

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТм-61

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Качанов Б. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Наконечний М. С.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Мовчан Л. Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Тарасенко М. Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Микулик П. М.
(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.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

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

1. Тема роботи Моделювання електричних та теплових характеристик електродвигуна змінного струму

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

Затверджені наказом ректора від «09» листопада 2022 року № 4/7-883

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2022 року

3. Вихідні дані до роботи Конструкційні параметри двигуна

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський 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	Мовчан Л. Т. к. т. н., доцент		

7. Дата видачі завдання 10 листопада 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка

Студент

(підпис)

Качанов Б. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Наконечний М. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Качанов Б. О. Моделювання електричних та теплових характеристик електродвигуна змінного струму. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2022

сторінок. - 67 рисунків - 32; таблиць -4; джерел – 14.

У даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз факторів які мають вплив на ефективність асинхронних двигунів. Показано важливість врахування температурної зміни опору обмоток під час побудови термодинамічних моделей електричних машин.

Розроблено імітаційну модель для розрахунку електричних та температурних параметрів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором Розраховано електромагнітні втрати та здійснено розрахунок температурного поля в навантаженому режимі.

Ключові слова: електродвигун, асинхронний двигун, магнітне поле, температура, ефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз та класифікація двигунів змінного струму	9
1.2 Асинхронні електродвигуни	10
1.3 Аналіз конструкції асинхронних двигунів	12
1.4 Аналіз шляхів підвищення енергоефективності електродвигунів.....	17
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Вибір способу розрахунку електричного та теплового поля електричних двигунів	20
2.2 Методи моделювання електричних процесів в обмотці статора	21
2.3 Методика моделювання втрат в електродвигунах.....	24
2.4 Джерела тепла в електричних двигунах	26
2.5 Тепловий розрахунок електричних машин на основі чисельних методів розрахунку.....	28
2.6 Оцінка впливу температурної залежності параметрів на властивості термодинамічної моделі електричної машини.....	32
2.7 Вплив температурної залежності теплоємностей та теплових провідностей на результати розрахунку	38
2.8 Розробка геометрії моделі електродвигуна	41
2.9 Висновки до розділу	44
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	45
3.1 Попередній розрахунок параметрів електродвигуна	45
3.2 Розрахунок втрат	47
3.3 Температурний розрахунок електродвигуна.....	49
3.4 Моделювання роботи двигуна в навантаженому режимі	53

3.5 Висновки до розділу	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
4.1 Заходи безпеки під час експлуатації електродвигунів	59
4.2 Організація цивільного захисту на об'єкті господарської діяльності	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	66

ВСТУП

Електродвигуни є невід'ємною частиною технічного прогресу сучасного суспільства. Вони широко застосовуються у виробництві, побуті, технологічних процесах та механізмах. Одним із найпоширеніших типів електродвигунів змінного струму є асинхронний двигун. Простота та економічність його конструкції робить даний тип електродвигуна надійним для широкого застосування в багатьох сферах промисловості.

Будучи широко застосованим даний тип електродвигуна повинен бути енергоефективним, щоб задовольнити постійно зростаючий попит на електроенергію. Щоб спроектувати та створити ефективний двигун, дуже важливо мати глибокі знання про втрати, що виникають у машині.

В даний час однією з проблем в електромеханіці є точність оцінки та розрахунків електричних машин на нагрівання та тепловиділення. Причому дане завдання потрібно вирішувати на початковому етапі.

Саме рівень теплових навантажень визначає граничну межу для ізоляції проводів обмоток, підшипникових вузлів, а також інші зони, обмежуючи ресурс роботи двигуна. Оцінка теплового поля дозволяє внести необхідні зміни в параметри двигуна та є **актуальною** на етапі проектування для оптимізації його конструкції з необхідними вихідними характеристиками, умовами та тривалістю роботи.

Аналіз існуючих методів розрахунку електромагнітних та температурних полів асинхронних двигунів, а також інших електротехнічних виробів виявив наявність різних способів їх розрахунку методом еквівалентних схем і чисельним методом, який показав необхідну точність. Для досягнення найточнішого результату необхідно враховувати якнайбільше факторів, що сприяють появі втрат, нагріванню/остиганню, та розглядати в динаміці теплове поле.

Мета і завдання дослідження. Метою дипломної роботи розрахунок електричних та температурних характеристик двигуна змінного струму на основі його математичної моделі.

Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

1. Розглянути сучасний стан теорії розрахунку та моделювання теплових процесів у електричних машинах.

2. Розробити математичну модель асинхронного двигуна, що дозволяє протягом короткого часу отримувати результати, змінюючи вхідні дані, розміри та властивості елементів його конструкції.

3. Провести імітаційне моделювання теплових режимів асинхронного електродвигуна із визначенням електромагнітних та температурних полів та рівня втрат в основних конструктивних складових

Об'єкт дослідження – електромагнітні та температурні процеси в електродвигунах змінного струму.

Предмет дослідження – асинхронні двигуни змінного струму з коротко замкнутим ротором

Наукова новизна отриманих результатів:

Розроблена імітаційна модель електродвигуна дає можливість ввести коригування у плані додаткового введення залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури у разі значного впливу даного фактору на результат розрахунку. Можливе введення додаткових граничних умов, що спричинить незначну зміну в математичній моделі.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблена модель надає можливість оцінити температури конструктивних частин на початковій стадії проектування типової конструкції електродвигуна, вводячи конструктивні та теплофізичні параметри та задаючи граничні умови аналітично у вигляді розмірів, коефіцієнтів та математичні залежності параметрів, що визначають розподіл електромагнітного та теплового полів.

Апробація результатів магістерської роботи.

Вибрані положення роботи доповідалися на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль 7-8 грудня 2022

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (14 найменувань). Загальний обсяг текстової частини: 67 сторінки, 4 таблиць, 32 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз та класифікація двигунів змінного струму

Електродвигун – пристрій для перетворення електроенергії у обертальний рух обертової частини електричної машини. Перетворення енергії у двигунах відбувається за рахунок взаємодії магнітних полів обмоток статора та ротора. Ці електричні машини широко використовуються у всіх галузях промисловості, як привід електротранспорту та інструментів, в системах автоматизації, побутової техніки і так далі.

Існує безліч видів електродвигунів, що різняться за принципом дії, конструкції, виконання та інших ознак.[1] Розглянемо основні типи цих електричних машин.

За принципом дії розрізняють магнітоелектричні та гістерезисні електричні машини. Незважаючи на простоту конструкції, високий пусковий момент, останні не набули широкого поширення. Ці електродвигуни мають високу ціну, низький коефіцієнт потужності, що обмежують їхнє застосування. Переважна більшість електродвигунів, що випускаються – магнітоелектричні.

За типом напруги живлення розрізняють:

- Електродвигуни постійного струму
- Двигуни змінного струму.
- Універсальна електрична машина.

По конструкції розрізняють електродвигуни з горизонтально та вертикально розташованим валом. Крім того, електричні машини класифікують за призначенням, кліматичним виконанням, ступенем захисту від потрапляння вологи та сторонніх предметів, потужністю та іншими параметрами.

