у 2,5 рази. Створено кінцево-елементну модель електромеханічного перетворювача зі стрічковою обмоткою якоря, що дозволяє досліджувати залежності моменту від кута повороту ротора з урахуванням впливу струму стрічкової обмотки (реакції якоря).

Продемонстровано можливість формування необхідної силової характеристики пластини двигуна стрічкової намотки за допомогою додаткових бічних вирізів. Встановлено, що мінімальний опір пластини досягається за певного співвідношення її розмірів, що сприяє ефективній роботі моментного двигуна.

Ключові слова: моментний електродвигун, механічний момент, магнітне поле, температура, ефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Області застосування моментних двигунів.....	9
1.2 Моментні двигуни з постійними магнітами.....	11
1.3 Моментні двигуни з необмеженим кутом повороту ротора.....	13
1.4 Варіанти конструктивної реалізації моментних двигунів	15
1.5 Можливі шляхи вдосконалення моментних двигунів	16
1.6 Провідна стрічка як основа активного елемента	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	20
2.1 Пластина як елемент стрічковим намотуванням	20
2.2 Характер розподілу струму	22
2.3 Сила, що діє на джерело магнітного поля	23
2.4 Побудова залежності "сила-переміщення".....	25
2.5 Формування силової характеристики додатковими бічними вирізами .	29
2.6 Залежність електричного опору пластини розподіленого струму від її довжини.....	38
2.7 Температурні дослідження пакета пластин.....	40
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	47
3.1 Розрахунок впливу параметру намотки на величину моменту.....	47
3.2 Вибір числа витків намотки	48
3.3 Визначення відносної індукції моделі моментного двигуна.....	49
3.4 Розрахунок відносного опору	53
3.5 Розрахунок відносного моменту та потужності від кількості пар полюсів	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	60
4.1 Фактори, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом	60
4.2 Організаційні заходи з електробезпеки	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	67

ВСТУП

Актуальність теми роботи. В даний час у багатьох технічних системах застосовуються моментні двигуни вбудовані в механізми, від яких вимагається забезпечення високої точності та хороших динамічних характеристик. Застосування моментних двигунів зумовлене тим, що вони дозволяють відмовитися від редуктора, який є складним, дорогим елементом, що знижує надійність системи.

Електродвигуни прямого (безредукторного) приводу називаються "моментними". Зовні вони відрізняються від двигунів класичного виконання, тому що не мають корпусу, валу, підшипників а споживачеві поставляються у вигляді двох вузлів: ротора та статора. Слово «моментний» у позначенні такого двигуна має два смислові поняття. По-перше, це означає, що двигун призначений для створення моменту при роботі на низьких, практично нульових швидкостях повороту об'єкта управління (загальмований режим роботи двигуна); по-друге, до моментних відносять електродвигуни, оптимізовані за питомим моментом. Вважається, що найбільш перспективними є моментні вентильні двигуни з постійними магнітами, що характеризуються лінійними механічними та регулювальними характеристиками, високою швидкодією, надійністю, великим терміном служби, особливо у важких та екстремальних умовах експлуатації систем авіаційної, космічної та морської техніки.

Заміна в електромеханічному перетворювачі традиційної обмотки, виконаної обмотувальним дротом, на обмотку зі стрічки з бічними вірізами дозволяє підвищити питомі характеристики електромеханічного перетворювача та отримати бажані функціональні залежності "момент-кут повороту ротора". У зв'язку з цим **актуальним** є завдання вдосконалення існуючих конструкцій двигунів, яке можна вирішити як використанням сучасних матеріалів, так і застосуванням нових конструктивних та технологічних методів, наприклад використанням висококоерцитивних

магнітних матеріалів, спеціальних обмоток, зміною магнітної системи ротора. Таким чином, удосконалення електромеханічних перетворювачів шляхом використання спеціальної обмотки стрічкового типу, що дозволяє отримати покращені характеристики моментного двигуна, є актуальним та своєчасним завданням.

Метою роботи є, розробка електромеханічного перетворювача з стрічковою обмоткою якоря, що має покращені характеристики.

Відповідно до поставленої мети були сформульовані такі **завдання дослідження**:

1. Аналіз сучасного стану моментних двигунів з постійними магнітами та перспектив їх розвитку для визначення типів конструкцій моментних двигунів, що забезпечують високі питомі показники.

2. Обґрунтування можливості застосування в якості безпазової обмотки якоря стрічкової обмотки (намотки) та розробка математичних моделей моментного двигуна.

3. Розробка, на основі результатів досліджень математичної моделі електромеханічного перетворювача зі стрічковою обмоткою якоря, рекомендацій щодо вибору геометричних параметрів стрічкової обмотки, що забезпечують покращені характеристики моментного двигуна.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення електричної енергії в механічну

Предмет дослідження: імітаційна модель моментного електродвигуна.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено кінцево-елементну модель електромеханічного перетворювача зі стрічковою обмоткою якоря, що дозволяє визначити та дослідити залежності моменту від кута повороту ротора, з урахуванням дії струму стрічкової обмотки (реакції якоря).

2. Встановлено вплив геометричних параметрів стрічкової обмотки якоря електромеханічного перетворювача (співвідношення довжини і ширини пластини) на механічний момент.

Практична цінність результатів дослідження: Запропоновано тип стрічкової обмотки як варіант активного елемента електромеханічного перетворювача, що дозволяє застосувати нові конструкторсько-технологічні рішення при розробці та виробництві якорів моментних двигунів.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2024 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Області застосування моментних двигунів

Підвищені вимоги до регульованих електроприводів, які поставлені перед російською промисловістю на найближчий час, визначають, крім вдосконалення продукції, що випускається, створення нової з вищими якісними показниками. Зокрема, моментні двигуни досить поширені в системах автоматики.

Моментним двигуном традиційно називався електромеханічний перетворювач, у якого на вхід подається електричний сигнал постійного чи змінного струму, а виходом є електромагнітний момент; при цьому в робочому режимі ротор двигуна або нерухомий, або обертається, але з малою частотою [70]. Нині термін "моментний двигун" складаються два поняття. З одного боку, це означає, що електродвигун призначений для створення моменту під час роботи на наднизьких швидкостях повороту навантаження; з іншого, вважається, що двигун оптимізований за питомим моментом, що розвивається на одиницю маси, об'єму або споживаної з мережі потужності [58].

Як перспективні області застосування моментних приводів необхідно звернути увагу на такі [4, 6, 22, 23, 45, 47, 58, 79, 89-92]:

- швидкодіючі системи кутової стабілізації високої точності з динамічною помилкою не більше 1 кутової хвилини;
- системи з підвищеними показниками надійності та терміну служби (з напрацюванням на відмову понад $50 \cdot 10^3$ год), у тому числі ті, що працюють в особливо важких умовах експлуатації;
- виконавчі системи робіт та маніпуляторів;
- регульований привід у медичному приладобудуванні (апарати "штучна нирка", примусового кровообігу);
- приводи мотор-колес електрифікованих транспортних засобів;
- системи створення регульованого навантаження у спортивних тренажерах;

- товари побутового призначення (пральні машини, кухонні комбайни та ін.).\

Окремо необхідно розглядати питання щодо застосування моментних приводів у спеціальній техніці (оборона, космос), де вимоги до точності та надійності стоять на першому місці [46, 55].

Зазначається, що особливу увагу до моментних двигунів було звернено, коли наявність у складі приводу механічного редуктора стала суттєвим обмеженням точності та експлуатаційних характеристик. В даний час електропривод, в якому механічний редуктор виключено, прийнято називати "прямим приводом" [4-6, 45, 57, 58, 87, 90-92, 98].

Виходячи з перспективних областей застосування моментних двигунів, виділимо основні вимоги до них:

1 Габарити та маса моментного двигуна повинні бути можливо меншими. Однак у ряді випадків моментні двигуни не мають власних валів і підшипників, будучи тим самим вбудовується в систему конструкцією; а деякі його розміри визначаються загальним компонованням системи [9, 69, 76].

2 Потужність, що споживається моментним двигуном, повинна бути мінімальною. Ця вимога з нагріванням моментного двигуна, і, отже, зі стабільністю характеристик машини.

3 Стабільність моменту в межах робочого діапазону кутів повороту ротора та його лінійна залежність від сигналу керування.

4 Порогова чутливість системи, що містить моментний двигун, має бути досить високою [69].

5 Електромеханічна та електромагнітна постійні часу моментного двигуна повинні бути можливо меншими. Ці параметри забезпечують швидкодію системи з моментним двигуном та виключають її нестійкість.

Моментні двигуни можна класифікувати за призначенням, принципом дії, родом струму та конструктивним виконанням. За способом створення основного магнітного потоку моментні двигуни виконуються з збудженням від постійних магнітів та електромагнітного збудження. Також моментні

двигуни розрізняються розташуванням якірної обмотки: на роторі або статорі; кількістю пар полюсів; способом подачі струму в обмотку управління (колекторні, вентильні або з гнучкими струмопідведення); робочим діапазоном кутів повороту ротора та багатьма іншими ознаками. Детальний опис класифікації моментних двигунів наведено у [69, 70].

1.2 Моментні двигуни з постійними магнітами

Залежно від принципу дії моментні двигуни постійного струму виконуються як моментні двигуни з постійними магнітами, як електромагнітні моментні двигуни, як електродинамічні моментні двигуни та як поляризовані моментні двигуни [70].

Серед моментних двигунів постійного струму найбільшого поширення набули моментні двигуни з постійними магнітами, які також називають магнітоелектричними. Моментні двигуни із постійними магнітами характеризуються малим споживанням потужності на одиницю моменту, оскільки основний магнітний потік двигуна забезпечується за допомогою постійних магнітів. Залежність електромагнітного моменту моментного двигуна з постійними магнітами від сигналу в обмотці управління близька до лінійної. Магнітоелектричний двигун працює на постійному струмі. Величина та знак моменту залежать від величини та полярності струму управління, що протікає в обмотці рамки двигуна.

Моментні двигуни з постійними магнітами є магнітоелектричною системою (рисунок 1.1), що складається з постійного магніту з магнітопроводом і котушки, розташованої в магнітному полі повітряного зазору системи [62].

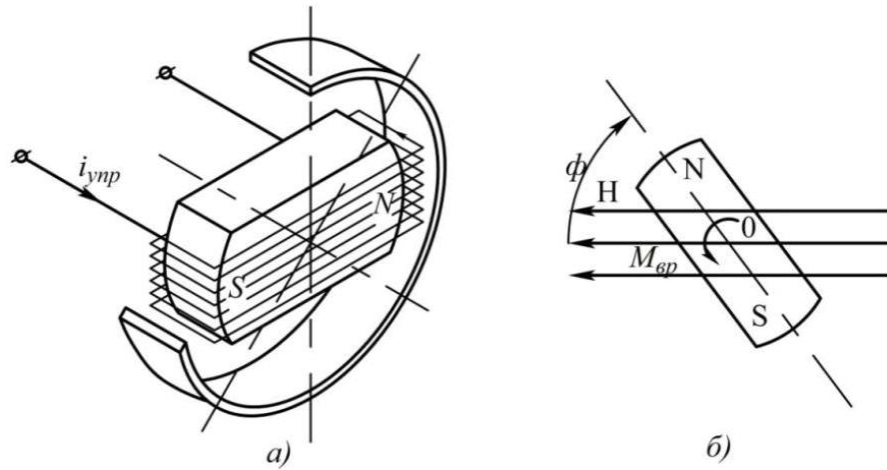


Рисунок 1.1 – Моментний двигун з постійними магнітами:

а - схема магнітоелектричного моментного двигуна; б – взаємодія постійного магніту із зовнішнім полем

Сила, що діє на провідник зі струмом, поміщений у магнітне поле визначається виразом $F_{em} = B \cdot l_p \cdot I$ і спрямована перпендикулярно до площини, утвореної провідником та напрямом магнітного поля. В даному випадку B - індукція магнітного поля у повітряному зазорі; l_p - робоча довжина провідника; I - сила струму. Так як котушка двигуна має W витків, то сумарна електромагнітна сила, що діє на всі витки котушки, розташовані в повітряному зазорі під одним полюсом дорівнюватиме $F_w = B \cdot l_p \cdot W \cdot I$. Для схеми моментного двигуна на витки котушки, розташовані в повітряному зазорі під протилежними полюсами магніту, діє та ж сумарна електромагнітна сила $F_{em} = B \cdot l_p \cdot W \cdot I$, але вона спрямована в протилежному напрямку. Ця пара сил створює щодо осі рамки момент $M = 2B \cdot l_p \cdot W \cdot I \cdot R_r$, де R_r радіус, від осі обертання рамки до середини намотування котушки. Індукція в повітряному зазорі двигуна розподілена згідно із законом, близьким до косінусоїдального: $B = B_0 \cos \beta$, де B_0 - індукція у повітряному зазорі під центральною частиною магніту. Як постійні магніти в магнітоелектричних моментних двигунах застосовуються висококоерцитивні рідкісноземельні магніти [13, 24].

Конструктивне оформлення магнітоелектричних моментних двигунів буває двох типів: з рухомою обмоткою та з магнітами на роторі. У першому випадку основний магнітний потік створюється нерухомою магнітною системою [7]. Такі моментні двигуни мають малу потужність управління і високу чутливість. У другому випадку індуктор моментного двигуна розташований на роторі, що призводить до відсутності необхідності струмопідведення до частини машини, що обертається.

В [5] наведено варіант класифікації магнітоелектричних моментних двигунів по робочому діапазону кутів повороту ротора, а також розглянуті основні конструкції таких двигунів з обмеженим і необмеженим кутом повороту ротора. Слід зазначити, що з функціональним можливостям моментні двигуни з необмеженим кутом повороту ротора знаходять ширше застосування [1, 2, 4, 6].

1.3 Моментні двигуни з необмеженим кутом повороту ротора

Розглянемо вентильні моментні двигуни з необмеженим кутом повороту ротора та з безперервною або дискретною комутацією секцій обмотки керування. Вентильний моментний двигун з необмеженим кутом повороту ротора є поєднанням синхронної електричної машини, датчика положення ротора і схеми управління струмами електричної машини. Синхронна електрична машина має ротор-індуктор з постійними магнітами або з обмоткою збудження, що живиться постійним струмом через контактні кільця або від випрямляча, що обертається. Статор має дво- або трифазну обмотку, що живиться від підсилювачів потужності схеми керування. В якості датчика положення використовуються синусно-косинусні обертові трансформатори, сельсини та інші інформаційні мікромашини, у яких змінні вихідні напруги мають огинають, що змінюються за синусоїдальним законом функції від кута повороту ротора зі зсувом по фазі, відповідним просторовому зсуву машин синхронної. Знаходять застосування ємнісні датчики зі змінною вихідною

напругою та з цифровим виходом, датчики з дроселями насичення та датчики Холла [3, 5, 15, 70].

Схема управління має фазочутливі випрямлячі з фільтрами низької частоти та підсилювачі потужності, в деяких випадках охоплені негативним зворотним зв'язком по струму. Схема управління може містити функціональні перетворювачі електричної компенсації конструктивної недосконалості електричної машини.

На рисунку 1.2,а [70] зображено магнітний ланцюг шестиполюсного моментного двигуна з постійними магнітами. Ротор містить 1 шість постійних магнітів 2, розміщених на магнітно-м'якому корпусі; статор 3 може мати зубцово-пазову зону та кільцеву або барабанну обмотку управління. Постійні магніти немає полюсних наконечників, тому індукція у зоні полюсів, отже, і момент щодо великі. Наявність великої кількості полюсів дозволяє дещо знизити розміри та масу двигуна. У зверненому варіанті конструкція використовується і в моментному колекторному двигуні.

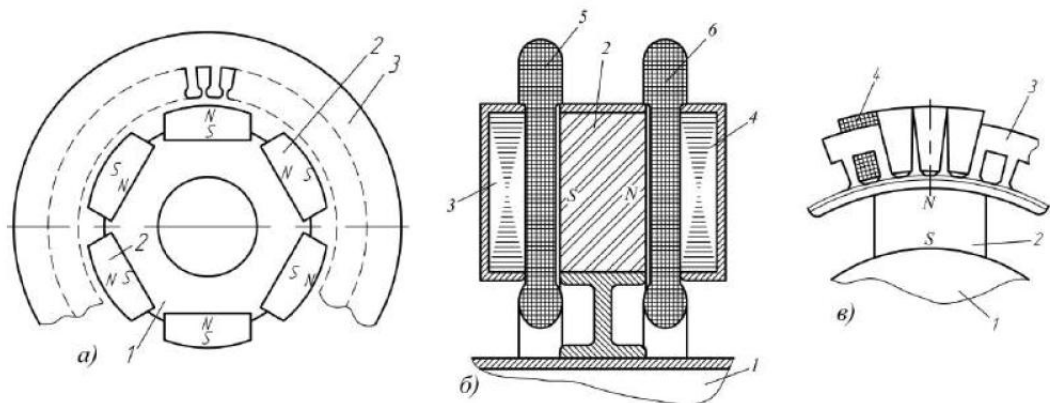


Рисунок 1.2 – Багатополюсні моментні двигуни з постійними магнітами: а – шестиполіусний; б - багатополюсний торцевий; в – багатополюсний з кільцевою обмоткою управління.