Електродвигуни змінного струму можна розділити на дві категорії; асинхронні та синхронні.[2-3]

1.2 Асинхронні електродвигуни

Завдяки дешевизні та простоті конструкції електричні машини такого типу набули найбільшого поширення. Їхня принципова відмінність – наявність так званого ковзання. Це різниця між частотою обертання магнітного поля нерухомої частини електричної машини та швидкістю обертання ротора. Напряга на частині, що обертається, індукується за рахунок змінного магнітного поля обмоток статора двигуна. Обертання викликає взаємодію поля електромагнітів нерухомої частини та магнітного поля ротора, що виникає під впливом наведених у ньому вихрових струмів. За особливостями обмоток статора виділяють:

Однофазні двигуни змінного струму. Двигуни такого типу вимагають для запуску наявності зовнішнього фазозсувного елемента. Це може бути пусковий конденсатор чи індуктивний пристрій.

Двофазні електричні машини. Такі двигуни мають дві обмотки зі зміщеними щодо один одного фазами.

Три-і багатофазні електродвигуни. Найпоширеніший тип асинхронних машин. Електричні двигуни такого типу мають від 3 і більше обмоток статора, зміщених по фазі на певний кут.

За конструкцією ротора асинхронні електричні машини ділять на двигуни з короткозамкненим та фазним ротором.

Обмотка ротора електричних машин першого типу є кілька неізольованих стрижнів, виконаних зі сплавів міді або алюмінію, замкнутих з двох сторін кільцями (конструкція "білячої клітки"). Асинхронні двигуни такого типу мають такі переваги:

- Досить проста схема запуску. Такі електричні машини можна підключати безпосередньо до електромережі через апарати комутації.
- Допустимість короткочасних перевантажень.

- Можливість виготовлення електричних машин високої потужності. Двигун такого типу не містить ковзних контактів, що перешкоджають нарощуванню потужності.
- Відносно прості в ремонті. Асинхронні електромашини мають легку конструкцію.
- Низька ціна. Двигуни асинхронного типу коштують дешевше за синхронні машини і ДПС.

Електричні машини з короткозамкненим ротором мають недоліки:

- Гранична швидкість обертання не перевищує 3000 об/хв при вході в синхронний режим.
- Технічно складна реалізація регулювання частоти обертання.
- Високі пускові струми під час прямого запуску.

Електродвигуни з фазним ротором частково позбавлені недоліків, властивих машинам з ротором конструкції "білячої клітки". Обертова частина, електричної машини такого типу має обмотки, з'єднані в схему "зірка". Напруга підводиться до обмотки через 3 контактних кільця, закріплених на роторі та ізольованих від нього.

Такі електродвигуни мають такі переваги:

- Можливість обмежувати пускові струми за допомогою резистора, включеного в коло електромагнітів ротора.
- Більший, ніж у електромашин із короткозамкненим ротором, пусковий момент.
- Можливість регулювання швидкості.

Синхронні двигуни змінного струму

Як і асинхронних електродвигунах, обертання ротора в синхронних машинах досягається взаємодією полів ротора і статора. Швидкість обертання ротора таких електричних машин дорівнює частоті магнітного поля, створюваного статора обмотками.

Обмотка нерухомої частини двигуна розрахована на живлення трифазної напруги. До електромагнітів ротора підключається постійна

напруга. Розрізняють явнополюсні та неявнополюсні обмотки. У синхронних двигунах малої потужності використовують постійні магніти.

Запуск та розгін синхронної машини здійснюється в асинхронному режимі. Постійна напруга подається на електромагніти після розгону до номінальної частоти асинхронного режиму. Синхронні двигуни мають такі особливості:

- Постійна швидкість обертання при змінному навантаженні.
- Високий к.к.д. та коефіцієнт потужності.
- Невелика реактивна складова.
- Допустимість перевантаження.

До недоліків синхронних електродвигунів відносяться:

- Висока ціна, відносно складна конструкція.
- Складний запуск.
- Необхідність у джерелі постійної напруги.
- Складність регулювання швидкості обертання та моменту на валу.

Усі недоліки електричних машин змінного струму можна виправити установкою пристрою плавного запуску або частотного перетворювача. Обґрунтування вибору того чи іншого пристрою зумовлено економічною доцільністю та необхідними характеристиками електроприводу.

1.3 Аналіз конструкції асинхронних двигунів

Асинхронний двигун складається з двох основних частин, розділених повітряним зазором: нерухомого статора, який є в основному індуктором, і ротора, що обертається. Статор і ротор складаються з осердя - магнітопроводу з пазами та обмоток.[4]

До основних конструктивних вузлів асинхронного двигуна представленого на рисунку.1.1, можна віднести шихтований магнітопровід статора з обмоткою змінного струму запресований в станину; шихтований магнітопровід (ротора з обмоткою, встановлений на вал, що обертається, який передає електромагнітний момент навантаженню; підшипникові вузли;

підшипникові щити; вентилятор; коробку з виводами; пристрій кріплення до фундаменту або основи.

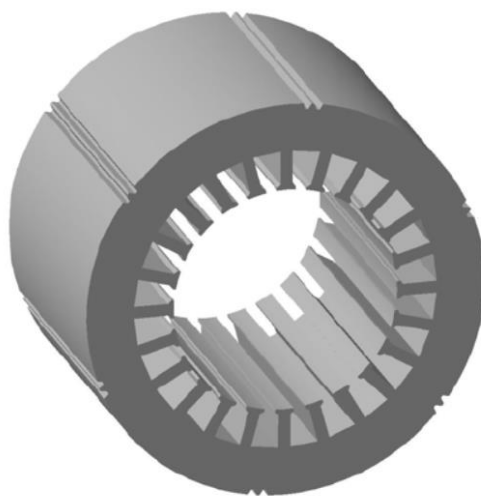


Рисунок. 1.1 – Осердя магнітопроводу статора без обмотки.

Існують два основні типи асинхронних двигунів: двигун із короткозамкненим ротором та двигун з фазним ротором. Обидва двигуни мають однакову конструкцію статора та відрізняються тільки конструкцією ротора.

За способом монтажу найбільшого поширення набули виконання ІМ1 – ІМ4. Серед машин малої потужності поширені виконання ІМ5 та ІМ9, які застосовують у побутових пристроях та електрифікованому інструменті.[4-5]

За ступенем захисту від впливу навколишнього середовища для машин малої потужності поширене виконання ІР44 та ІР54 зі способом охолодження ІС041, а для машин середньої та великої потужності – також виконання ІР23 зі способом охолодження ІС01.

Магнітопровід осердя статора шихтують листами електротехнічної сталі завтовшки 0,35-0,5 мм. Осердя статора асинхронного двигуна з висотою осей $h \leq 250$ мм набирається з шихтованих листів електротехнічної сталі з базуванням по внутрішньому діаметру та шліц пазів. Якщо застосовується сталь марки 2013, листи після штампування проходять термічну обробку з

подальшим оксидуванням у печах з автоматичним режимом. Набране осердя спресовують під тиском $\approx 1,5$ МПа і скріплюють сталевими скобами, які розташовуються на зовнішній поверхні осердя.