На малюнку 1.2 б показана конструкція багатополюсного торцевого моментного двигуна з постійними магнітами. На роторі 1 розташовані постійні магніти 2 з полярністю, що чергується по довжині кола ротора. Права та ліва

половини 3 та 4 шихтованого статора містять синусні обмотки 5 та 6, розташовані в радіальних пазах.

На малюнку 1.2 показаний багатополісний моментний двигун з постійними магнітами, у якого з метою скорочення осьової довжини використовується кільцева обмотка управління. Обмотка розміщується на зубчастому статорі 3. Індуктор виконаний за допомогою радіально постійних намагнічених магнітів, має полюсні наконечники і розташовується на роторі. [70].

1.4 Варіанти конструктивної реалізації моментних двигунів

Слід зазначити, що моментні двигуни прямих приводів суттєво відрізняються від класичних електродвигунів, оскільки не мають корпусу, валу та підшипників, і поставляються у вигляді двох вузлів: ротора та статора, що мають форму плоских кілець, які монтуються в елементи приводу (рисунок 1.3) [58].



Рисунок 1.3 – Традиційна конструкція моментних двигунів

Вказана обставина дає розробнику приводу непогані можливості створення оптимальної, пристосованої для конкретних умов, конструкції (рисунок 1.4).

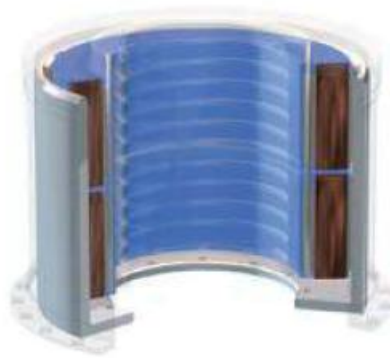


Рисунок 1.4 – Об'єднання двох моментних двигунів з метою збільшення моменту

Безконтактні моментні двигуни з постійними магнітами на роторі знаходять широке застосування в оборонній техніці, промисловості, побуті внаслідок їх досить непоганих експлуатаційних характеристик [1, 2, 4-6, 79, 90, 91].

1.5 Можливі шляхи вдосконалення моментних двигунів

У першу чергу, при постановці завдання вдосконалення будь-якого виробу необхідно провести відповідний аналіз, вибрати оптимальні шляхи досягнення бажаної досконалості. Стосовно моментного двигуна можна вказати такі напрями та шляхи дослідження та вдосконалення:

- застосування нових магнітних матеріалів;
- зміна конструкції ротора;
- використання нових типів обмоток.

В електричних машинах нових серій застосовуються термостабільні постійні магніти Ne-Fe-B із спеціальними легуючими добавками, що дозволяють підвищити коерцитивну силу та зберегти магнітні властивості при значному нагріванні. Дані аспекти сприяють покращенню питомих показників машини та зменшенню собівартості магнітних матеріалів. Проте зазначається, що це вітчизняні марки магнітів неодим-железо-бор доки забезпечують рівні

довговічності, стійкості до спецфакторам і температурної стабільності, необхідних багатьох об'єктів спеціальної техніки [24].

Дещо докладніше необхідно зупинитися на розгляді обмоток моментних двигунів. Для переважної більшості безконтактних моментних двигунів з постійними магнітами обмотка якоря розташована на статорі. У робочому режимі двигуна, коли його ротор практично нерухомий, енергія, що підводиться до нього з мережі, майже повністю виділяється у вигляді тепла в обмотках двигуна. Цей режим відповідає пусковому режиму (або короткого замикання) звичайних електродвигунів, що обертаються. З чого можна зробити висновок, що моментні двигуни потребують більш надійної системи охолодження і тому програють в масогабаритних показниках у порівнянні зі звичайними електродвигунами, що обертаються, з таким же моментом.

Статор моментного двигуна може мати два конструктивні виконання: пазовий (slotted) та гладкий (slotless) (рисунок 1.5) [90]. У першому випадку обмотка розташована як у більшості електричних машин у пазах осердя. Гладкий статор має обмотку, що розміщується на немагнітному підставі, або обмотувальна структура створюється компаундування обмотки, попередньо виконаної на шаблоні.

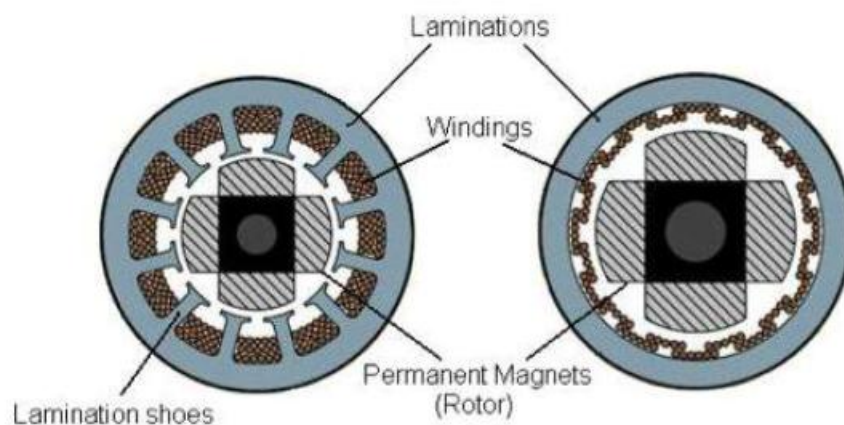


Рисунок 1.5 – Види обмоток статора моментного двигуна

Електродвигуни з гладким статором створюють менший крутний момент, ніж з пазовим статором, проте пульсації крутного моменту по куту повороту ротора у них значно менше. Крім того, нелінійність залежності максимального статичного синхронізуючого моменту від споживаного струму у двигунів з гладким статором також менше, ніж відповідна характеристика двигуна з пазовим статором. У двигуна з гладким статором відсутня реактивний залишковий момент [100, 101]. Зазначені обставини призводять до того, що двигуни з гладким статором широко застосовуються в прецизійних системах приладів [43].

Типи якірних обмоток, що застосовуються в моментних двигунах, ті самі, що і в традиційних електродвигунах. Обмотки можуть бути кільцевими, барабанными, зосередженими, розподіленими, ромбоподібними (діагональними) та ін. Аналіз існуючих обмоток та їх вплив на характеристики електродвигунів проведено у ряді наукових джерел [43, 82, 88, 102]. Досить повно та докладно ці питання розглядаються, зокрема, у роботах [8, 64, 75].

Напрацювання в конструюванні моментних приводів, систем управління ними, застосуванні нових матеріалів – певною мірою дозволять поліпшити якісні показники нових систем, що розробляються. Однак не виключається ймовірність того, що традиційні рішення до розробки моментних двигунів можуть наблизитися до своєї межі, коли їх характеристики практично не можна буде значно покращити. І тут виникне необхідність нових конструктивних підходів.

1.6 Провідна стрічка як основа активного елемента

Як зазначалося вище, збільшення моменту, що розвивається двигуном, можна домогтися підвищенням струму, що протікає через обмотку якоря. Слід зазначити, що реакція якоря в двигунах з ротором, що складається з висококоерцитивних рідкісноземельних магнітів, є незначною [13]. Однак підвищення струму буде обмежено максимально допустимою щільністю струму обмотки та тепловим опором, що залежить від перерізу дроту, варіанта

її укладання в пазах якоря та пазової ізоляції. Таким чином, підвищення струму з метою збільшення моменту на валу двигуна може призвести до руйнування дроту обмотки. На основі аналізу різних конструктивних рішень, якими характеризуються сучасні моментні двигуни, було прийнято рішення запропонувати такий варіант обмотки, при якому тепло, що виділяється в обмотці, по шляху мінімального теплового опору скидалося на корпус двигуна.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Пластина як елемент стрічковим намотуванням

На рисунку 2.1 представлена прямокутна однорідна пластина, виготовлена з електропровідного матеріалу та підключена до електричного ланцюга в точках, розташованих у вершинах її діагоналі.

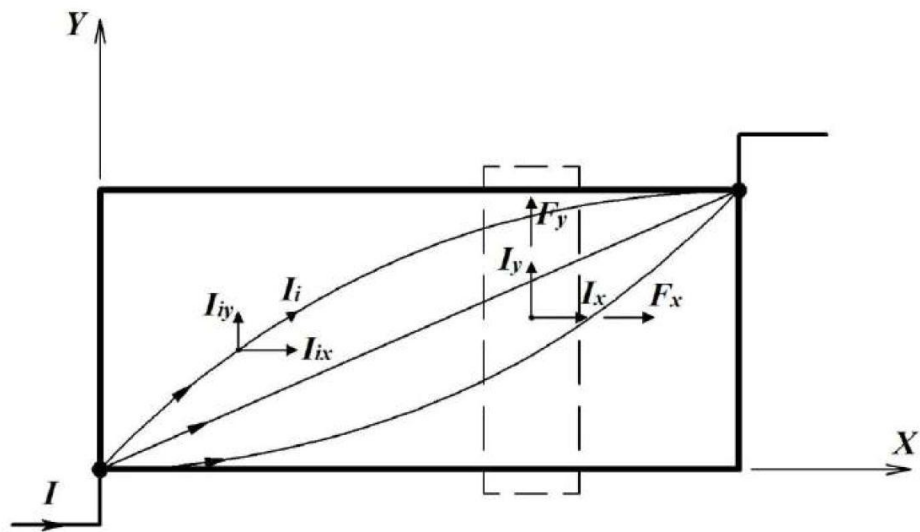


Рисунок 2.1 – Електропровідна пластина

Розподілений струм, що протікає через пластину, будуть складати струми I_i , що мають в кожній точці дві компоненти I_{ix} і I_{iy} . Підсумовування струмів, що протікають у зоні дії магнітного потоку пристрою, виділеного штриховою лінією, покаже, що в цій галузі протікають дві складові повного струму I_x і I_y . При цьому значення складових визначатимуться геометрією пластини. Струм I_y , взаємодіючи з джерелом магнітного поля, створює силу F_x , спрямовану осі X , а струм I_x – силу F_y , спрямовану осі Y . Дані сили викликать взаємне переміщення пластини і джерела магнітного поля. При цьому дія сили F_y , створюваної струмом I_x , компенсуватиметься в опорах підвісу джерела магнітного поля, а сила F_x , викликана струмом I_y , буде створювати необхідну силу для роботи двигуна. сила може бути збільшена послідовним електричним підключенням декількох аналогічних пластин, які

формується в єдиний пакет так, щоб їх поверхні були паралельні і розділені ізолятором. Ефективність такого пакетного елемента буде пропорційна кількості пластин.

Декілька послідовно з'єднаних і розташованих уздовж кола пакетних елементів, що володіють ідентичними характеристиками і що знаходяться під дією одного полюса магнітної системи електродвигуна [6], було запропоновано назвати стрічковим намотуванням або активним стрічковим елементом, так як для виготовлення намотування запропоновано використовувати тонку електропровідну стрічку. На рисунку 2.2 наведено розгорнення стрічкового намотування.

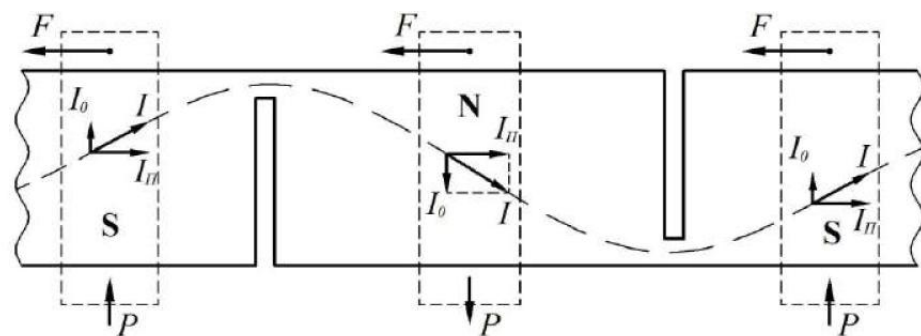


Рисунок 2.2 – Розгортання стрічкового намотування

Як вказувалося раніше, розподілений струм I матиме дві компоненти, в даному випадку, поздовжню I_n і осьову I_0 [6]. Передбачається, що полюси магнітної системи ротора двигуна N і S знаходяться над площиною 2.2. При цьому сила F , що діє на джерело магнітного поля, з'являтиметься при взаємодії осьових компонент струму I_0 з магнітним полем, а сумарна дія цих сил викликає появу моменту, який прагнуче повернути магнітну систему щодо стрічкової намотування, яка нерухома і пов'язана з корпусом двигуна. Сили P , викликані поздовжніми компонентами повного струму I_n будуть діяти з боку магніту на опори його підвісу. За однієї пари полюсів магнітної системи ці сили створять радіальне навантаження на опори підвісу двигуна. При більшій кількості пар полюсів відбуватиметься взаємна компенсація цих сил в осьовому напрямку, і відсутнє радіальне навантаження на опори підвісу

двигуна. У разі незмінної величини струму, що розвивається двигуном, момент M буде залежати від числа витків стрічкової намотування N .

2.2 Характер розподілу струму

Оскільки величина сили, що розвивається двигуном з пакетним елементом, та її напрямок визначаються значенням та напрямком еквівалентного струму I , а також значенням та напрямком вектора індукції B , то звідси випливає, що основним завданням є визначення характеру розподілу струму, що протікає по пластині.

Реальний характер протікання струму пластиною має складний вигляд. Повний струм, що протікає по пластині, виконаної з однорідного матеріалу і що має у всіх її точках постійну товщину, є розподіленим. Характер його розподілу описується рівняннями у приватних похідних [12, 56, 72]. Сучасним прийомом чисельного розв'язання таких рівнянь методом кінцевих елементів використання програмного продукту COMSOL Multiphysics [51, 81].

Для вирішення завдання характеру розподілу струму по пластині COMSOL пропонує ряд диференціальних рівнянь у приватних похідних [81]

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (0.1)$$

$$J = \sigma E + J_e, \quad (0.2)$$

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (0.3)$$

Наведені рівняння відносяться до рівнянь Максвелла. Рівняння Максвелла є набір рівнянь в інтегральній або диференціальній формі, що встановлюють взаємодію між фундаментальними електромагнітними величинами. До них відносяться:

- напруженість електричного поля E ;
- електричне зміщення D ;
- напруженість магнітного поля H ;
- індукція магнітного потоку B ;

- густина струму J ;
- густина електричного заряду ρ .

Вираз (2.1) є диференційною формою рівняння неперервності. Якщо струми постійні, всі електричні величини залежить від часу й у рівнянні неперервності потрібно покласти $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ рівним нулю. Тоді $\nabla \cdot J = 0$, отже, у разі постійного струму вектор J не має джерел. Це означає, що лінії струму ніде не починаються і ніде не закінчуються, тобто замкнуті.

Співвідношення (2.2) виходить шляхом узагальнення виразу щільності струму при введенні зовнішнього джерела J_e .

Вираз (2.3) формулює проблему з погляду електричного скалярного потенціалу V та векторного магнітного потенціалу A .

В результаті чисельного моделювання завдання розподілу струму, що протікає через тонку електропровідну пластину, у модулі Electric Currents COMSOL Multiphysics отримано вид ліній струму, наведений рисунку 2.3.

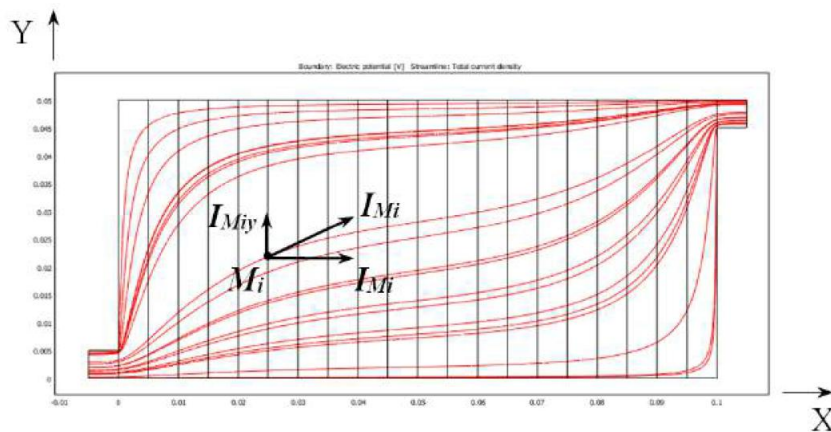


Рисунок 2.3 – Розподілений струм, що протікає по пластині

2.3 Сила, що діє на джерело магнітного поля

У кожній точці M_i пластини елемент струму I_{M_i} має дві компоненти: поздовжню $I_{M_{ix}}$ та поперечну $I_{M_{iy}}$ (рисунок 2.3). Якщо розглянути сумарну дію таких компонентів, що знаходяться в зоні дії потоку постійного магніту з

індукцією B , нормально спрямованого до поверхні пластини, то струм $I_x = \sum_{i=1}^n I_{Mix}$ викличе механічну силу F_y , що діє вздовж осі Y (поперек пластини), а струм $I_y = \sum_{i=1}^n I_{Miy}$ викличе силу F_x , що діє вздовж пластини і необхідну для роботи двигуна. Надалі розглядатимемо тільки дію сили F_x і струму, що її викликав, I_y , який будемо називати "поперечним".

У кожній точці пластини струм визначається деякою щільністю струму $j(x, y)$, яка залежить від характеру розподілу струму пластиною. Виберемо точку $M(x_M, y_M)$, що лежить на поверхні пластини (рисунок 2.4).

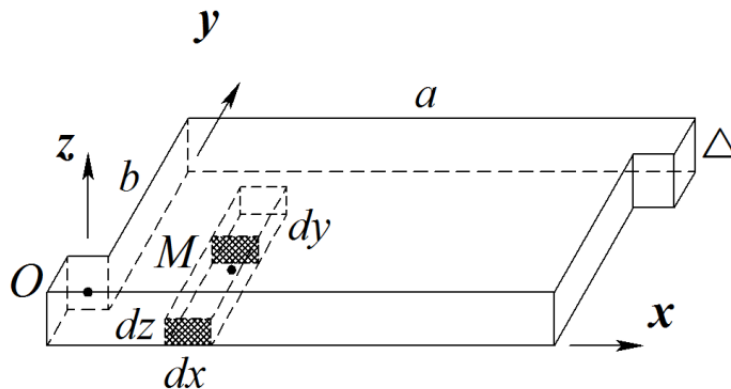


Рисунок 2.4 – Елемент струму на околиці точки M

У цій точці є елемент струму, щільність якого характеризується величинами j_{Mx} та j_{My} . Вважаємо, що щільності струму будуть такими ж у точках з координатами x_M та y_M у всіх шарах пластини. Величина струму, що протікає по елементарному перерізі $dx \cdot dz$ (рисунок 2.4) у напрямку осі O_y визначиться як $j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz$. В даному випадку вісь O_z спрямована вздовж товщини пластини. В околиці обраної точки M виберемо елемент струму на ділянці dy : $j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz \cdot dy$.

Елементарна сила dF_x , що створюється вказаним елементом струму в магнітному полі з індукцією B , спрямована по осі Ox , виражена таким чином

$$dF_x = B j_{My}(x, y) dx dy dz. \quad (0.4)$$

Сила, створювана сукупністю елементів струму, що знаходяться на околицях усіх точок, що належать зоні дії магнітного потоку, визначиться як:

$$F_x = B \int_{x-c/2}^{x+c/2} \int_0^b \int_0^\Delta j_y(x, y) dx dy dz. \quad (0.5)$$

Будемо вважати, що індукція магнітного потоку B незмінна в усіх точках. По осі Ox розглядається діапазон від $x - c/2$ до $x + c/2$, по осі Oy – діапазон від 0 до b ; по осі Oz - діапазон від 0 до Δ . Тут b – ширина пластини, Δ – її товщина, c – ширина постійного магніту (вважаємо, що переріз магнітного потоку, що пронизує пластину, відповідає геометрії магніту).

Якщо врахувати зауваження, що компонент густини струму j_y одна і та ж для точок з однаковими координатами (x_i, y_i) , що лежать у всіх шарах пластини, тобто не залежить від координати z , вираз (2.4) запишемо у вигляді:

$$F_x = B \Delta \int_{x-c/2}^{x+c/2} \int_0^b j_y(x, y) dx dy. \quad (0.6)$$

Надалі для спрощення запису подвійного інтеграла у виразі (2.5) введемо позначення

$$D(x, y) = \int_{x-c/2}^{x+c/2} \int_0^b j_y(x, y) dx dy. \quad (0.7)$$

Основною проблемою при розрахунку сили, згідно з виразом (2.5) є визначення величини подвійного інтеграла від компоненти густини струму.

2.4 Побудова залежності "сила-переміщення".

Спочатку завдання побудови залежності "сила-переміщення" вирішувалося якісно, з використанням законів електростатики [36]. При цьому було виявлено лише тенденцію зміни сили; необхідні математичні вирази для отримання цієї залежності в практичних цілях отримати не вдалося. Надалі

побудові залежності сили F_x , що розвивається двигуном по довжині пакета, був використаний COMSOL Multiphysics [81].

У процесі аналітичних комп'ютерних досліджень ставилася геометрія реальної пластини. Геометричний опис пластини складався з окремих підобластей, об'єднуючи які можна моделювати взаємне розташування магніту щодо пластини (рисунк 2.5). В даному випадку пластина розбита на 20 підобластей, що йдуть одина за одною у напрямку переміщення магніту; магнітний потік пронизує одночасно 4 підобласті. На рисунку 2.5 дію магнітного потоку виділено кольором, показано четверте положення магніту.

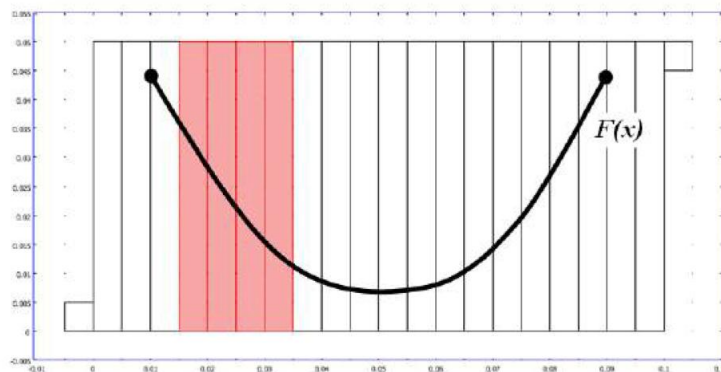


Рисунок 2.5 – Характер розбиття пластини на підобласті інтегрування

В результаті інтегрування та подальшої обробки результатів отримано залежність розподілу сили, що створюється взаємодією розподіленого по пластині струму та постійного магніту – джерела магнітного поля. На рисунку 2.5 така залежність представлена кривою $F(x)$, накладеною на габарити пластини. Крайні точки цієї кривої відповідають випадку, коли джерело магнітного поля перебуває біля країв пластини.

Для макету моментного двигуна з стрічковим намотуванням, була побудована характеристика "момент-кут повороту" чисельним методом, запропонованим вище. Вид отриманої характеристики представлений рисунку 2.6 кривою 1. На цьому ж рисунку наведена характеристика, отримана експериментально (крива 2) з достовірністю 90%.

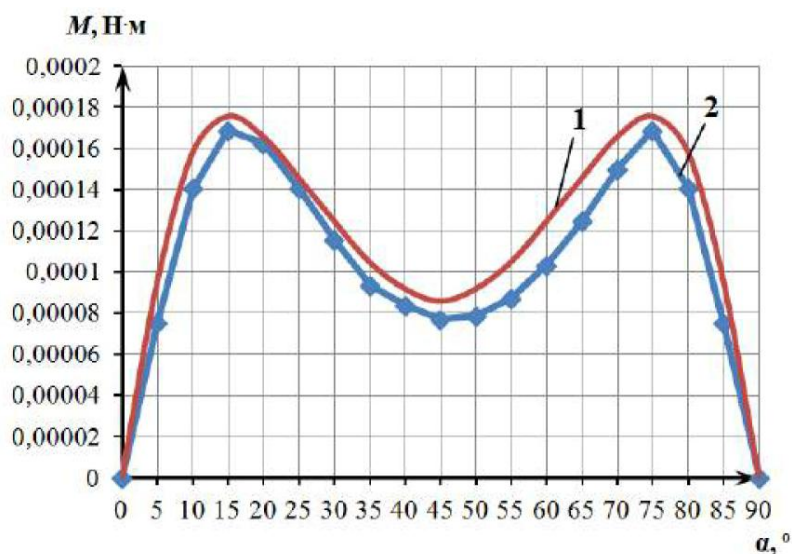


Рисунок 2.6 – Характеристики "момент-кут повороту ротора", отримані чисельним методом та експериментально

Запропонований прийом може бути застосований за умови, що магнітне поле біля полюса є однорідним. Насправді воно є неоднорідним. Розглянемо прийом отримання залежності сили від переміщення магніту полюса. При цьому необхідно розбити площу перерізу потоку, що пронизує пластину на ряд підобластей (осередків), у кожній з яких можна вважати, що компонента індукції, нормальна до площини пластини, одна і та ж практично у всіх точках комірки. Такі самі по геометрії осередки вибираються і на поверхні пластини при визначенні величин подвійних інтегралів густини струму. Потім проводиться обчислення сили, що створюється сукупністю дії потоків та струмів усіх вибраних осередків. Довжина осередків (вздовж довжини пластини) визначається мінімально можливим кроком переміщення полюса; ширина може бути різною, але для підвищення точності розрахунків бажано її мати як найменшою.

Незважаючи на всі спроби конструктивними прийомами зосередити магнітний потік електричної машини строго під полюсом, цей потік фактично буде розподілений на всю довжину полюсного поділу, тобто на всю довжину пластини. Так як крива залежності сили від переміщення може бути

побудована шляхом покрокового переміщення магніту, розміри осередків, пов'язані з магнітним потоком і з пластиною, повинні бути однаковими. На рисунку 2.7 наведено таблицю, що відображає величини індукції B_{ij} і подвійного інтеграла D_{ij} у кожному обраному осередку. У цьому випадку i – номер осередку по довжині пластини, j – по ширині пластини; $i(1,2,...n)$, $j(1,2,...m)$.

B_{11} / D_{11}	B_{21} / D_{21}	...	B_{i1} / D_{i1}	...	B_{n1} / D_{n1}
B_{12} / D_{12}	B_{22} / D_{22}	...	B_{i2} / D_{i2}	...	B_{n2} / D_{n2}
...	...	...	...	...	...
B_{1j} / D_{1j}	B_{2j} / D_{2j}	...	B_{ij} / D_{ij}	...	B_{nj} / D_{nj}

Рисунок 2.7 – Зв'язок величин індукції та подвійних інтегралів обраних осередків

Наведений у таблиці зв'язок відповідає випадку, коли магніт, а точніше його центр, перебуває у центрі пластини. При довжині пластини, що дорівнює a , це положення відповідає $(a/2)$. Сила, що розвивається при цьому, визначиться як

$$F_0 = \Delta \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} D_{ij}.$$

Наступне значення сили можна буде визначити в точці, що розташована від центру праворуч на відстані a_j , що дорівнює довжині вибраної комірки. При даних зауваженнях $a_j = a / n$. Після заданого таким чином переміщення магніту, значення сили, що створюється в точці $a / 2 + a_j$ визначиться як

$$F_1 = \Delta \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} D_{(i+1), j}.$$

Індекс "1" у позначення сили вказує на те, що зроблено перший крок переміщення. Розмірковуючи подібним чином, на N-му кроці отримаємо

$$F_N = \Delta \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} D_{(i+N), j}.$$

Аналогічно можна отримати значення діючої сили і при переміщення магніту вліво від центру пластини. Наведені вище міркування зроблено за таких припущень:

- при протіканні по пластині постійного струму значення подвійних інтегралів у кожному осередку залишаються незмінними;
- величини індукції в комірках за всіх положень магніту також не змінюються.

Останнє припущення можливе лише за умови ігнорування впливу струму пластини на магнітний потік (реакції якоря). При протіканні значних струмів по пластині ефект реакції якоря повинен враховуватися.

2.5 Формування силової характеристики додатковими бічними вирізами

У практичних цілях характеристика сили, отримана на рисунку 2.5, не завжди буде відповідати необхідним вимогам. При вирішенні конкретної задачі може виникнути потреба у формуванні необхідної функціональної залежності сили, яка найбільш повно задовольняє вимогам даного завдання. Розглянемо варіанти формування необхідної залежності силової характеристики за допомогою додаткових бічних вирізів.

У роботах [67, 73, 83] експериментально показано, що за допомогою бічних вирізів у пластині можна змінювати вигляд силової характеристики.

У представленому нижче виразі для сили $F_x(x)$, такі величини як індукція B , сила зосередженого струму I і ширина магніту c постійні. Сила в кожній точці з координатою x_i залежить від кута нахилу струмової лінії до осі абсцис (рисунок 2.8).

$$F_{x_i} = B \cdot I \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha_i$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{F_{x_i}}{B \cdot I \cdot c}.$$

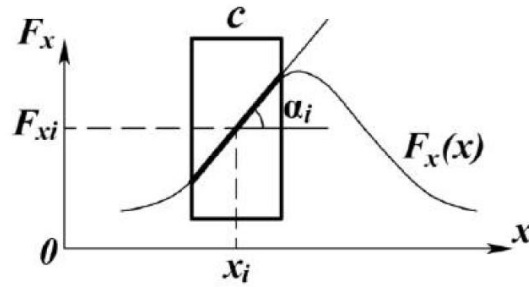


Рисунок 2.8 – Створення сили $F_x(x)$ зосередженим провідником

У граничному випадку можна припустити що, струмова лінія збігається з дотичної до кривої лінії зосередженого струму. Якщо врахувати, що геометричний зміст похідної це тангенс кута нахилу дотичної до графіка функції, то крива зміни бажаної сили $F_x(x)$ може розглядатися як графік похідної від функції, що відображає траєкторію струмової лінії. Останню можна отримати інтегруванням залежності бажаної силової характеристики

$$y(x) = \frac{1}{B \cdot I \cdot c} \int_{x_0}^x F_x(x) dx.$$

Цю характеристику можна отримати за допомогою виконання додаткових бічних вирізів. Отримання такої характеристики за допомогою пакету COMSOL Multiphysics показано на рисунку 2.9, де сформована вирізами струмова лінія позначена штриховою лінією.

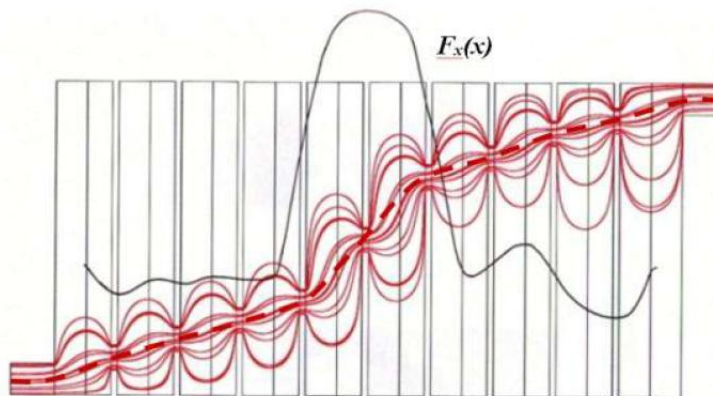


Рисунок 2.9 – Отримання бажаної силової характеристики

Практичний підхід до вибору геометрії бічних вирізів наведено нижче.

Припустимо, що зосереджений струм протікає у нескінченно тонкому провіднику, довільно укладеному в межах розмірів (a, b) пластини. Розмір b називатимемо розрахунковою шириною пластини. Початок та кінець провідника знаходяться в точках O та A (рисунок 2.10).

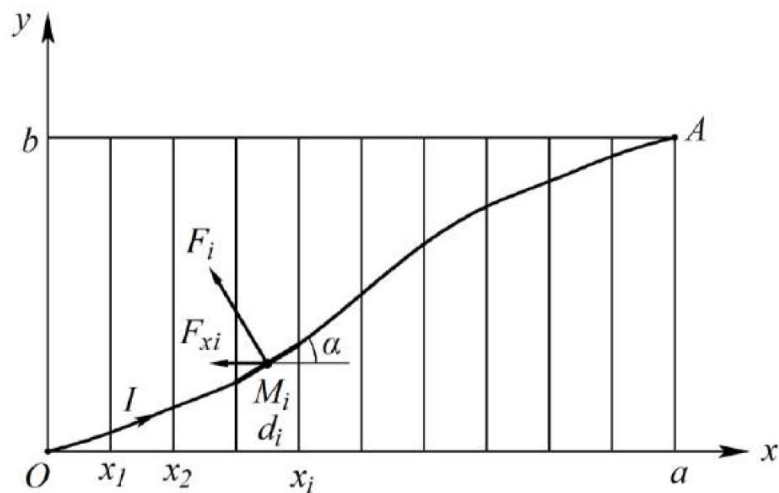


Рисунок 2.10 – Провідник довільної форми

Розіб'ємо площу $ObAa$ на N окремих прямокутних зон, у межах яких елементи провідника можна вважати прямолінійними. Ширину кожної зони позначимо як d_i . Усередині кожної зони на елементі провідника виберемо точку M_i . Струм I , що протікає через цю точку, буде таким самим у всіх точках провідника. Вважаємо, що зона, яка розглядається, пронизується магнітним потоком з індукцією B ; для визначеності приймемо, що цей потік спрямований у площину рисунка. На обрану ділянку провідника діятиме сила

$$F_i = B \cdot I \cdot l_i \frac{d_i}{\cos \alpha_i},$$

де l_i – довжина провідника у вибраній зоні; α_i – кут нахилу ділянки провідника до напрямку осі Ox .