Осердя двигуна $h = 50-90$ мм зварюють із зовнішньої поверхні. Обмотані та просочені осердя статора двигунів впресовують станини. Іноді листи магнітопроводу встановлюють безпосередньо в станину і в процесі опресування закріплюють кільцевими шпонками або набирають на центруючу оправку поза станиною і сталевими планками, розташованими у неглибоких прямокутних канавках, привареними до натискних шайб та частково – до спинки осердя.

Форма пазів осердя в основному трапецеїдальна напівзакрита; прямокутна відкрита. Конструкції станини асинхронного двигуна за ступенем захисту IP44 і IP23 принципово різні. Станина двигуна IP44 з $h \leq 355$ мм виконується у формі циліндра з поздовжніми ребрами на зовнішній поверхні (рис. 2) або з трубками охолоджувача повітря у двигунів з $h > 400$ мм.

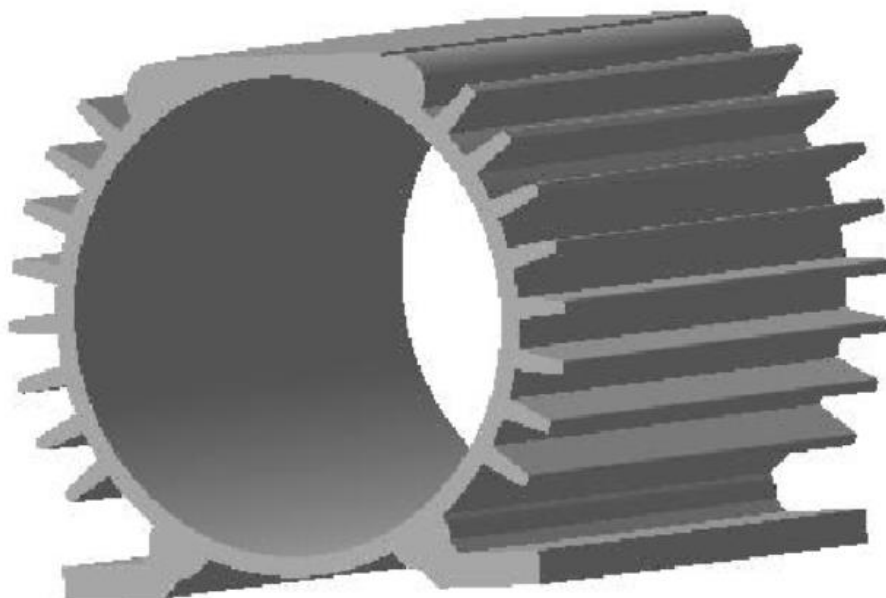


Рисунок 1.2. – Станина АД у виконанні IP44

У двигунів з $h < 63$ мм станини литі з алюмінію. При $h = 71-100$ мм застосовується комбінована конструкція: станини із алюмінієвого сплаву, підшипникові щити із чавуну.

Метод виконання станин з порожнистого профілю, одержуваного шляхом екструзії з алюмінієвого сплаву у вигляді труби, знаходить все ширше застосування.

Асинхронні двигуни з литими чавунними оболонками (станинами) до $h \leq 280$ мм набули найбільшого поширення у світовій практиці електромашинобудування. Двигуни з $h > 280$ мм виконуються зі звареними станинами із сталевого прокату.

За конструкцією ротор асинхронного двигуна виконується короткозамкненим типу «біляча клітка» (рис.1. 3) чи фазним, в пазах якого розміщується обмотка змінного струму, має стільки фаз і полюсів, як і обмотка статора.