Складова цієї сили F_{xi} визначиться як

$$F_{xi} = B \cdot I \frac{d_i}{\cos \alpha_i} \sin \alpha_i = B \cdot I \cdot d_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i.$$

Вирішуємо зворотнє завдання. За запропонованим характером зміни сили $F(x)$ необхідно знайти точки, через які має бути прокладений провідник зі струмом (рис. 2.11).

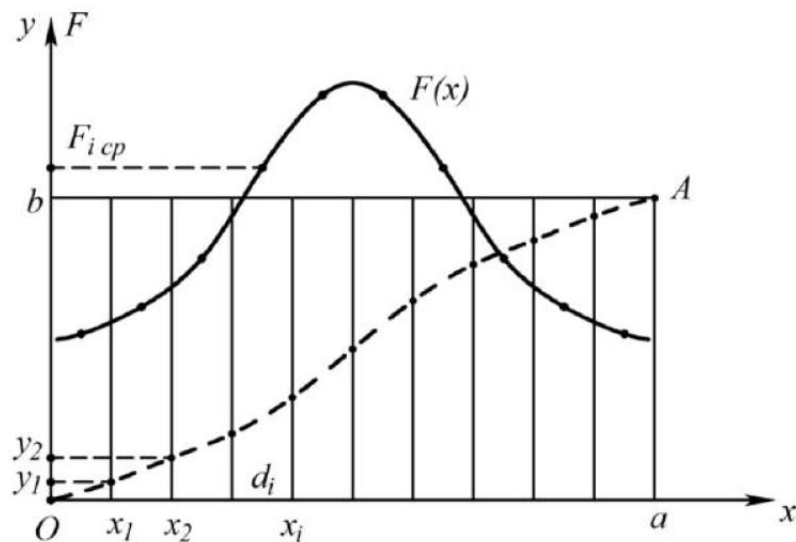


Рисунок 2.11 – Зв'язок силової характеристики та конфігурації провідника зі струмом

На цьому рисунку поєднані графік зміни сили $F(x)$ та геометрія пластини; при цьому також показані інтервали d_i , які для спрощення подальших висновків приймемо рівними ширині магніту $d_i=c$. Кожному з інтервалів відповідає середнє значення сили F_{icp} . Точки, через які має бути прокладений провідник зі струмом, визначимо наступним чином. З отриманого виразу (2.7) випливає

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{F_{icc}}{B \cdot I \cdot d_i}.$$

У точці x_1 , на межі інтервалів d_1 та d_2 ордината кінцевої точки відрізка провідника буде

$$y_1 = d_1 \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{F_{1cp}}{B \cdot I}.$$

Ордината кінцевої точки відрізка на другому інтервалі

$$y_2 = y_1 + d_2 \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{B \cdot I} (F_{1cp} + F_{2cp})$$

Аналогічно, ордината кінцевої точки відрізка на n -му інтервалі

$$y_n = \frac{1}{B \cdot I} \sum_{i=1}^n F_{icc} \quad (0.8)$$

Ордината y_N кінцевої точки останнього інтервалу d_N повинна дорівнювати розрахунковій ширині пластини b . Якщо ця умова не виконується, необхідно ввести коефіцієнт

$$k = \frac{y_N}{b \cdot B \cdot I} \sum_{i=1}^n F_{icc}$$

за допомогою якого необхідно змінити ординати, що визначаються виразом (2.8).

Остаточно, координати точок $M_n(x_n, y_n)$, якими має бути прокладений провідник зі струмом, визначаються так

$$\begin{aligned} x_n &= \sum_{i=1}^n d_i; \\ y_n &= \frac{1}{k \cdot B \cdot I} \sum_{i=1}^n F_{icc}. \end{aligned} \quad (0.9)$$

На малюнку 2.11 одержані подібним чином точки об'єднані штриховою лінією, яка відображає потрібну форму провідника.

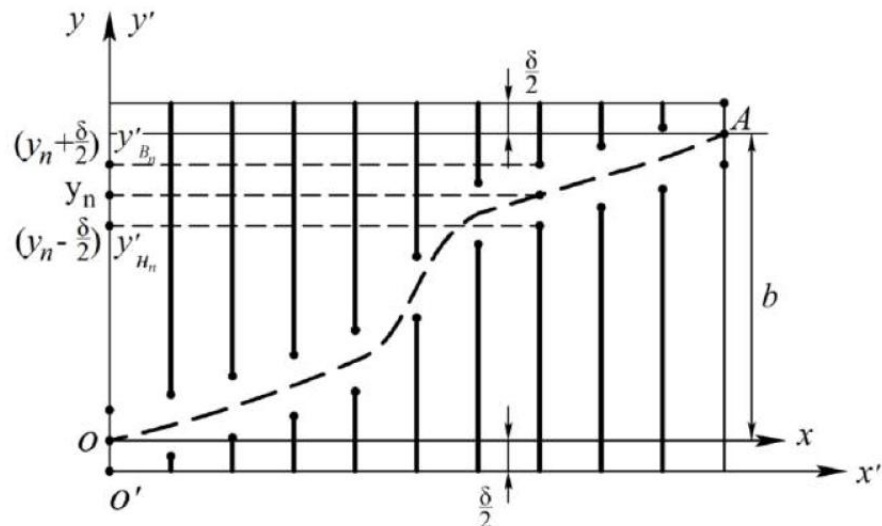


Рисунок 2.12 – Картина розташування бокових вирізів

Наведені вище викладки відносяться до випадку, коли необхідна функціональна залежність $F(x)$ визначається зосередженим струмом, що протікає по тонкому провіднику. Отримання необхідної силової характеристики, створюваної струмом, що протікає пластиною, як зазначено раніше, може бути реалізовано за допомогою бічних вирізів. Геометрія цих вирізів така, що їх ширина повинна мати мінімально можливий розмір, що забезпечується інструментом, а довжина – визначатися залежностями (2.9). Розташування вирізів уздовж довжини пластини має відповідати межам вибраних інтервалів d_i .

Так як отримані вище результати (2.9) відносяться до випадку, коли розміри перерізу провідника є нескінченно малими, потрібна корекція цих результатів з урахуванням того, що струм повинен протікати перерізом, площа якого S кінцева і визначена допустимою густиною струму. Лінійний розмір перерізу, що лежить у площині пластини, визначається;

$$\delta = \frac{S}{\Delta}$$

Вважаючи, що крутизна ліній струму не така велика, будемо вважати, що розмір δ відраховується у напрямку осі Oy .

Вирізи, виконані з нижньої та верхньої кромки пластини, що забезпечують необхідний розмір δ (рисунок 2.12), повинні закінчуватися в точках

$$y_{Hn} = y_n - \frac{\delta}{2}, y_{Bn} = y + \frac{\delta}{2}.$$

У зв'язку з тим, що

$$y_{H_0} = 0 - \frac{\delta}{2} = -\frac{\delta}{2}, y_{Bx} = y_N + \frac{\delta}{2} = b + \frac{\delta}{2},$$

реальна ширина b' пластини повинна бути більшою за розрахункову b :

$$b' = b + \delta.$$

В такому випадку відлік ординат кінцевих точок вирізів відбувається від нижньої кромки реальної геометрії пластини, тобто. у системі координат $O'x'y'$

$$\begin{aligned} y'_{Hn} &= y_n - \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = y_n, \\ y'_{Bn} &= y_n + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = y_n + \delta. \end{aligned} \quad (0.10)$$

На практиці така задача вирішується наступним чином. З відомої ширини пластини b' та максимального струму I , визначається зазор δ між двома боковими вирізами. Потім розраховується ширина пластини b' . Згідно виразів (2.9) і (2.10), визначаються розміри вирізів, що забезпечують необхідну силову характеристику двигуна.

Рівномірну силову характеристику можна одержати наявності в пластині дев'яти додаткових вирізів, що забезпечують концентрацію ліній струму в діагональному напрямку [67] (рис. 2.13).

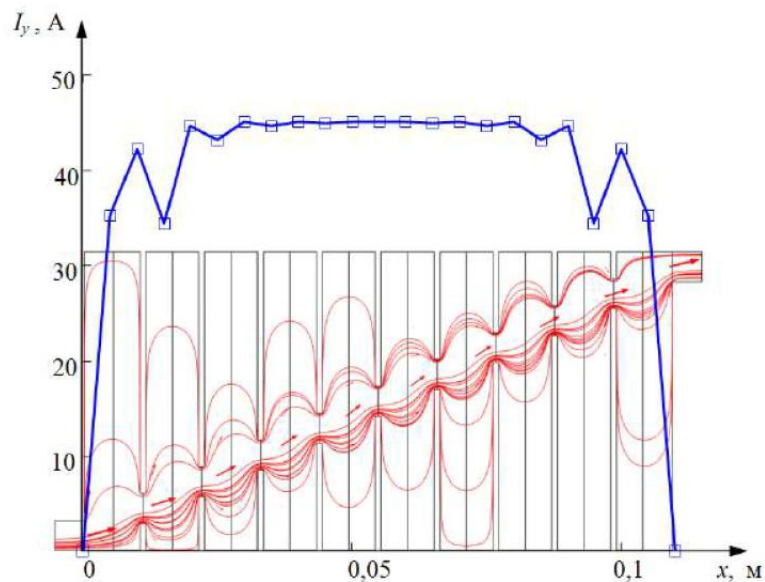


Рисунок 2.13 – Вид силовій характеристики з діагональною концентрацією струмових ліній

Недоліком пластини з отриманою характеристикою є велика кількість теплонапружених зон, обумовлених більшим числом додаткових бічних

вирізів і, відповідно, більшим числом звуження місця пластини з підвищеною густиною струму. Виходом із цієї ситуації є накладання одна на одну пластин, у яких розташування додаткових суміжних вирізів не збігається, як показано на малюнку 2.14 [74].

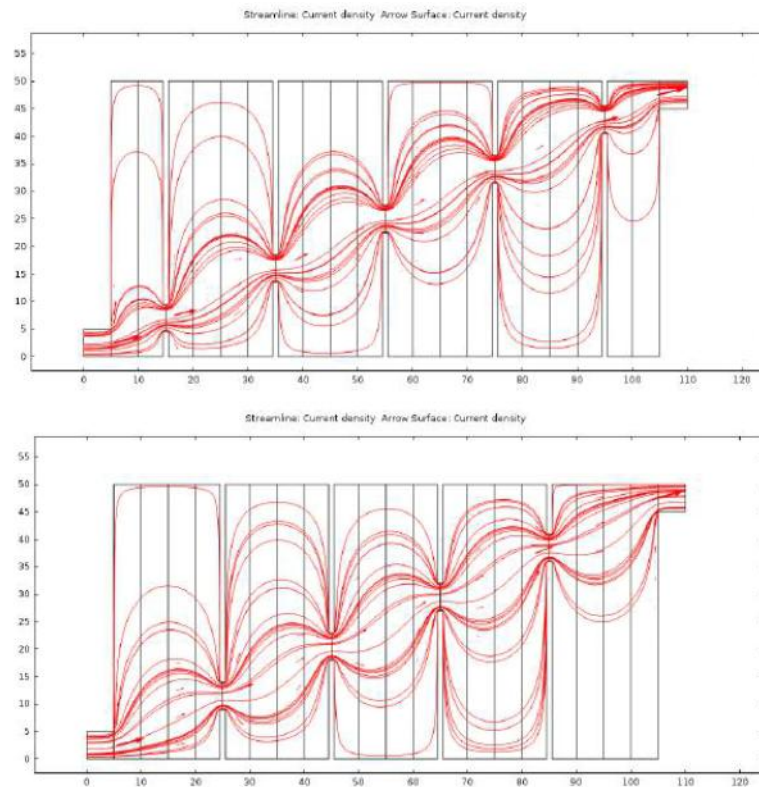


Рисунок 2.14 – Характер розподілу струму пластинами з 4 та 5 додатковими вирізами

Зовнішній вигляд результуючої силової характеристики двох таких пластин, утвореної при геометричному додаванні силових характеристик пластини з 5 вирізами (крива 1 на рисунку 2.15) та пластини з 4 вирізами (крива 2 на рисунку 2.15), показаний на рисунку 2.15 кривою 3.

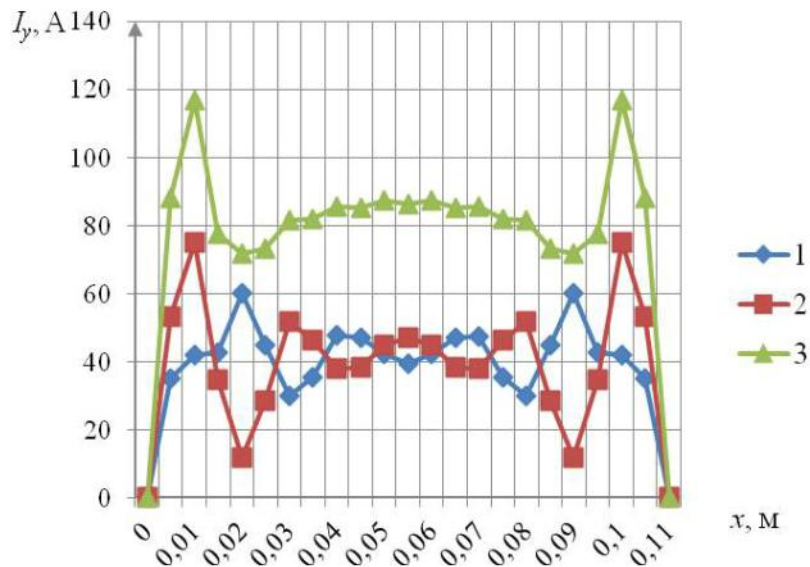


Рисунок 2.15 -Силкові характеристики пластин

На рисунку 2.15 по краях пластини силова характеристика має нульові значення, так як при її побудові передбачалося, що зліва і справа від розглянутої пластини розташовані аналогічні пластини, "поперечні" струми яких мають протилежний напрямок.

Незважаючи на можливість отримання необхідної характеристики $F(x)$, велика кількість вирізів призводить до збільшення зон підвищеного виділення тепла. Бажану силову характеристику можна також отримати і при істотному скороченні числа вирізів.

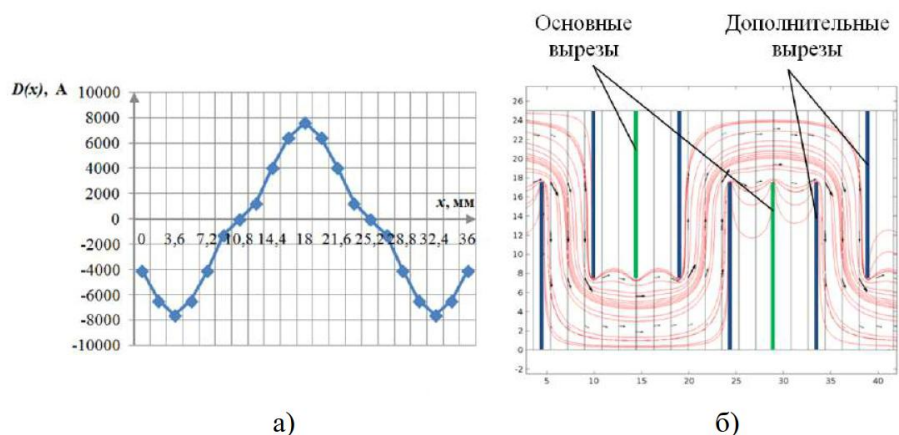


Рисунок 2.16 - "Трикутна" залежність зусилля: а) вид силової характеристики; б) вид стрічкового намотування з вирізами

У деяких випадках необхідно мати характеристику близьку до трикутної форми (рисунок 2.16 а) [20]. Це досягається виконанням двох додаткових вирізів, при цьому необхідно враховувати дію пластин, розташованих зліва і справа від даної пластини (рисунок 2.16,б). Наявність саме "трикутної" залежності силової характеристики може мати позитивний ефект у вентильному двигуні.

2.6 Залежність електричного опору пластини розподіленого струму від її довжини

Проведемо оцінку опору пластини залежно від геометричних параметрів останньої. Для визначення опору одиничної пластини R_i у модулі Electric Currents COMSOL Multiphysics побудовано геометричну модель пластини (рисунок 2.17).

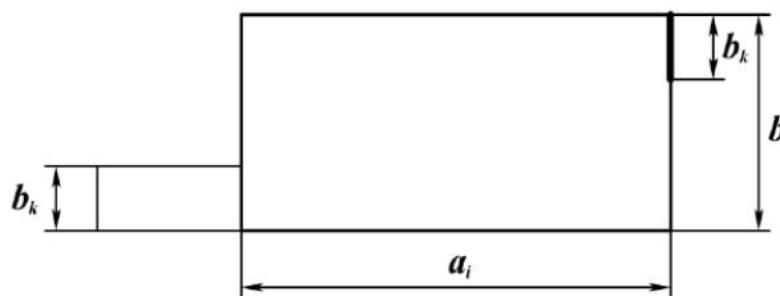


Рисунок 2.17 – Геометрична модель пластини

Опір визначався при різних співвідношеннях довжини a_i та ширини b пластини $\beta = a / b$. Розрахунок опору пластини проводився наступним чином: задавалася різниця потенціалів контактів (10^{-3}), визначався інтеграл нормальної густини струму по поверхні лівого контакту (струм через контакт) і за законом Ома визначалося опір пластини з урахуванням лівого контакту. Збільшена довжина лівого контакту дозволила точніше визначити струм, що протікає по пластині. Це пояснюється тим, що у COMSOL струм через контактну поверхню можна визначити через нормальну густину струму. У

правій частині пластини (див. рисунок 2.17) тангенціальна компонента струму істотно спотворює результати розрахунків. При визначенні даної компоненти в програмі на межі пластини виходять аномально малі значення, які далекі від реальності. Однак з'ясовано, що при довжині лівого контакту 20-25 мм, різниця між обчисленими значеннями струму, що втікає в пластину через лівий контакт і через правий, доходить до 8% [68]. Опір лівого контакту визначено окремо, його віднімання від повного опору дає можливість дізнатися опір пластини при протіканні по ній розподіленого струму. Характер зміни опору одиничної пластини від співвідношення її довжини та ширини був отриманий для чотирьох різних варіантів відносної ширини контакту прикладеного напруження β_k (рисунок 2.18). У цих розрахунках прийнято такі характеристики пластини: матеріал мідь з питомою провідністю $5,99 \times 10^7$ См/м; товщина пластини $\Delta = 10^{-4}$ м; ширина пластини $b = 0,05$ м; початкова довжина $a_1 = 0,12$ м.

Для кожної ширини контакту спостерігається мінімальне значення опору.

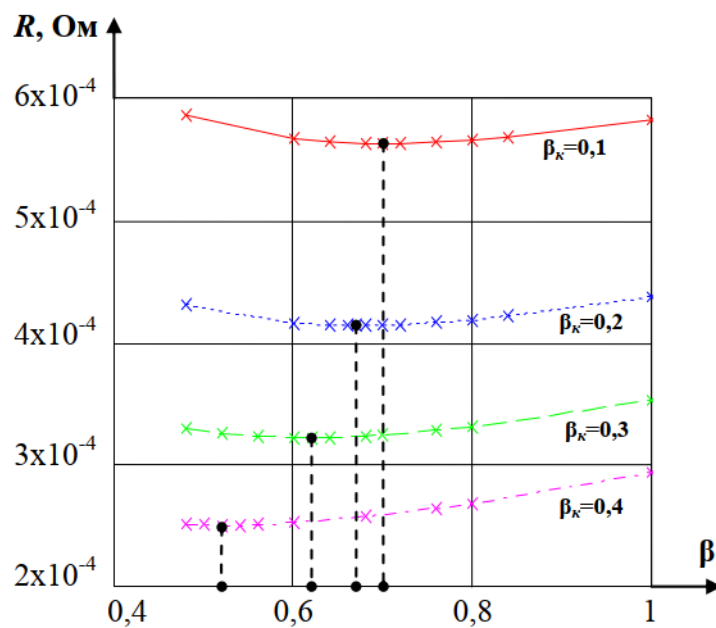


Рисунок 2.18 – Залежність опору одиничної пластини від співвідношення її довжини та ширини

2.7 Температурні дослідження пакета пластин

Проведемо дослідження температурних показників пакетного елемента. З метою спрощення завдання приймаємо пласку геометрію пакета. Вважаємо також, що струмові лінії окремих пластин пакета не переходять з одного шару до іншого. При цьому припущенні ізоляцією між пластинами нехтуємо і математичної моделі пакет представлений у вигляді суцільної структури з однорідними фізичними характеристиками, до яких в першу чергу слід віднести теплопровідність. Дане припущення цілком припустимо, якщо вважати, що електрична ізоляція пластин реалізована тонким шаром оксиду металу, з якого виконані ці пластини; при вирішенні поставленого завдання передбачається використовувати мідь.

Аналітичні дослідження проводилися за допомогою модуля Heat Transfer – Joule Heating COMSOL Multiphysics. Передбачалося, що пакет складається з $N=100$ пластин товщиною $\Delta=0,1$ мм, довжиною $a=100$ мм і шириною $b=50$ мм. По кожній пластині пропускався початковий струм 50 А. В результаті повний струм пакета становив 5000 А. З урахуванням того, що одним з можливих застосувань моментного двигуна є імпульсний двигун-маховик, час протікання струму по пакету ставилося не більше 1 с. У процесі досліджень розглядалися різні варіанти встановлення двигуна стрічкового намотування і відповідно, способи закріплення пакета (рисунок 2.19). На вказаних рисунках показані температурні поля пакетів пластин після пропускання струму протягом проміжку часу рівному 1 с. Розглянуто випадки, коли тепловідведення відсутнє (рисунок 2.19 а); пакет встановлений на масивному тепловідводі (рисунок 2.19 б); пакет закріплений на тепловідводі Т-подібного перерізу, маса якого дорівнює масі масивного тепловідводу (рисунок 2.19,в). У даному варіанті пакет закріплений на тонкій пластині, яка є складовою частиною основного тепловідведення, та має форму Т-подібного перерізу.

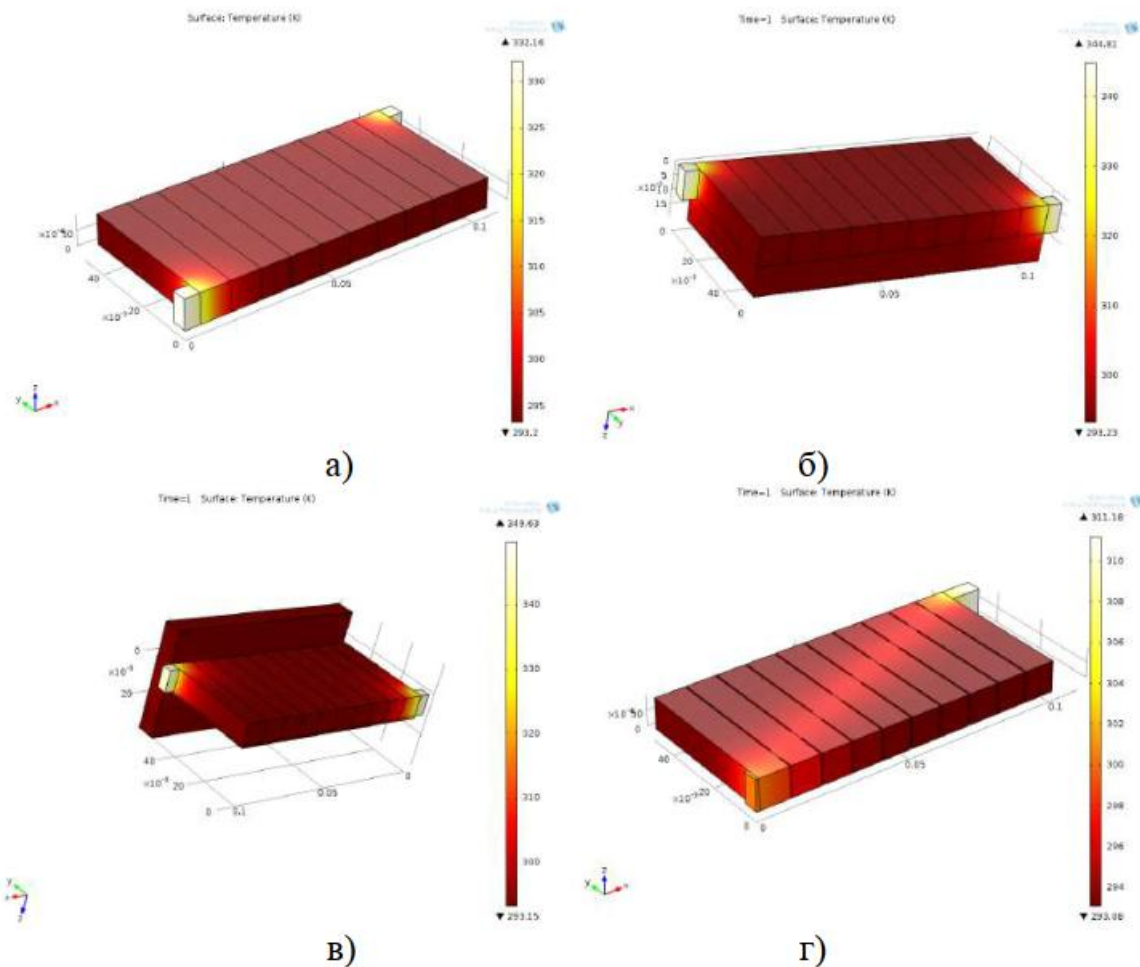


Рисунок 2.19 – Розподіл температурного поля у пакеті пластин: а) за відсутності тепловідведення; б) при масивному тепловідведення; в) при тепловідведенні за рахунок Т-подібного перерізу; г) з додатковими вирізами за відсутності тепловідведення

На рисунку 2.19г представлена картина температурного поля пакета з додатковими вирізами, необхідними для формування заданої функціональної залежності силової характеристики.

Аналізуючи температуру після закінчення циклу протікання струму, слід зазначити, що її максимальне значення не перебільшує 80 °С, що з умов експлуатації згаданого вище маховика є допустимою. Так само можна оцінити і процес нагрівання при більш тривалому періоді протікання струму.

У процесі протікання струму пластини нагріваються, змінюється їхній омичний опір, величина струму, зрештою змінюється і сила, що розвивається між струмами в пакеті і джерелом магнітного потоку [17]. З метою з'ясування впливу нагріву на величину сили, був проведений розрахунок останньої у вихідному ("холодному") стані F_H і після протікання струму F_K . На рисунку 2.20 показано закономірність зміни сили за довжиною пакета у вихідному стані (розглядаються пакети без додаткових вирізів).

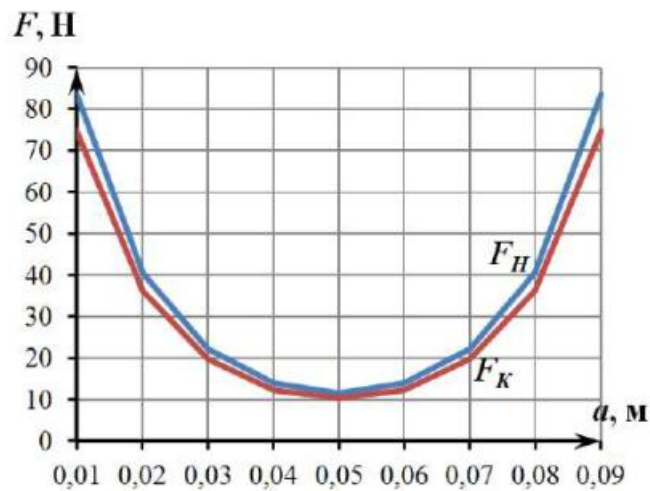


Рисунок 2.20 – Характер зміни сили за довжиною пакета у вихідному стані та після нагрівання

На рисунку 2.21 продемонстровано залежність відносних змін сили f наприкінці циклу протікання струму. Параметр f визначається наступним чином:

$$f_i = \frac{F_{Hi} - F_{Ki}}{F_{Hi}},$$

де F_{Hi} , F_{Ki} - значення сил, в точці i по довжині пакета на початку циклу протікання струму і при його закінченні. Параметр f_1 відноситься до пакета пластин без тепловідведення, f_2 - до пакета на масивному тепловідведення, f_3 - до пакета, який встановлений на тепловідведення з Т-подібним перерізом.

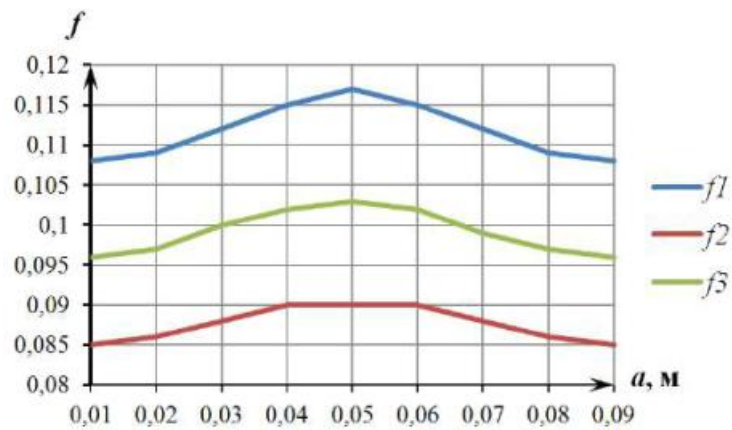


Рисунок 2.21 – Відносні зміни сили, в кінці циклу протікання струму

Аналогічні дослідження були проведені і для пакету з додатковими бічними вирізами. На рисунку 2.22 показані залежності сили на початку циклу протікання струму F_H і при його закінченні F_K .

Дані залежності відносяться до дослідження пакета без тепловідведення.

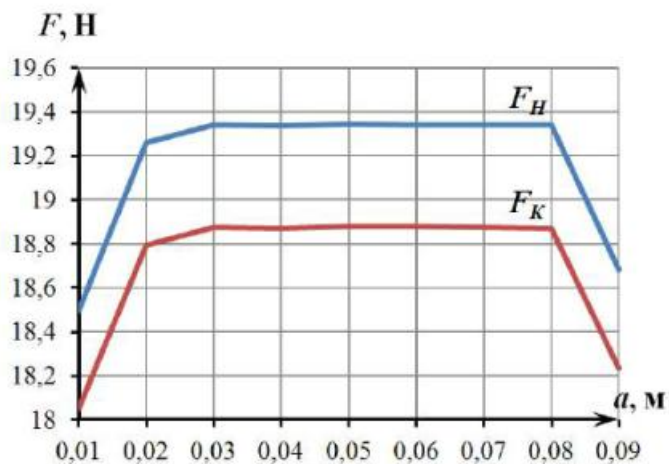


Рисунок 2.22 – Залежності зміни сили пакетом з додатковими вирізами на початку і закінчення циклу протікання струму

Графіки відносної зміни сили під час використання тепловідводів наведено рисунку 2.23. Позначення цих графіків аналогічні наведеним на рисунку 2.19.

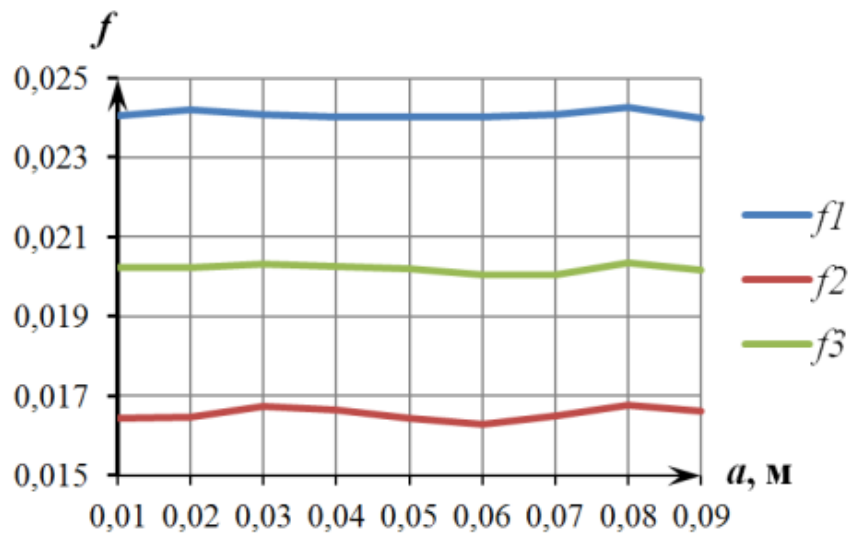


Рисунок 2.23 – Відносні зміни сили в кінці циклу протікання струму для пакета з додатковими вирізами

Певний інтерес представляє закономірність розподілу температури за товщиною пакета в найбільш теплонапруженій зоні – в районі розташування контакту прикладання напруги. На рисунку 2.24 показано точки, у яких розраховувалася температура пакета після циклу протікання струму (1 с).

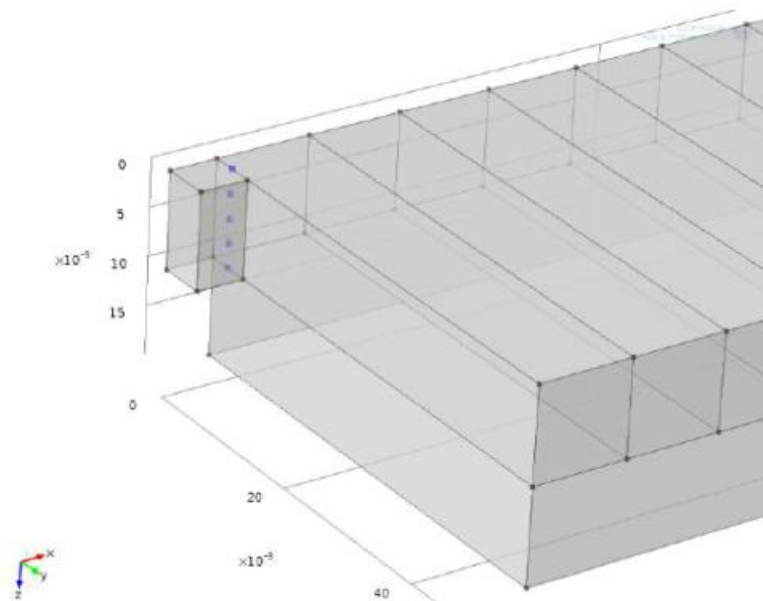


Рисунок 2.24 – Точки вимірювання температури біля контактного простору пакету

Характер зміни температури представлений графіками на рисунку 2.25, У випадку застосування масивного тепловідведення (крива 1) і тепловідведення з Т-подібним перерізом (крива 2). Зазначені характеристики належать до дослідження пакета без додаткових вирізів. Координата відраховується вздовж товщини пакета від площини дотику з тепловідведенням.