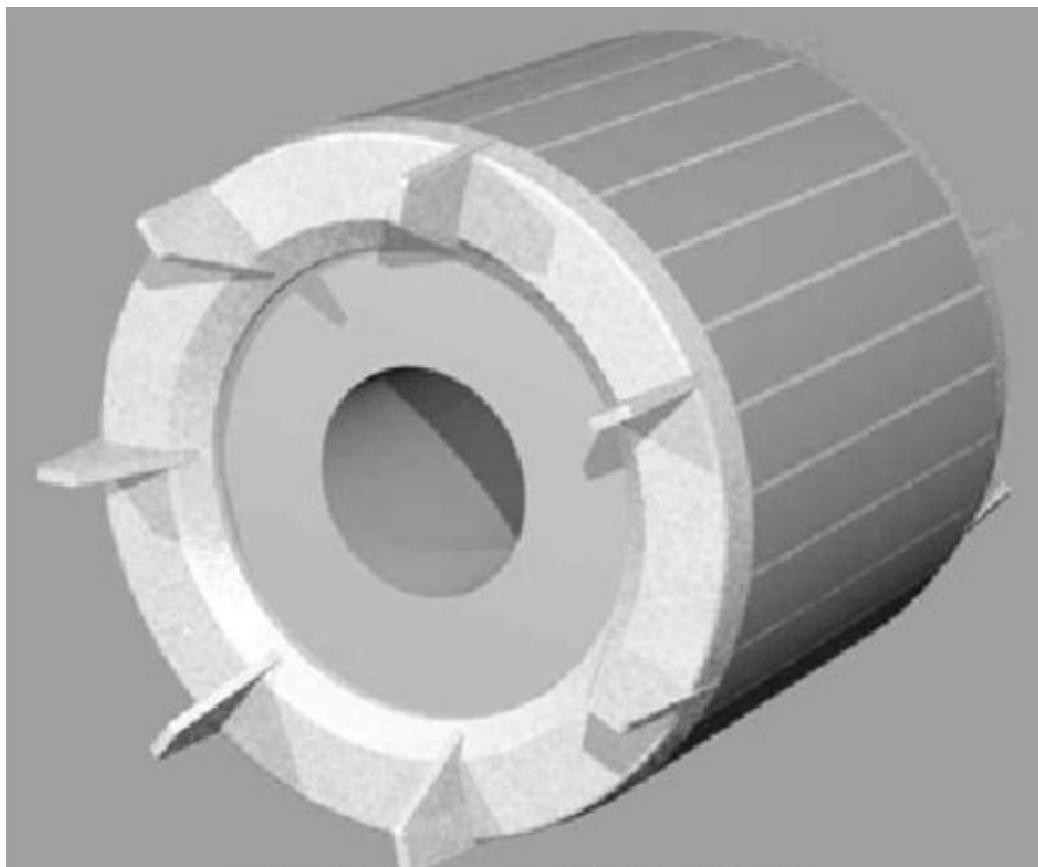


Рисунок 1.3. – Короткозамкнений ротор

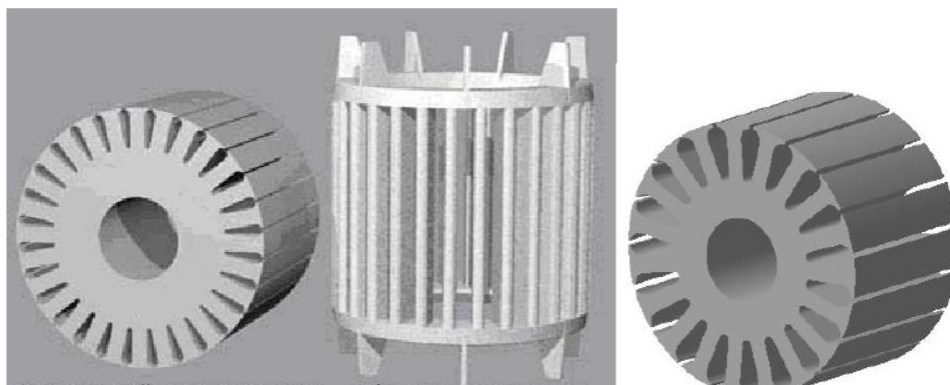


Рисунок. 1.4. – Конструкція магнітопроводу та обмотки короткозамкнутого ротора

Ротор складається з шихтованого магнітопроводу і короткозамкнутої обмотки типу «біляча клітка» (рис. 1 4).

Ротор з обмоткою напресовується на вал двигуна. Штампування листів осердя ротора проводиться одночасно зі штампуванням листів статора.

Листи ротора у двигуна $h < 250$ мм виготовляються зі сталі 2013 і набираються на оправку, пресуються і без зняття тиску закріплюються на оправці. У такому вигляді осердя ротора заливається алюмінієм.

Осердя короткозамкнених роторів після заливання алюмінієм напресовують на вал. При заливанні алюмінієм одночасно відбувається формування короткозамкнених кілець та вентиляційних лопаток.

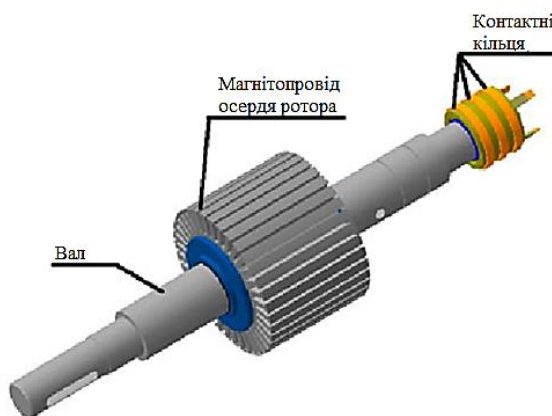


Рисунок. 1.5. – Фазний ротор асинхронної машини без обмотки.

Фазний ротор (рис. 1.5) складається з осердя магнітопроводу та обмотки ременного струму, фази якої з'єднані в зірку, рідше – у трикутник, і мають три виведення, які приєднуються до контактних кілець, розташованих усередині корпусу або на виступаючому кінці валу.

1.4 Аналіз шляхів підвищення енергоефективності електродвигунів

Питання створення енергозберігаючих електродвигунів виникло одночасно з винаходом самих електричних машин. На Міжнародній електротехнічній виставці 1891 р. у Франкфурті-на-Майні, Чарльз Браун (який згодом заснував компанію АВВ) показав синхронний трифазний генератор, власного виробництва, ККД якого перевищував 95%. Асинхронний трифазний двигун, представлений Михайлом Доліво-Добровольським, показав ККД 95%. З того часу показники ККД трифазного асинхронного двигуна вдалося покращити лише на один-два відсотки. Найбільш гостро інтерес до енергозберігаючих двигунів виник наприкінці 1970-х років під час світової нафтової енергетичної кризи. Виявилось, що економити одну тону умовного палива набагато дешевше, ніж видобути. Під час кризи багато разів зросли капіталовкладення у сферу енергозбереження. У багатьох країнах стали виділяти спеціальні гранди на енергозберігаючі програми.[6]

Після проведення аналізу проблеми енергозбереження виявилось, що більше половини електроенергії, що виробляється у світі, витрачають електродвигуни. Тому над їх удосконаленням працюють усі провідні електротехнічні компанії у світі.

Збільшення ККД в енергозберігаючих двигунах досягається за рахунок:

- Збільшення частки активних матеріалів - міді та сталі;
- Використання більш тонкої та високоякісної електротехнічної сталі;
- Застосування замість алюмінію міді в роторних обмотках;
- Зменшення повітряного зазору в статорі за допомогою прецизійного технологічного обладнання;

- Оптимізації форми зубцевої зони магнітопроводу та конструкції обмоток;
- Використання підшипників вищого класу;
- Особливої конструкції вентилятора;

За статистичними даними, ціна всього двигуна становить менше ніж 2% сумарних витрат на життєвий цикл. Так, якщо Двигун працює 4000 годин щорічно протягом 10 років, то на електроенергію припадає приблизно 97% всіх витрат на весь життєвий цикл. Ще близько одного відсотка припадає на монтаж та техобслуговування. Тому збільшення ККД двигуна середньої потужності на 2% дозволить окупити збільшення вартості енергозберігаючого двигуна вже за 3 роки, залежно від режиму роботи. Практичний досвід та розрахунки показують, що збільшення вартості енергозберігаючого двигуна окупається за рахунок заощадженої електроенергії при експлуатації в режимі S1 за рік-півтора (при річному напрацюванні 7000 годин).

Негативною властивістю електродвигунів із підвищеною ККД порівняно із звичайними є:

- на 10-30% вище вартість;
- дещо більша маса;
- вища величина пускового струму.

Обсяги енергозбереження внаслідок впровадження енергоефективного двигуна можуть виявитися незначними порівняно з потенціалом приводу зі змінною швидкістю. Кожен додатковий відсоток ККД потребує збільшення маси активних матеріалів на 3-6%. При цьому момент інерції ротора зростає на 20-50%. Тому високоефективні двигуни поступаються звичайним за динамічними показниками, якщо при їх розробці спеціально не враховується ця вимога.

При виборі на користь енергоефективного двигуна необхідно ретельно підходити до питання ціни. За прогнозами аналітиків мідь дорожчатиме значно швидше за сталь. Постійні магніти з рідкісноземельних матеріалів дорожчатимуть більше і швидше, ніж мідь, що призведе до значного

подорожчання таких двигунів. Тобто двигун з підвищеним вмістом цих матеріалів буде дорожчим при наступній заміні після закінчення терміну служби.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір способу розрахунку електричного та теплового поля електричних двигунів

Існує два підходи до аналізу електричних машин: з використанням методів теорії кіл та теорії поля.

Завдяки методам теорії кола вдалося побудувати дуже строгу і зрозумілу класичну теорію електричних машин, а також отримати їх схеми заміщення. Однак використання методів теорії кола для врахування особливостей конструкції електричної машини та для вирішення надмірно ускладнених систем рівнянь, що описують нелінійні процеси, виявилось незручним та не завжди можливим.[5]

Використання методів на основі теорії поля дозволило усунути недоліки методів теорії кіл завдяки можливості знаходження величин поля (магнітні, теплові та інші поля) у будь-якій точці об'єму електричної машини, а також отримати повну картину розподілу цих величин у різних частинах електричної машини з подальшим знаходженням інтегральних величин. Серед польових методів розрахунку найбільшого поширення набули аналітичні та чисельні методи.