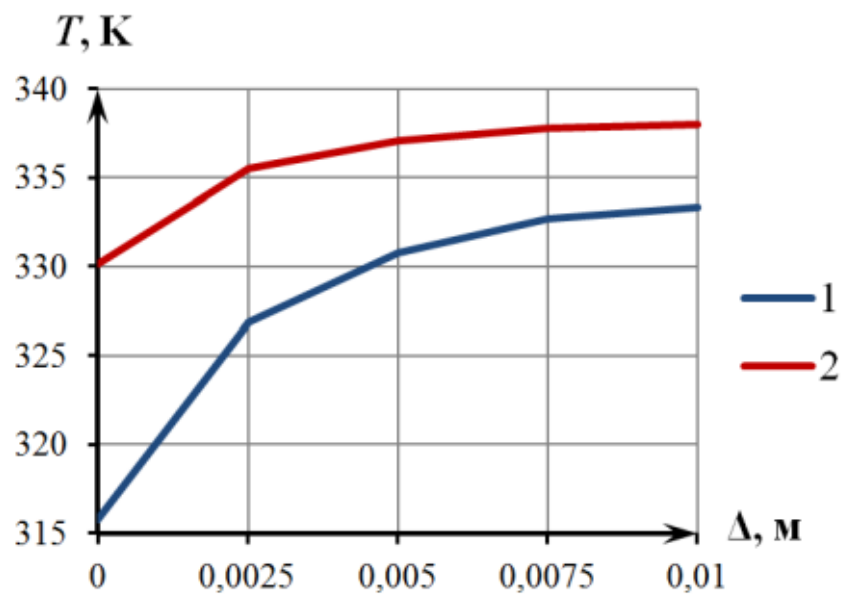


Рисунок 2.25 – Залежність розподілу температури у навколоконтактному просторі пакета без додаткових вирізів

Крива 2 лежить вище кривої 1, що пояснюється більш складним шляхом відведення тепла, що виділяється.

Висновки до розділу

1. Аналітично виведено вираз для сили яка розвивається пластиною зі струмом і магнітним полем, з урахуванням того, що через пластину протікає розподілений струм.
2. Запропоновано методику побудови силової характеристики пластини для двигуна стрічкового намотування.

3. Показано можливість формування необхідної силової характеристики пластини двигуна стрічкового намотування шляхом виконання додаткових бічних вирізів у пластині.

4. Показано, що при певному співвідношенні розмірів пластини стрічкового намотування моментного двигуна буде спостерігатися мінімальне значення її опору.

5. Показано можливість реалізації запропонованого варіанта активного елемента на основі результатів чисельних досліджень температурних полів пластини.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розрахунок впливу параметру намотки на величину моменту.

Згідно з виразом (2.11) сила, створювана одиничною пластиною зі струмом, визначається наступним чином

$$F_1 = B(\delta)\Delta \frac{U}{2p \cdot R \cdot N} \frac{1}{I_0} D(x, y, I_{.0})_{x_c}, \quad (0.11)$$

де, $B(\delta)$ - індукція магнітного поля;

δ - довжина немагнітної ділянки магнітної ланки;

Δ - товщина стрічки;

U - напруга джерела живлення постійного струму;

R - активний опір одиничної пластини;

N - число витків (шарів) намотування;

p - кількість пар полюсів магнітної системи;

$D(x, y, I_{.0})_{x_c}$ - величина подвійного інтеграла по поверхні, що представляє зону дії магнітного потоку. Інтеграл обчислюється при знаходженні центру постійного магніту точці x_c .

I_0 - струм, при якому визначається величина подвійного інтеграла.

У багатовитковому намотуванні виділимо пакет одиничних пластин, в якому практично ідентичні пластини розташовані одна над іншою. Визначимо момент M_0 який може бути створений згаданою сукупністю пластин, що знаходяться під дією потоку одного полюса магнітної системи

$$M_0 = \sum_{i=1}^N M_{0i},$$

де.

$$M_{01} = F_1 r_0;$$

$$M_{02} = F_1 (r_0 + \Delta);$$

.....;

$$M_{0N} = F_1 (r_0 + (N-1)\Delta);$$

У даному випадку r_0 – середній радіус першого витка намотування.

Проведемо підсумовування моментів M_{0i} , враховуючи, що

$$1 + 2 + 3 + \dots + (N - 1) = \frac{N - 1}{2} N$$

Отримаємо

$$M_0 = N \cdot F_1 \cdot r_0 + F_1 \frac{\Delta}{2} (N - 1) N = \frac{\Delta}{2} F_1 \cdot (N + [\frac{2r_0}{\Delta} - 1])$$

З урахуванням того, що магнітна система має $2p$ полюсів, момент, двигуна дорівнює

$$M = 2p \cdot M_0 = p \cdot \Delta \cdot N \cdot F_1 (N + [\frac{2r_0}{\Delta} - 1]). \quad (0.12)$$

Підставивши в отриманий вираз (3.2) величину сили одиничної пластини (3.1), отримуємо вираз для моменту двигуна зі стрічковим намотуванням

$$M = \frac{\Delta^2}{2} \frac{U}{I_0 \cdot R} B(\delta) [N + (\frac{2r_0}{\Delta} - 1)] \cdot D(x, y, I_0)_{x_c}. \quad (0.13)$$

У вираз (3.3) не входить число пар полюсів p , яке незважаючи на це проявлятиметься у величині подвійного інтеграла $D(x, y, I_0)_{x_c}$ опір одиничної пластини R , а також магнітної індукції в повітряному зазорі.

3.2 Вибір числа витків намотки

Аналізуючи вираз для моменту (3.3), збільшення витків N , з одного боку, має збільшити момент за рахунок більшої кількості активних елементів. Однак у стільки ж разів збільшується опір намотування, і, отже, зменшується струм. Виходить так, що кількість витків намотування на величину моменту практично не впливає. Збільшення середнього радіусу намотування – несуттєво збільшує момент.

Аналітичні дослідження показують, що закон зміни моменту визначається переважно характером зміни індукції в зазорі. Так як індукція зменшується зі зростанням числа витків N , що викликає збільшення

повітряного зазору, то N має бути якнайменше; проте при цьому може зрости струм. Вибраний струм повинен залежати від можливостей джерела живлення та теплостійкості матеріалу стрічки

$$\frac{U}{R \cdot N \cdot 2p} \leq I_{\text{дон}}, N \geq \frac{U}{R \cdot N \cdot 2I_{\text{дон}}}$$

3.3 Визначення відносної індукції моделі моментного двигуна

Для визначення залежності індукції від числа пар полюсів $B(p)$ у системі T-flex CAD було побудовано спрощену параметричну модель магнітної системи двигуна з можливістю зміни числа пар полюсів та величини повітряного зазору.

Вважаючи що, основні розміри магнітної системи залишаються незмінними до них відносяться осьова довжина b , зовнішній D_1 і внутрішній D_2 діаметри зовнішнього магнітного кола, d_1 і d_2 - діаметри відповідно внутрішнього магнітного кола; товщини магнітів $(D_1 - D_2)/2$ і $(d_1 - d_2)/2$ (рисунок 3.1). Також прийнята незмінною довжина робочого повітряного зазору δ .

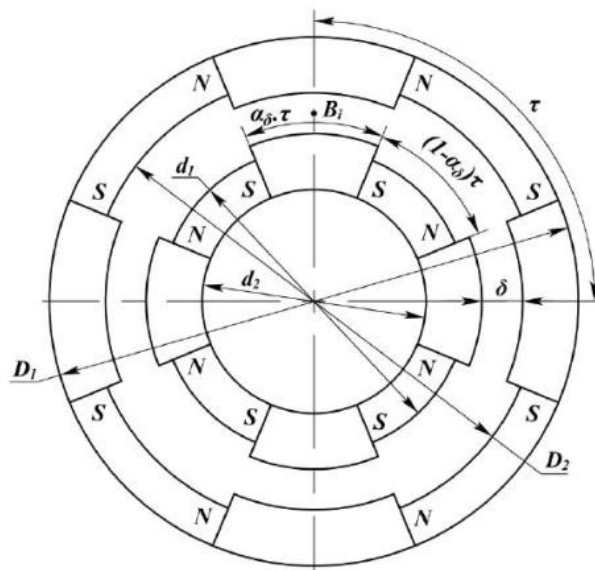


Рисунок 3.1 – Досліджувана магнітна система

Для різного числа пар полюсів полюсний поділ $\tau = \pi / p$. Довжина полюса визначається через величину полюсного перекриття α_δ як $\alpha_\delta \cdot \tau$; відповідно кутовий розмір постійного магніту $(1 - \alpha_\delta) \cdot \tau$. На рисунку 3.1 відображено магнітну систему з $p=2$.

Численні дослідження були проведені для двох типорозмірів магнітної системи двигуна:

1. $D_1 = 0.12\text{м}$, $D_2 = 0.1\text{м}$, $d_1 = 0.072\text{м}$, $d_2 = 0.052\text{м}$, $\delta = 0.01\text{м}$,
 $b = 0.05\text{м}$, $l_{\text{ср}} = 0.27\text{м}$.
2. $D_1 = 0.065\text{м}$, $D_2 = 0.055\text{м}$, $d_1 = 0.0375\text{м}$, $d_2 = 0.0275\text{м}$, $\delta = 0.005\text{м}$,
 $b = 0.025\text{м}$, $l_{\text{ср}} = 0.145\text{м}$.

Для чисельного моделювання побудована модель магнітної системи була імпортована в COMSOL Multiphysics (рисунок 3.2). За заданих умов в якості матеріалу постійних магнітів обраний сплав із залишковою індукцією $B_r = 1,22$ Тл і $\mu_r = 1,05$; матеріал полюсів - "soft iron (without losses)" (згідно параметрів в бібліотеці матеріалів COMSOL). Визначення індукції магнітного потоку B_i у робочому повітряному зазорі проводилося під центром полюсів (див. рис. 3.1).

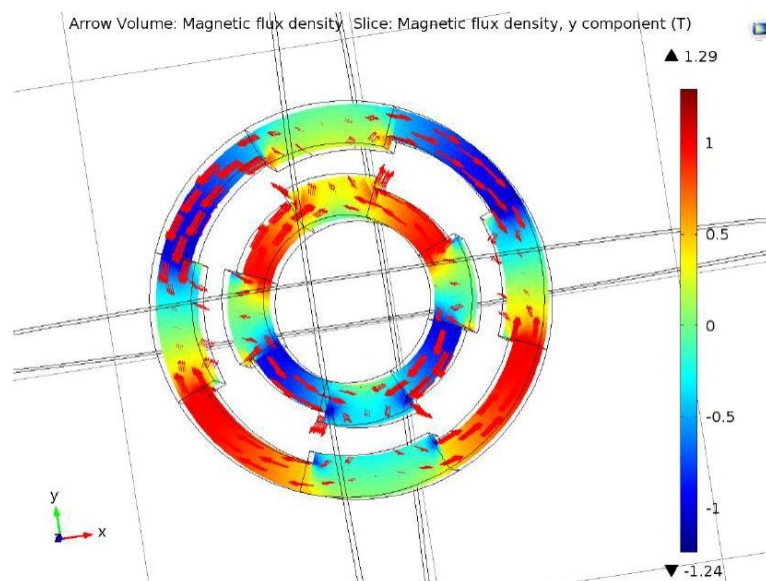


Рисунок 3.2 – Модель магнітної системи у вікні COMSOL

Розрахункові значення індукції в повітряному зазорі в залежності від числа пар полюсів магнітної системи першого типорозміру наведені в таблиці 3.1 і на графіку рисунок 3.3. Варто зазначити, що найбільше значення індукції у робочому повітряному зазорі спостерігається при числі пар полюсів $p=5$. У таблиці 3.1 також наведено відносні значення індукції B_i/B_1 .

Таблиця 3.1 – Індукція від кількості пар полюсів для першого типорозміру

p	1	2	3	4	5	6	8	10	12
B_i	0,187	0,298	0,360	0,388	0,402	0,391	0,366	0,303	0,252
B_i/B_1	1,000	1,594	1,925	2,075	2,150	2,091	1,957	1,620	1,348

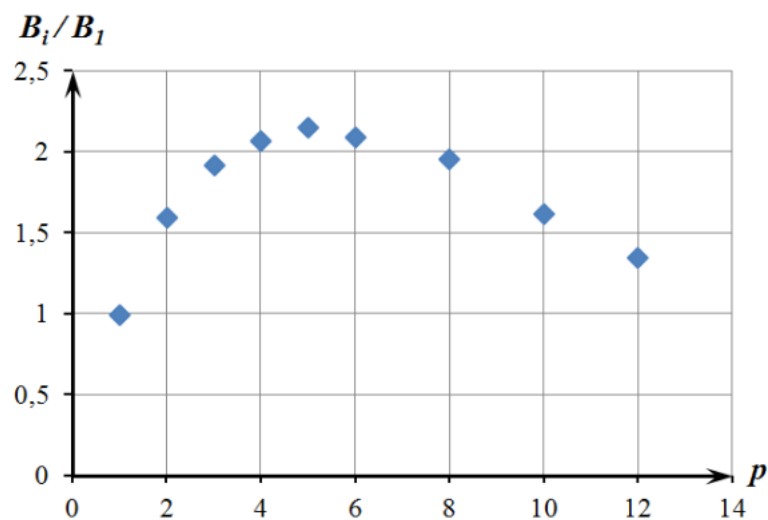


Рисунок 3.3 – Графік залежності відносної індукції від числа пар полюсів для першого типорозміру

Для другого типорозміру при розрахунку залежності індукції магнітного потоку в повітряному зазорі від кількості пар полюсів діапазон величин повітряного зазору було вирішено розширити. Отримані результати для $\delta = 0,003$ м, $\delta = 0,005$ м, $\delta = 0,007$ м наведені в таблиці 3.2 і на графіках рисунку 3.4. При збільшенні повітряного зазору максимальне значення індукції спостерігається за меншої кількості пар полюсів. Для подальших досліджень вибрано середнє значення повітряного зазору, а саме $\delta=5$.

Таблиця 3.2 - Індукція від числа пар полюсів для другого типорозміру

p	$\delta=0,003$ м		$\delta=0,005$ м		$\delta=0,007$ м	
	B_i , Тл	B_i/B_1	B_i , Тл	B_i/B_1	B_i , Тл	B_i/B_1
1	0,235	1,000	0,205	1,000	0,185	1,000
2	0,394	1,678	0,325	1,585	0,284	1,530
3	0,423	2,100	0,391	1,907	0,331	1,785
4	0,548	2,336	0,419	2,044	0,344	1,855
5	0,566	2,409	0,425	2,073	0,335	1,808
6	0,570	2,430	0,404	1,971	0,324	1,746
8	0,540	2,300	0,368	1,795	0,269	1,449
10	0,510	2,173	0,320	1,561	0,219	1,184
12	0,457	1,948	0,297	1,449	0,181	0,974

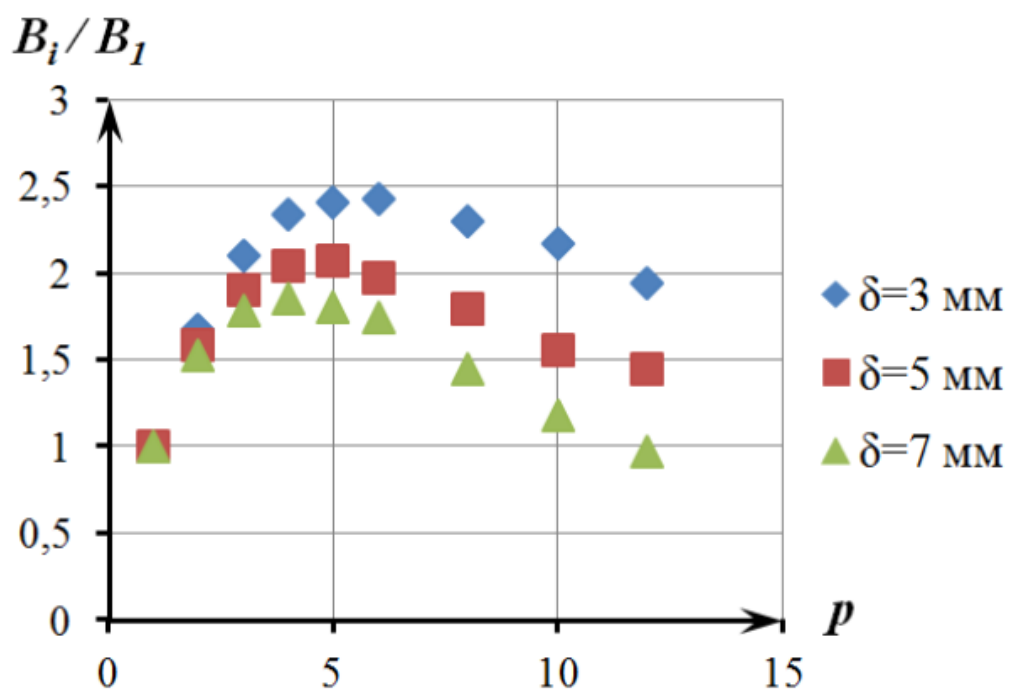


Рисунок 3.4 – Графік залежності відносної індукції від числа пар полюсів для другого типорозміру

Необхідно зазначити, що отримані дані для індукції не є визначальними при розгляді її впливу на момент двигуна, оскільки конструкція магнітного кола є

досить спрощеною, а значення індукції вибрано виходячи з умови, що магнітне поле під полюсом є однорідним.