Перевагою аналітичних методів розрахунку є можливість строгого математичного опису явищ як алгебраїчних чи диференціальних рівнянь, дозволяють аналізувати залежності величин поля від вихідних параметрів, встановити точний зв'язок між різними величинами. Однак строгий аналітичний опис можливий лише для порівняно простих моделей з припущеннями, які в деяких випадках можуть призводити до неприпустимих похибок.

Численні методи розрахунку поля дозволяють усунути зазначені недоліки. За відсутності необхідності в строгому математичному описі процесів, що відбуваються в електричній машині, використання чисельних методів краще, оскільки в цьому випадку припущення, прийняті при

розрахунку полів, мінімальні, а похибка розрахунку при цьому визначається лише розмірами розрахункової сітки, що використовується. Серед відомих чисельних методів розрахунку поля основним можна вважати метод кінцевих елементів (МКЕ). У порівнянні з методом кінцевих різниць МКЕ зручно застосовувати для моделей досить складної конфігурації та з різною щільністю розрахункової сітки.

Серед усієї різноманітності сучасних розрахункових засобів виділимо найбільш поширені програмні комплекси, такі як ANSYS multiphysics, Maxwell, Comsol multiphysics, Flux, Jmag, FEMM, що дозволяють вирішувати багато, у тому числі пов'язаних польових завдань: електромагнітні, теплові, поле механічних напруг, враховуючи при цьому їхній взаємний вплив. Для вирішення деяких завдань можливості програмних комплексів можуть виявитися надмірними. Наприклад, для розрахунку циліндричних машин часто буває достатньо розрахувати двовимірне завдання з припущенням про плоскопаралельність магнітного поля. Правомірність такого підходу відома досить добре. При цьому розрахунковий час у кілька разів зменшується, а похибка виявляється прийнятною для інженерних завдань. [6]

Моделювання магнітного поля завжди супроводжується рядом допущень, кожне з яких робить модель тією чи іншою мірою відмінною від реального об'єкта. З погляду економії розрахункового часу вигідно використовувати простіші моделі. Однак, при цьому точність отриманого результату може виявитися неприпустимо низькою. Тому в цій роботі обрано позицію мінімізації прийнятих припущень, а також побудову моделі, найбільш близьку до реальної геометрії та параметрів електричної машини.

2.2 Методи моделювання електричних процесів в обмотці статора

Дослідження витіснення струму в прямокутних провідниках компактної обмотки пов'язане з вирішенням задачі моделювання магнітного поля,

створюваного змінними трифазними струмами статора обмотки, в перерізі активної частини машини.

Метод кінцевих елементів дозволяє досить точно врахувати вплив особливостей конструкції компактної обмотки, на електричні в обмотці, і запропонувати уточнений метод розрахунку активного опору фази обмотки статора. Для отримання картини розподілу густини струму вирішується диференціальне рівняння Лапласа щодо електричного потенціалу φ . Загалом, для тривимірного завдання у разі ізотропного провідника рівняння стороннього струму з частковими похідними з граничною умовою Діріхле виглядає так:

$$-j = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

Для магнітостатики завдання розподілу струму в об'ємі провідника перетворюється на задачу розподілу електричного потенціалу. Необхідність дослідження розтікання струму в об'ємі провідника змінного перерізу компактної обмотки виникає не тільки при зміні перерізу провідника, але також при зміні глибини проникнення струму через поверхневий ефект. У пакетах програм кінцево-елементного аналізу чисельного визначення значень поля вирішуються системи диференціальних рівнянь Лапласа. Для двовимірної задачі, розв'язання задачі розподілу струму в об'ємі провідника визначається як:

$$-j = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

З рівнянь 2.1 та 2.2 випливає, що розрахунок рівняння Лапласа в двовимірній постановці дозволяє зменшити кількість розрахунків в порівнянні з тривимірною моделлю.

Традиційні методики проектування електричних машин змінного струму досліджують ефект витіснення струму переважно в асинхронних роторах короткозамкнутих машин. В умовах пуску в стержнях білячої клітки відбувається витіснення струму до повітряного зазору, у зв'язку з чим обмотку

ротора виконують з глибокими стержнями для збільшення пускового моменту асинхронного двигуна. Однак вплив нерівномірного розподілу струму в традиційних обмотках статорів не враховується.

У моделі прийнято припущення, що процеси в об'ємі статора циклічно повторюються як у просторі, так і в часі – це дозволяє використовувати наведені нижче диференціальні рівняння для опису розподілу теплового поля.

Метод кінцевих елементів зручно використовуватиме розрахунку електромагнітного поля та джерел тепловиділення асинхронних двигунів. Для двовірної плоскої моделі поле описується рівнянням:

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1} \times A) - \sigma v \times (\nabla \times A) = \left(\frac{\sigma\Delta V}{L} + J_z^e \right) e_z A = A_z e_z \quad (2.3)$$

де, J_z^e - густина зовнішнього струму;

v - вектор швидкості руху елементів ротора;

σ - електропровідність;

A - векторний магнітний потенціал;

μ_0 - магнітна проникність вакууму;

μ_r - відносна магнітна проникність середовища;

ΔV - різниця потенціалів, прикладена до провідника;

L - Довжина провідника в напрямку осі Z ;

ω - кругова частота.

В якості граничних умов прийнято рівність нулю магнітного потенціалу на віддаленому кордоні розрахункової області:

$$A_z = 0 \quad (2.4)$$

Однією із завдань під час проектування машин змінного струму є розрахунок граничних режимів задля забезпечення допустимої температури струмоведучих частин і осердів статора і ротора [7-9]. Для визначення внутрішніх джерел тепла спочатку вирішується електромагнітне завдання у системі провідників ротора та статора. В активних провідниках ротора в залежності від ковзання змінюється частота струму, що призводить до

перерозподілу втрат у цих провідниках. Окремо розглядається завдання визначення джерел тепла у провідниках лобових частин обмотки. Відсутність замкнутого магнітопроводу у просторі біля лобових частин призводить до картини розподілу густини струму, що відрізняється від розподілу струму в активних провідниках. Навіть на низьких частотах струму в окремих ділянках витків обмотки даюгуна спостерігається нерівномірний розподіл густини струму і, що важливіше, у розподілі густини потужності тепловиділення.

2.3 Методика моделювання втрат в електродвигунах

Втрати сталі стали поділяють на дві основні складові: втрати на перемагнічування і вихрові струми. Вони залежать від марки сталі, товщини листів магнітопроводу, частоти перемагнічування та індукції. На них впливають також різні технологічні чинники. У процесі штампування листів магнітопроводу утворюється наклеп, який змінює структуру сталі по краях зубців і збільшує втрати на гістерезис. Втрати на вихрові струми зростають в результаті замикань частини листів магнітопроводу між собою, що виникають через задирки, які утворюються при тисці пазів, при забиванні пазових клинів, через надмірне обпресування магнітопроводу та ряд інших причин [12, 13]. Для боротьби з вихровими струмами застосовуються шихтовані у напрямку протікання вихрових струмів конструкції магнітопроводу. Врахування втрат у такій конструкції магнітопроводу є завданням нетривіальним. [6-7]

В інженерній практиці для визначення втрат на перемагнічування та вихрові струми при синусоїдальній формі кривої магнітного потоку використовують напівемпіричну формулу

$$\Delta P_{cm} = k_m \left(\frac{\Delta P_{nm}}{m} \right)_{1/50} B^2 \left(\frac{f}{50} \right)^\beta m_c, \quad (2.5)$$

де k_m – поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат, спричинених технологічним процесом складання сердечників, рекомендується приймати поправочний коефіцієнт з діапазону $k_m = 1,4-2$

залежно від потужності машини, геометрії сталевих ділянок (зубці, ярмо) тощо;

$$\left(\frac{\Delta P_{nm}}{m} \right)_{1/50} - \text{питомі втрати сталі на одиницю маси при індукції 1 Тл і}$$

частоті 50 Гц;

B – амплітудне значення індукції;

f – частота;

m_c – маса осердя.

Рівняння (2.3) засноване на спрощеному інженерному підході, що не передбачає поділу втрат на втрати від вихрових струмів та гістерезис.

Основні втрати в сталі в асинхронних двигунах розраховуються тільки в осерді статора, так як частота перемагнічування ротора, що дорівнює $f_2 = sf_1$ (s - ковзання, f_1 - частота мережі) у близьких до номінального режимах, дуже мала і втрати в сталі ротора навіть за великих індукціях незначні.

Крім того, в інженерних розрахунках також використовується підхід, заснований на рівнянні Штейнмеца [14]

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e = k_h f^\beta + k_e f^2 B^2, \quad (2.6)$$

де ΔP_h – втрати на перемагнічування;

ΔP_e – втрати на вихрові струми;

α, β - емпіричні коефіцієнти (зазвичай не цілочисленні) α, β лежать у межах $2 < \alpha < 3, 1 < \beta < 3$;

k_h – поправочний коефіцієнт втрат на гістерезис,

k_e - поправний коефіцієнт втрат на вихрові струми.

Розрахунки та експериментальні дані показують значне збільшення втрат при несинусоїдальному магнітному потоці та значному насиченні магнітної системи тощо.

Для обліку цих додаткових факторів, які суттєво впливають на результат, рівняння (2.6) доповнюється третім доданком – так званими додатковими (надлишковими) втратами:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e + \Delta P_{ex} = k_h f^\beta + k_e f^2 B^2 + k_{ex} f^{1.5} B^{1.5} \quad (2.7)$$

де k_{ex} - поправочний коефіцієнт додаткових втрат.

Енергія, що витрачається на перемагнічування, найчастіше визначається за площею квазістатичної петлі гістерезису (S_h) і за f циклів при питомій густині матеріалу може бути знайдена за формулою

$$\Delta P_h = \frac{f}{4\pi\gamma} \oint B dH = \frac{S_h f}{4\pi\gamma}. \quad (2.8)$$

Поправочний коефіцієнт втрат на вихрові струми може бути обчислений для матеріалу з питомим електричним опором ρ і товщиною листа $\Delta_{ст}$ за наступною формулою:

$$k_e = \frac{(\pi\Delta_{cm})^2}{6\rho\gamma}. \quad (2.9)$$

Поправочний коефіцієнт втрат на гістерезис може бути визначено як

$$k_h = \frac{\Delta p_{cm}}{B^2 m f} - \frac{\pi^2 \Delta_{cm}^2 f}{6\rho\gamma}, \quad (2.10)$$

де, Δp_{cm} - питомі втрати сталі (Вт/кг).

Точне визначення втрат аналітичними методами утруднено у зв'язку зі складним розподілом магнітної індукції перерізу машини. Чисельне моделювання дозволяє уточнити величину та локалізацію цих втрат.

2.4 Джерела тепла в електричних двигунах

Перетворення електричної енергії у електромеханічних перетворювачах супроводжується незворотними втратами як тепла. З погляду теплової напруги найбільш уразливою частиною електричних машин та апаратів є ізоляція. При перевищенні допустимого значення температури ізоляція змінює свою структуру, внаслідок чого її старіння відбувається інтенсивніше і при подальшому підвищенні температури ізоляція повністю руйнується, що може призвести до короткого замикання та аварійної ситуації. Матеріали, що застосовуються як ізоляційні, діляться на кілька груп залежно від максимально

допустимого перевищення температури.[8] Джерелами теплоти є активні елементи конструкції - обмотки і, меншою мірою, магнітопроводи ротора і статора, а стоками - зовнішня поверхня корпусу машини. Розглянемо з погляду теплового стану машини сегмент асинхронної машини, що містить у собі один паз статора та один паз ротора (рис. 2.1).

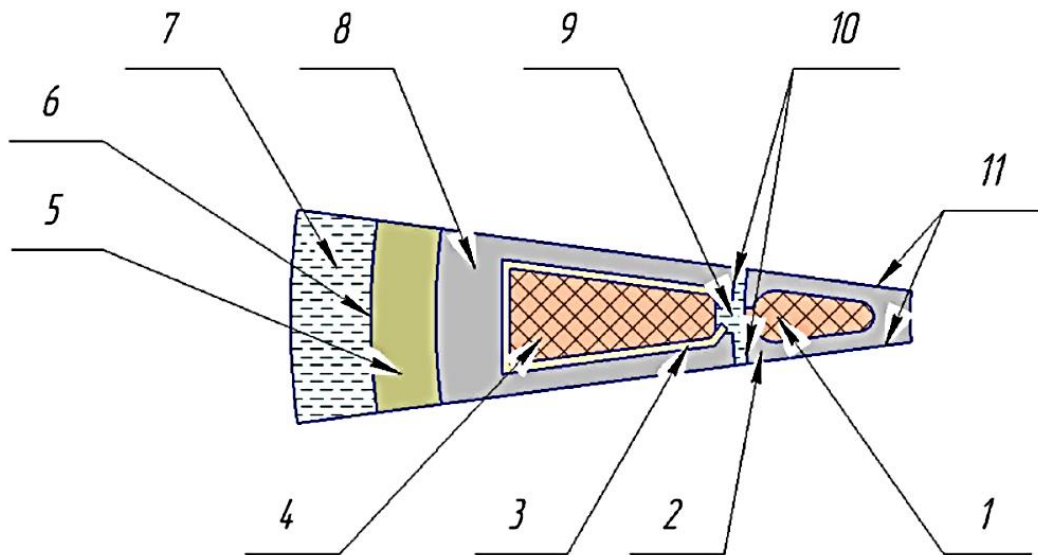


Рисунок 2.1. Сегмент асинхронного двигуна:

1 – обмотка ротора; 2 – магнітопровід ротора; 3 – пазова ізоляція статора; 4 – обмотка статора; 5 – корпус машини; 6 – зовнішня поверхня корпусу; 7 – оточуюче повітря; 8 - магнітопровід статора; 9 – повітряний зазор; 10 – поверхня; що обмежує зазор; 11 – поверхні симетрії.