3.4 Розрахунок відносного опору

Елементами стрічкового моментного двигуна є зовнішня та внутрішня магнітні системи, гільза та стрічкове намотування. Схема двигуна представлена на рисунку 3.5.

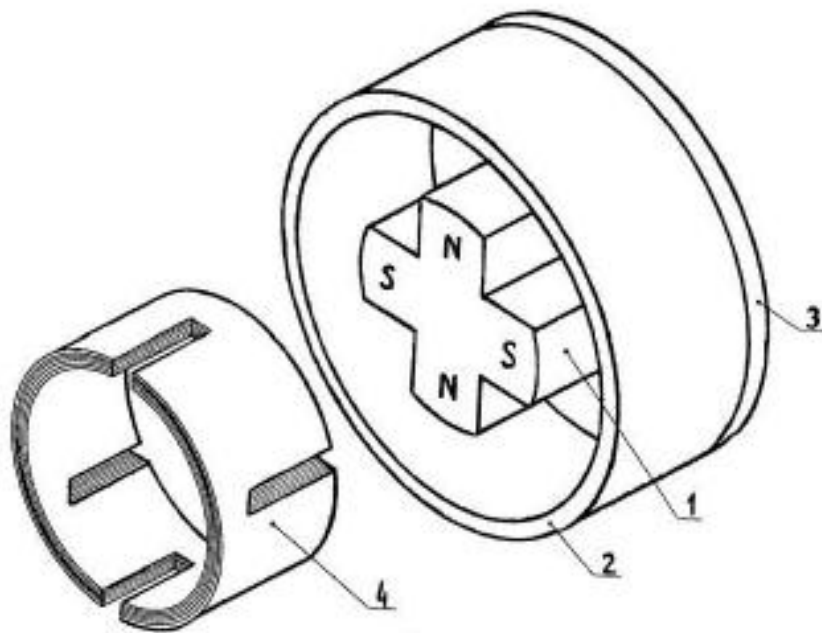


Рисунок 3.5 – Схема моментного двигуна

На рисунку 3.5 ротор двигуна представляє собою постійний багатополюсний магніт 1, з'єднаний з магнітопроводом 2 за допомогою немагнітної діафрагмою 3. Активний елемент 4, що являє собою спірально намотану стрічку з електропровідного матеріалу, поміщається в зазор між багатополюсним магнітом і магнітопроводом.

Стрічку покривають шаром ізоляційного матеріалу. З боків стрічки знаходяться поперечні вирізи. Ці вирізи при намотуванні стрічки утворюють в активному елементі двигуна бічні пази. Тому полюсний розподіл магніту визначається по відстані між центрами бічних пазів. При прикладанні

постійної напруги до початку і кінця стрічки наявність поперечних вирізів визначить характер протікання постійного струму в стрічці. Таким чином виникнення в моментному двигуні моменту щодо осі обертання обумовлено взаємодією поперечної складової струму з магнітним полем магніту.

Проведемо оцінку величини опору одиничної пластини стрічкового намотування при зміні числа пар полюсів. Вважаємо, що ширина стрічки b відповідає осьовій довжині магнітної системи двигуна, а довжина одиничної пластини, із сукупності яких складається намотування, дорівнює $a_i = l_{\text{ср}} / 2p$, де $l_{\text{ср}}$ - довжина середнього витка стрічкового намотування, що поміщається в повітряний робочий зазор магнітної системи (рис 3.6). Опір пластин також оцінюватимемо відносними величинами R_i / R_1 , де R_1 - опір пластини довжиною $a_i = l_{\text{ср}} / 2p$.

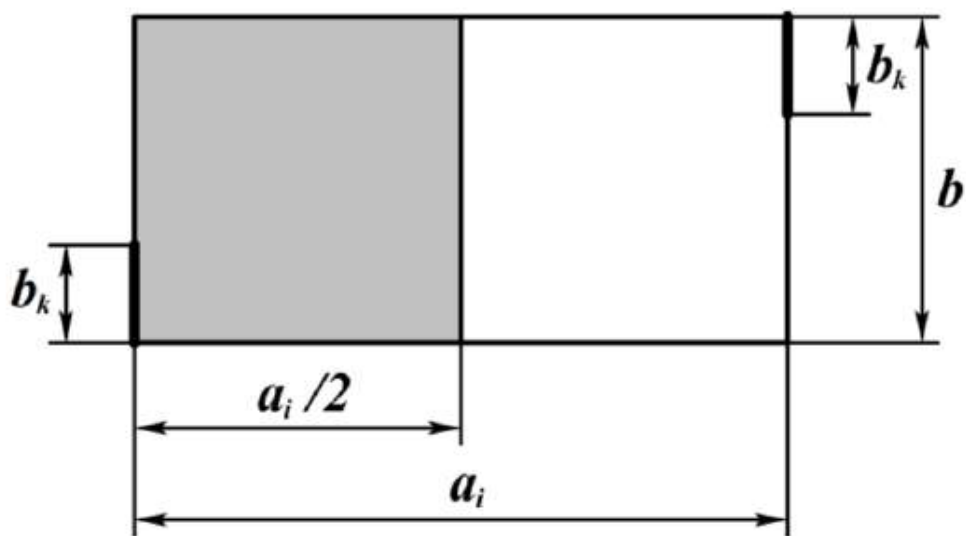


Рисунок 3.6 – Геометрична модель пластини

Результати розрахунків опорів пластин різної довжини ($a_i = a_1 / p$) для першого типорозміру наведено у таблиці 3.3. У цих розрахунках прийнято такі характеристики пластин: матеріал – мідь з питомою провідністю $5,99 \times 10^7$ См/м; товщина пластини $\Delta = 10^{-4}$ м; ширина пластини $b = 0,05$ м; початкова

довжина $a_1 = 0,135$ м. Характер зміни опору пластини при варіації числа пар полюсів від $p = 1$ до $p = 12$ наведено на рисунку 3.7.

Таблиця 3.3 - Опір пластини від числа пар полюсів для першого типорозміру

p	1	2	3	4	5	6	8	10	12
$R_i \cdot 10^{-4}, \text{ Ом}$	8,09	6,18	5,76	5,77	5,97	6,25	7,00	7,87	8,82

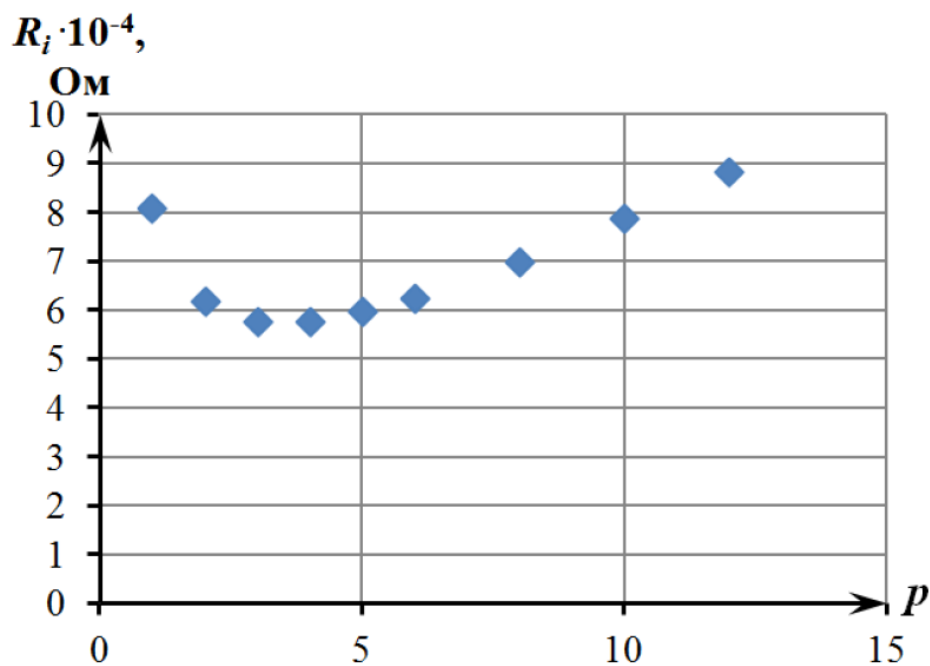


Рисунок 3.7 – Характер зміни опору пластини від числа пар полюсів для першого типорозміру

На рисунку 3.8 показані результати визначення відносних опорів R_i / R_1 при різних величинах відносної ширини контакту $\beta_k = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Аналіз наведених результатів розрахунків показує, що найменший опір пластини спостерігається, коли кількість пар полюсів $p=3$ та $p=4$. Отримані результати відповідають положенням, описаним у розділі 2, які говорять про те, що при певному поєднанні геометричних параметрів пластини спостерігається мінімальне значення опору.

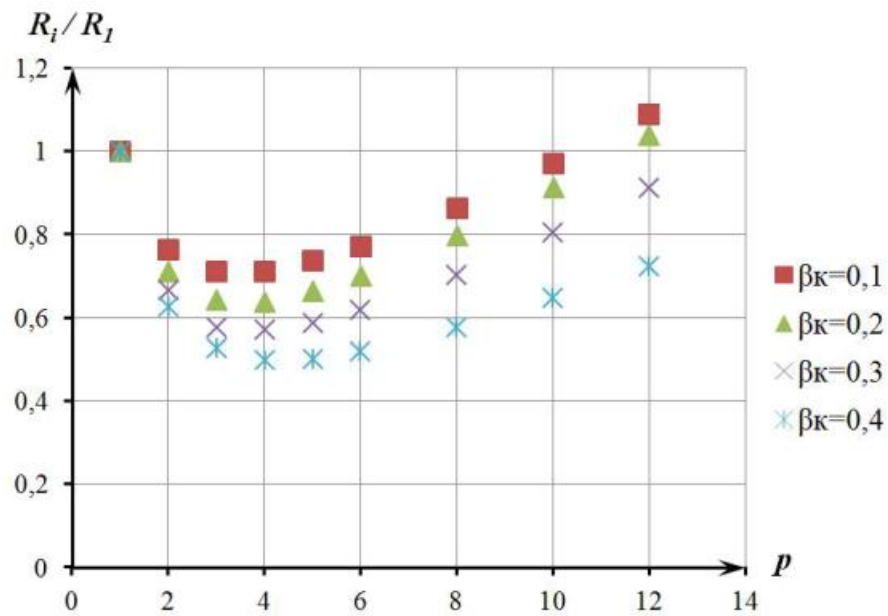


Рисунок 3.8 – Характер зміни відносних опорів від числа пар полюсів для першого типорозміру

На рисунку 3.9 показані результати визначення відносних опорів R_i / R_1 при різних величинах відносної ширини контакту $\beta_k = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. для другого типорозміру.

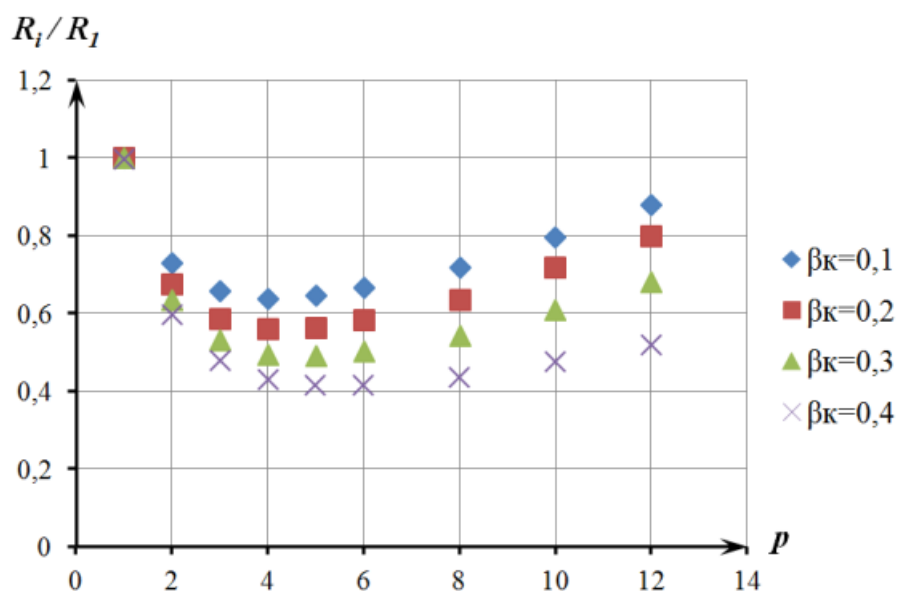


Рисунок 3.9 – Характер зміни відносних опорів від числа пар полюсів для другого типорозміру

Отримані результати підтверджують, що опір пластини залежить від геометричних параметрів останньої. При певному співвідношенні довжини та ширини пластини, що проявляється при зміні числа пар полюсів, спостерігається мінімальне значення опору пластини.

3.5 Розрахунок відносного моменту та потужності від кількості пар полюсів

Для аналізу характеристик запропонованого варіанта моментного двигуна були проведені розрахунки його основних параметрів, а саме моменту, та споживаної потужності. Розрахунки були проведені для двигуна з однією парою полюсів при $\beta_k=0,2$ кожного типорозміру. В обох випадках напруга живлення була обрана з метою забезпечення струму, що протікає через контакти намотування, рівного 100 А при заданому числі витків. При розрахунку були використані такі числові значення для двох типорозмірів двигунів:

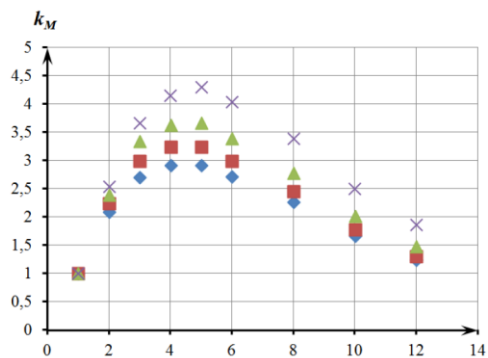
1. $\Delta = 10^{-4} \text{ м}, U = 12.2 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}, R = 1.09 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, N = 75,$
 $r_0 = 0.04385 \text{ м}, D(x, y, I_0)_{x_0} = 222 \text{ А}, B(\delta) = 0.187 \text{ Тл}, m = 3.158 \text{ кг}.$
2. $\Delta = 10^{-4} \text{ м}, U = 3.7 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}, R = 7.385 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, N = 25,$
 $r_0 = 0.024 \text{ м}, D(x, y, I_0)_{x_0} = 97 \text{ А}, B(\delta) = 0.205 \text{ Тл}, m = 0.4 \text{ кг}.$

В результаті розрахунку для першого типорозміру отримано момент $M_{II} = 3$ Н.м; споживана потужність $P_{II} = 1227$ Вт;

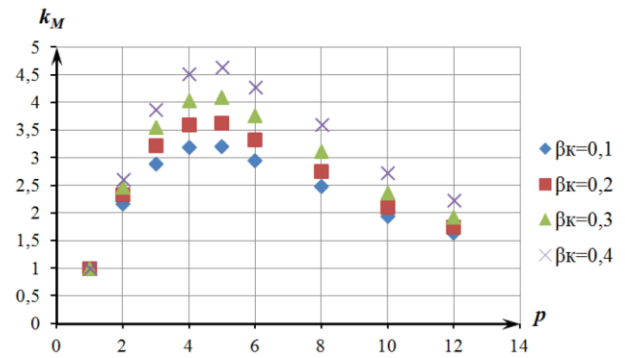
Для другого типорозміру отримано момент $M_{II} = 0.25$ Н.м; споживана потужність $P_{II} = 371$ Вт;

Наведені нижче результати аналізу у вигляді графіків у відносних одиницях за допомогою отриманих розрахункових значень основних характеристик двигуна при одній парі полюсів магнітної системи дозволять оцінити дані характеристики при інших значеннях пар полюсів і відносної ширини контакту.