По тепловому стану усі пази перебувають у ідентичних умовах. Вважатимемо, що тепловий потік в середньому перерізі машини спрямований тільки в радіальному напрямку - від паза ротора в зазор і від статора паза до корпусу і далі - в навколишнє середовище. Аксіальним тепловідведенням через вал і пази ротора нехтуємо.

Основними внутрішніми джерелами тепла електричної машини є електричні втрати в обмотках і втрати в сталі магнітопроводу статора.

Електричні втрати в m_1 -фазній обмотці статора визначаються активним опором фази обмотки R_1 та квадратом діючого значення струму I_1 [12, 13]:

$$\Delta p_\phi = m_1 I_1^2 R_1 \quad (2.11)$$

При моделюванні теплових процесів зручніше використовувати втрати, розраховані, виходячи з перерізу пазів обмотки:

$$p_{nm} = I^2 R = j^2 q^2 \rho \frac{l}{q} = j^2 q p l = \rho j^2 l_\delta S k_s, \quad (2.12)$$

де ρ – питомий опір матеріалу дроту за робочої температури, Ом·м;

j – густина струму, А/м²;

q – переріз провідника, м²;

l_δ – довжина провідника в пазу, м;

S – площа пазів, м²;

k_s – коефіцієнт заповнення паза міддю.

Для розв'язання задачі теплового поля джерела тепла задаються об'ємною густиною тепловиділення Q , Вт/м³, тому втрати, розраховані за формулою 2.12, слід поділити на об'єм V , що є джерелом тепловиділення.

$$Q = \frac{P}{V} = \frac{\rho j^2 k_s l_\delta S}{l_\delta S} = \rho j^2 k_s, \quad (2.13)$$

де $V = l_\delta S$ – об'єм паза.

Основні магнітні втрати сталі асинхронних двигунів можуть бути визначені залежностями (2.7)–(2.13).

2.5 Тепловий розрахунок електричних машин на основі чисельних методів розрахунку.

Методика теплового розрахунку електричної машини, як правило, побудована на основі розв'язків рівняння теплопровідності. Оскільки втрати енергії виділяються всередині елементів конструкції електричної машини,

поле її температури є полем із внутрішніми джерелами тепла, і описує це поле рівняння теплопровідності є неоднорідне рівняння [9-10].

В основу виведення диференціального рівняння теплопровідності покладено закон збереження енергії, який у розглянутому випадку може бути сформульований наступним чином: кількість теплоти dQ , введена в елементарний об'єм ззовні за час dt внаслідок теплопровідності, а також від внутрішніх джерел, дорівнює зміні внутрішньої енергії або ентальпії речовини, що міститься в елементарному об'ємі:

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ \quad (2.14)$$

де dQ_1 — кількість теплоти [Дж], введена в елементарний об'єм шляхом теплопровідності за час dt ;

dQ_2 — кількість теплоти, яка за час dt виділилася в елементарному об'ємі dV за рахунок внутрішніх джерел;

dQ — Зміна внутрішньої енергії, що міститься в елементарному об'ємі dV за час dt .

Кількість теплоти dQ , підведена в результаті теплопровідності до об'єму, що розглядається, буде дорівнює:

$$dQ_1 = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_z}{\partial t} \right) dx dy dz dt, \quad (2.15)$$

Поширення теплових потоків наведено на рисунку 2.2.

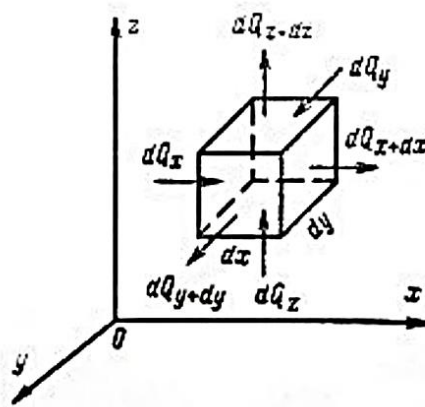


Рисунок 2.2 – Об'ємне поширення теплових потоків

Друга складова рівняння (2.14):

$$dQ_2 = q_1 d\vartheta dt, \quad (2.16)$$

Де q_1 - потужність внутрішніх джерел теплоти, [Вт/м³].

Третій доданок рівняння (2.14):

$$dQ = C_v \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta = c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} dt d\vartheta, \quad (2.17)$$

де C_v - теплоємність одиниці об'єму, Дж/(м³·К), c_v - теплоємність одиниці маси, Дж/(кг·К); ρ - густина речовини.

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \quad (2.18)$$

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = - \operatorname{div} \bar{q} + q_v. \quad (2.19)$$

Для функції $u(x,y,z,t)$ трьох просторових змінних (x,y,z) та часу t , рівняння теплопровідності має вигляд

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

Для довільної системи координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \nabla^2 u = 0, \quad (2.21)$$

де α - позитивна константа, а ∇^2 - оператор Лапласа.

Якщо врахувати швидкість поширення теплоти, (тобто. розглядати в динаміці), то у виразі для густини теплового потоку Фур'є з'являється додатковий член:

$$\bar{q} = -\lambda \operatorname{grad}(T) - T_r \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \quad (2.22)$$

Основним недоліком такого підходу для аналізу поля температури є невизначеність при виборі коефіцієнтів теплопровідності вузлів електричної машини та значень коефіцієнтів теплопередачі.

З метою уточнення цих параметрів розрахунків виконується на основі застосування законів теплопровідності, а величини коефіцієнтів теплопровідності та теплообміну визначаються експериментально на модельних установках. При цьому, природно, доводиться оперувати поняттями середніх величин коефіцієнтів теплопровідності та теплообміну, що відносяться до машини в цілому, або до великих конструктивних вузлам [11].

Основний закон теплопровідності визначає кількість тепла, що проходить через поверхню dF за час dt залежно від градієнту температур та властивостей матеріалу. Якщо $\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0$, то вираз (2.22) матиме вигляд

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad}(T) \quad (2.23)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності (теплофізична характеристика матеріалу), [Вт/(м·К)].

Градієнт температури є вектор, спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні у бік зростання температури і чисельно рівний частковій похідній від температури в цьому напрямі. За позитивний напрям градієнта приймається напрям зростання температур.

Розглянемо характер зміни температури за товщиною стінки та тепловий потік через стінку. Нескінченно велика плоска стінка товщиною δ теплопровідністю λ передає тепло за постійних температур на межі T_1 і T_2 (граничні умови).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2.24)$$

За умов, що розглядаються, теплота може поширюватися тільки вздовж осі x , і температурне поле буде одномірним:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (2.25)$$

Після інтегрування виразу (2.24) та підстановок T_1 та T_2 отримаємо рівняння температурного поля:

$$T = \frac{T_1 - T_2}{\delta} x + T_1, \quad (2.26)$$

де $\delta = x$ - товщина стінки з боку температури T_2 .