Визначимо характер зміни відносного моменту від кількості пар полюсів, користуючись виразом (3.7) та результатами таблиць 3.1, 3.2, 3.3. Розрахункові дані для першого типорозміру наведено на рисунку 3.10а, для другого типорозміру – на рисунку 3.10б. Відносний максимальний момент у цьому випадку спостерігається при $p=4$ та $p=5$.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Характер зміни відносного моменту від числа пар полюсів для першого типорозміру (а), та другого типорозміру (б)

Відносний максимальний момент у другому випадку спостерігається при кількості пар полюсів $p=5$.

Якщо вважати, що потужність, що споживається двигуном визначається як

$$P = \frac{U^2}{2p \cdot R \cdot N},$$

то відносна споживана потужність матиме вигляд

$$k_p = \frac{P_i}{P_1} = \frac{R_1}{p \cdot R_i} = \frac{1}{p} \left(\frac{R_1}{R_i} \right); \quad (0.14)$$

де, $i = p$

Результати розрахунків для першого типорозміру наведено у вигляді сімейства кривих на рисунку 3.11а; для другого типорозміру – на рисунку 3.11б.

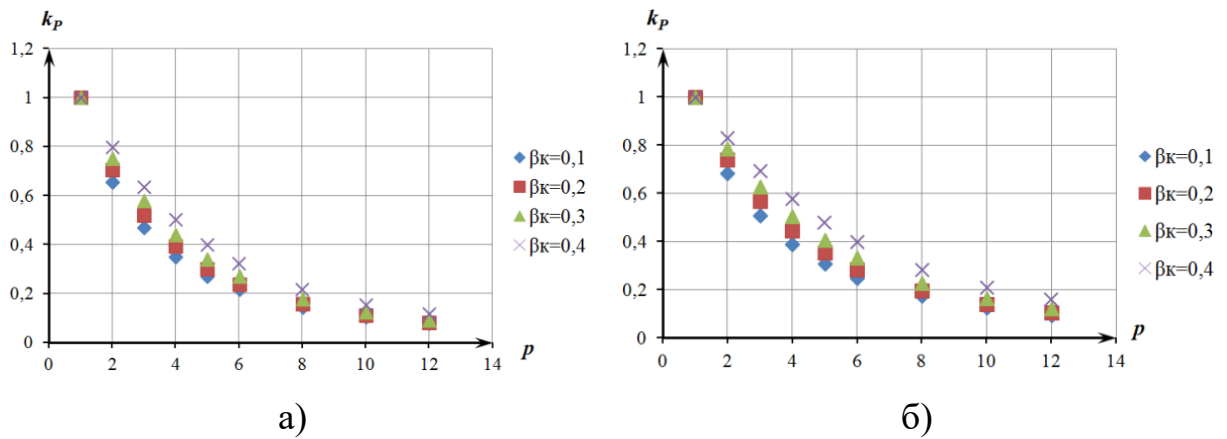


Рисунок 3.11 – Характер зміни відносної потужності споживання від кількості пар полюсів; а - для першого типорозміру, б - для другого типорозміру

Аналіз отриманих результатів свідчить, що відносна споживана потужність плавно зменшується зі зростанням кількості пар полюсів. Це пояснюється тим, що характер зміни відносної споживаної потужності k_p переважно визначається зворотною залежністю числа пар полюсів, яка входить у вираз (3.4) і має гіперболічний вигляд.

Висновки до розділу

1. Отримані вирази щодо відносного моменту та відносної споживаної потужності для визначення характеристик двигуна при різному числі пар полюсів.
2. Розроблено кінцево-елементну модель моментного двигуна з стрічковим намотуванням з можливістю зміни числа пар полюсів і величини повітряного зазору, що дозволяє визначити характер зміни складових виразу для відносного моменту.
3. Розраховані значення моменту та споживаної потужності при одній парі полюсів для двох типорозмірів двигуна з стрічковою намоткою, що дозволяють отримати значення даних характеристик при інших значеннях числа пар полюсів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Фактори, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом

Для усунення небезпеки поразки електрострумом важливо знати чинники, що впливають на його результат. Характер впливу електричного струму на організм людини, а відтак і наслідки ураження, залежать від цілої низки факторів, які умовно можна підрозділити на фактори електричного та неелектричного характеру (рис. 4.1).

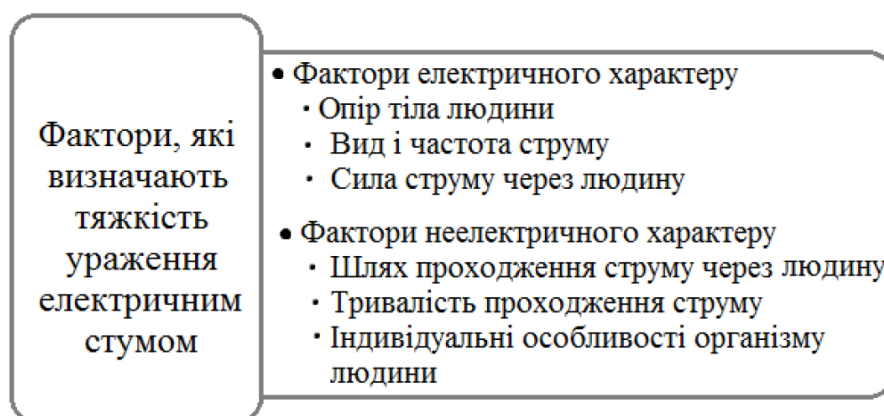


Рисунок 4.1 – Фактори, що визначають тяжкість ураження людини

Розглянемо ці фактори докладніше. [13]

1. Опір тіла людини електричному струму. Тіло людини є провідником електричного струму, але електропровідність біологічної тканини відрізняється значною своєрідністю порівняно з провідністю металів, електролітів, газів. Це зумовлено не тільки фізичними властивостями живої тканини, але і дуже складними біохімічними і біофізичними процесами, властивими біологічній субстанції. Опір тіла людини проходженню струму – це опір струму, який протікає по ділянці між двома електродами, прикладеними до тіла людини (рис. 4.2).

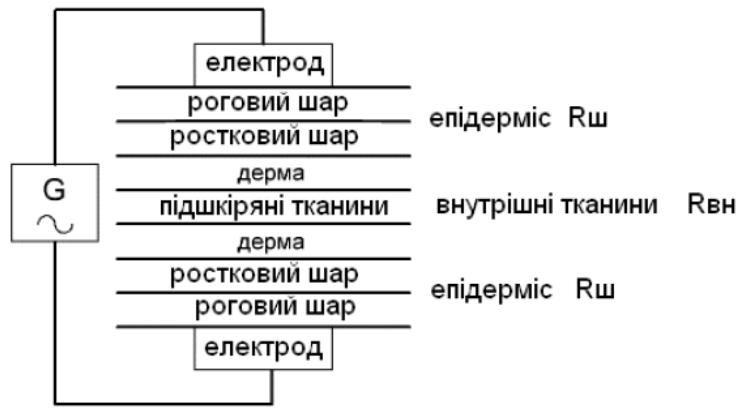


Рисунок 4.2 – Спрощена анатомічна схема опору тіла

Як видно з рис. 4.2 шкіра володіє найбільшим питомим опором, що визначає опір всього тіла людини. Величина повного опору тіла залежить, головним чином, від стану рогового шару (0,05...0,2 мм), який позбавлений кровоносних судин і нервів. Саме тому роговий шар має найвищий питомий опір. Наявність подряпин й інших пошкоджень, вологи та забруднень різко знижують опір тіла людини. Звичайно ця величина знаходиться в межах 3...1000 кОм. Але в теоретичних розрахунках з урахуванням «запасу на безпеку» вона вважається рівною 1000 Ом.

2. Вид і частота струму. Наявність ємнісної складової пояснює те, що тіло людини представляє різний опір змінному і постійному струмам. Постійний струм приблизно в 3–5 разів безпечніший, ніж змінний струм на частоті 50–60 Гц. Постійний струм, проходячи через тіло людини, викликає слабші скорочення м'язів і менш неприємні відчуття порівняно зі змінним того ж значення. Лише в момент замикання і розмикання ланки струму людина відчуває короточасні болісні відчуття внаслідок судомного скорочення м'язів. Проте ця властивість спостерігається при напрузі до 500 В. При більш високій напрузі постійний струм стає більш небезпечним.

3. Сила струму. Із зростанням сили струму небезпека ураження зростає. Залежно від величини розрізняють: відчутний, невідпускаючий і фібриляційний струми. Кожний з них характеризується своїм найменшим пороговим значенням. Для змінного струму безпечним вважається струм,

який у разі тривалого проходження через організм людини не завдає йому шкоди і не викликає ніяких відчуттів. Його величина не перевищує 0,05 мА. Струм, величиною від 0,5 до 1,5 мА називається пороговим відчутним струмом. Він викликає поколювання і відчуття нагрівання шкіри. За струму 2–5 мА з'являється біль в руці, тремтіння кисті.

4. Тривалість проходження струму через організм істотно впливає на результат ураження: чим триваліша дія струму, тим більша ймовірність важкого чи смертельного результату. Така залежність пояснюється тим, що зі збільшенням часу впливу струму на живу тканину зростає значення цього струму (за рахунок зменшення опору тіла), збільшуються (накопичуються) наслідки впливу струму на організм і підвищується імовірність збігу моменту проходження струму через серце під час уразливої для струму фазою серцевого циклу (кардіоциклу).

5. Індивідуальні властивості людини відіграють помітну роль у результаті ураження. Встановлено, що здорові та фізично міцні люди легше переносять електричні удари, ніж хворі і слабкі. Також опір тіла змінюється з віком, у дорослих опір вище, ніж у дітей. Опір тіла людини зменшується при алкогольному сп'янінні, а також у людей, що страждають хворобами шкіри, легенів, серцево-судинними, нервовими хворобами та ін. Небезпека електротравми також значно підвищується при перевтомі, наслідком якої є розсіяність уваги, порушення координації рухів і зниження швидкості реакції. Як доводить статистика, число уражень в кінці зміни та понадурочний час зростає. Опір тіла людини залежить також від статі і віку людей: у жінок цей опір менший, ніж у чоловіків, у дітей – менший, ніж у дорослих, у молодих людей менший, ніж у літніх. Це пояснюється товщиною і ступенем огрублення верхнього шару шкіри.

4.2 Організаційні заходи з електробезпеки

Щодо заходів електробезпеки ПУЕ підрозділяє електроустановки на чотири типи:

- електроустановки напругою до 1 кВ в електричних мережах з ізолюованою нейтраллю;
- електроустановки напругою до 1 кВ в електричних мережах з глухозаземленою нейтраллю;
- електроустановки напругою вище 1 кВ в електричних мережах з глухозаземленою або ефективно заземленою нейтраллю;
- електроустановки напругою вище 1 кВ в електричних мережах з ізолюованою, компенсованою або (і) заземленою через резистор нейтраллю.

Ізолюованою нейтраллю називається нейтраль трансформатора або генератора, не приєднана до заземлювального пристрою або приєднана до нього через прилади сигналізації, захисту, контролю тощо. Якщо нейтраль приєднана до заземлювального пристрою безпосередньо або через малий опір, то вона називається заземленою.

Встановлено п'ять кваліфікаційних груп з електробезпеки: при збільшенні кваліфікаційної групи – збільшуються вимоги до знань й умінь.

Для одержання групи I, незалежно від посади і фаху, необхідно пройти інструктаж з електробезпеки під час роботи в даній електроустановці з оформленням у журналі реєстрації інструктажів з питань охорони праці.

Мінімальний стаж роботи в електроустановках і видання посвідчень працівникам з групою I не вимагаються. Особам молодшим за 18 років не дозволяється присвоювати групу вище II.

Для присвоєння наступної групи з електробезпеки необхідно мати мінімальний стаж роботи в електроустановках з попередньою групою.

Для одержання груп II – III працівники повинні мати стаж роботи з I групою електробезпеки один або два місяці залежно від виду освіти і відповідати таким вимогам:

- чітко усвідомлювати небезпеку, пов'язану з роботою в електроустановках;
- знати і вміти застосовувати на практиці ці та інші правила безпеки в обсязі, потрібному для роботи, яка виконується;

- знати будову електроустановок;
- вміти практично надавати першу допомогу потерпілим у разі нещасних випадків, у тому числі застосовувати способи штучного дихання і зовнішнього масажу серця.

Для одержання груп IV-V додатково необхідно знати компонування електроустановок і уміти організувати безпечне проведення робіт, уміти навчити працівників інших груп Правил безпеки і надання першої допомоги потерпілим від електричного струму. Окрім цього, стаж роботи з попередньою групою має бути: при отриманні групи IV – три місяці для осіб зі спеціальною освітою та 12 місяців для осіб без спеціальної освіти; при отриманні групи V – 6–12 місяців для осіб із спеціальною освітою та 24 місяці для осіб без спеціальної освіти. Для одержання групи V необхідно також розуміти, чим викликані вимоги пунктів ПБЕЕ

Вимоги до електричного обладнання залежать від приміщення, в якому воно розташовано. За небезпекою ураження людей електричним струмом виробничі приміщення поділяються на приміщення особливо небезпечні, з підвищеною небезпекою та без підвищеної небезпеки.

Особливо небезпечні приміщення характеризуються наявністю одного з таких факторів:

- мають підвищену вологість (відносна вологість у них наближається до 100 %);
- хімічно активне або органічне середовище, яке постійно чи тимчасово протягом тривалого часу руйнівню впливає на ізоляцію та струмовідні частини;
- можлива одночасна наявність двох факторів, що визначають умови підвищеної небезпеки. Приміщення з підвищеною небезпекою характеризуються наявністю в них одного з таких факторів:
 - відносна вологість тривалий час перевищує 75 %;
 - наявність струмопровідних підлог (металеві, земляні, залізобетонні та ін.);

- струмопровідний пил;
- висока температура (постійно або періодично більше однієї доби температура перевищує +35 оС);
- наявність великих заземлених металевих конструкцій та можливий одночасний дотик людини до заземлених металоконструкцій будівель з одного боку і металевих корпусів електрообладнання з іншого боку.

Приміщеннями без підвищеної небезпеки є всі приміщення, в яких немає факторів, що визначають особливу і підвищену небезпеку.

Слід зазначити, що електроустановки, які розташовані поза приміщеннями, за ступенем небезпеки прирівнюються до електроустановок, які експлуатуються в особливо небезпечних приміщеннях [11].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних досліджень, проведених у кваліфікаційній роботі магістра, можна зробити такі висновки:

1 Аналітично виведено вираз для сили яка розвивається пластиною зі струмом і магнітним полем, з врахуванням протікання розподіленого струму через неї. Запропоновано методику побудови силової характеристики пластини для двигуна стрічкової намотки.

2 Запропоновано тип обмотки якоря електромеханічного перетворювача – стрічкова обмотка з бічними вирізами, яка дозволяє посилити тепловідведення, забезпечити велике струмове навантаження і підвищити механічний момент, більш ніж у 2,5 рази.

3 Розроблено кінцево-елементну модель електромеханічного перетворювача зі стрічковою обмоткою якоря, що дозволяє визначити та дослідити залежності моменту від кута повороту ротора, з урахуванням дії струму стрічкової обмотки (реакції якоря).

4 Встановлено залежності геометричних параметрів стрічкової обмотки якоря електромеханічного перетворювача, а саме співвідношення довжини пластини і ширини 0,68-0,72, що забезпечує максимальний механічний момент двигуна.

5 Показано можливість формування необхідної силової характеристики пластини двигуна стрічкової намотки шляхом виконання додаткових бічних вирізів у пластині. Показано, що мінімальне значення її опору буде спостерігатися при певному співвідношенні розмірів пластини стрічкової намотки моментного двигуна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електричні машини апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлєв та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с
2. Chau, K. T. Overview of permanent-magnet brushless drives for electrical and hybrid electric vehicles / K. T. Chau, C. C. Chan, C. Liu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55(6). – P. 2246-2257.
3. Cho, K.-H. Coupled electro-magneto-thermal model for induction heating process of a moving billet / K.-H. Cho // International Journal of Thermal Sciences. – 2012. – Vol. 60. – P. 195-204.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. Овчаренко В.А., Подлєсний С.В., Зінченко С.М. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с
6. Кіреєв В.Г., Акинін К.П. Особливості розробки безпазових безконтактних магнітоелектричних моментних двигунів // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : журнал. — Київ, 2022. — Iss. 63 (листопад). — P. 31-39.
7. COMSOL AC/DC Module User's Guide / Version: April 2010 COMSOL 4.0, p. 234.
8. Chau, K. T. Overview of permanent-magnet brushless drives for electrical and hybrid electric vehicles / K. T. Chau, C. C. Chan, C. Liu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55(6). – P. 2246-2257.
9. Cho, K.-H. Coupled electro-magneto-thermal model for induction heating process of a moving billet / K.-H. Cho // International Journal of Thermal Sciences. – 2012. – Vol. 60. – P. 195-204.

10. Gieras, J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications, 3rd ed. / J. F. Gieras – CRC Press : Taylor & Francis Group, 2010.– 600 p.
11. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.
12. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.