Густина теплового потоку через плоску стінку:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\delta}, \quad (2.27)$$

де $\frac{\lambda}{\delta} = R$ – термічний опір плоскої стінки.

Подальше рішення зводиться до розгляду теплової схеми заміщення, де використовуються аналогія із законом Ома для електричного кола. Термічні опори вилучаються з простих геометричних фігур, на які можна розбити весь електричний об'єм, моделі електродвигуна

Тепловий розрахунок електричної машини внаслідок складності картини теплових потоків провадиться при ряді припущень. При виборі припущень враховують, що методика розрахунку, по-перше, за точністю результатів має задовольняти практичним цілям і, по-друге, має вимагати невідповідно великої розрахункової роботи. Крім того, ступінь точності навіть найточнішого з математичної сторони розрахунку не вище тієї, яка була досягнута при визначенні коефіцієнтів, що входять до розрахункових формул.

При розгляді фізичного процесу розсіювання тепла з поверхні та впливу вентиляції на коефіцієнт тепловіддачі з'ясувалося, що замість справжніх, реальних залежностей, що визначаються з досвіду над схематизованими зразками частин машини, зазвичай беруться спрощені залежності, що мають ступінь точності приблизно 5 % щодо справжніх величин тих чи інших фізичних залежностей.

2.6 Оцінка впливу температурної залежності параметрів на властивості термодинамічної моделі електричної машини

Вплив температури на теплоємність

На рисунку 2.3 показані графіки залежності питомої теплоємності міді, алюмінію та заліза в Дж/(кг·К) від температури (точками показані експериментальні дані [10]). На цьому рисунку видно, що експериментальні точки дуже добре апроксимуються рівнянням виду

$$C_{\text{пит}} = \alpha_c \theta^2 + b_c \theta + c_c$$

де α_c , b_c та c_c – постійні коефіцієнти, значення яких наведені в таблиці 2.1.

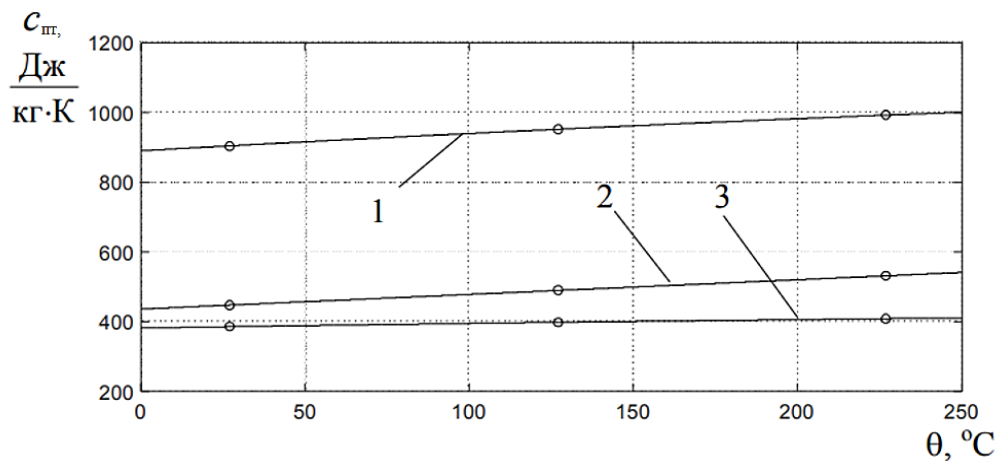


Рисунок 2.3 – Графіки залежності питомої теплоємності металів від температури: 1 - алюміній; 2 – залізо; 3 – мідь

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти залежності питомої теплоємності металів від температури

Метал	α_c , Дж/(кг×К ²)	b_c , Дж/(кг×К ²)	c_c , Дж/(кг×К ²)
Мідь	$-1,200 \cdot 10^{-4}$	0,1455	381,2
Алюміній	$-3,525 \cdot 10^{-4}$	0,5303	889,6
Залізо	0	0,4200	435,7

Теплоємності елементів конструкції електричної машини значно слабше залежить від температури, ніж опору обмоток. У таблиці 2.2 наведено відношення теплоємностей $C_{\theta_{\text{max}}} / C_{20}$, де $C_{\theta_{\text{max}}}$ – теплоємність при температурі, відповідної допустимого перевищення температури обмотки статора для

ізоляції класів, В, F і H; C_{20} – теплоємність при 20 °С. Для заліза як $C_{\theta_{\max}}$ приймалася температура, що відповідає діапазону 75...85% від допустимого перевищення температури обмотки статора.

Таблиця 2.2 – Відносні теплоємності металів за допустимого перевищення температури

Метал	В	F	H
Мідь	1,027	1,035	1,041
Алюміній	1,043	1,056	1,066
Залізо	1,057...1,064	1,075...1,084	1,089...1,101

З даних, наведених у таблиці 2.2 випливає, що приймаючи теплоємність елементів машини, що дорівнює середньому значенню за актуальним діапазоном зміни температури, забезпечуємо величину похибки, що не перевищує 5%, що можна вважати прийнятним у більшості випадків. Однак, у багатомасовій ТДМ діапазон зміни температури різних вузлів суттєво відрізняється, що створює деяку невизначеність при виборі вказаного вище середнього значення.

Вплив температури на теплові провідності

Метали.

Мідь. [10, 11] наведені дані по теплопровідності міді, згідно з якими при збільшенні температури від 300 до 400 °К теплопровідність міді зменшується лише на 2,0% (з 401 до 393 Вт/(м·К)), що дозволяє вважати її постійною у актуальному для моделювання електричних машин температурному діапазоні. Алюміній. Дані теплопровідності алюмінію, наведені в [10, 11] показують, що при збільшенні температури від 300 до 400 °К теплопровідність алюмінію зменшується лише на 1,27% (з 240 до 237 Вт/(м·К)), що також дозволяє вважати її постійною в актуальному для моделювання електричних машин температурному діапазоні.

Чавун. Теплопровідність чавуну залежить від його хімічного складу, але, за даними [11], для звичайного чавуну при зміні температури від 0 до 100 °С вона зменшується небагато, в межах 3,6...5,1%.

Сталь. Зменшення теплопровідності електротехнічної сталі зі збільшенням температури виражено значно сильніше, ніж в міді, алюмінію та чавуну. Вона може зменшуватися на 20...25% зі збільшенням температури на 40°С. Проте облік цього явища під час побудови термодинамічної моделі ускладнений низкою чинників. Так, теплопровідність сталевого пакета може суттєво відрізнятись вздовж і поперек прокату – у поперечному напрямку шихтованих пакетів вона суттєво менше, ніж уздовж листа і залежить від тиску опресування листів [10]. Також теплопровідність залежить від марки сталі [10]. Наприклад, теплопровідність сталі помітно зменшується зі збільшенням відсотка кремнію [12].

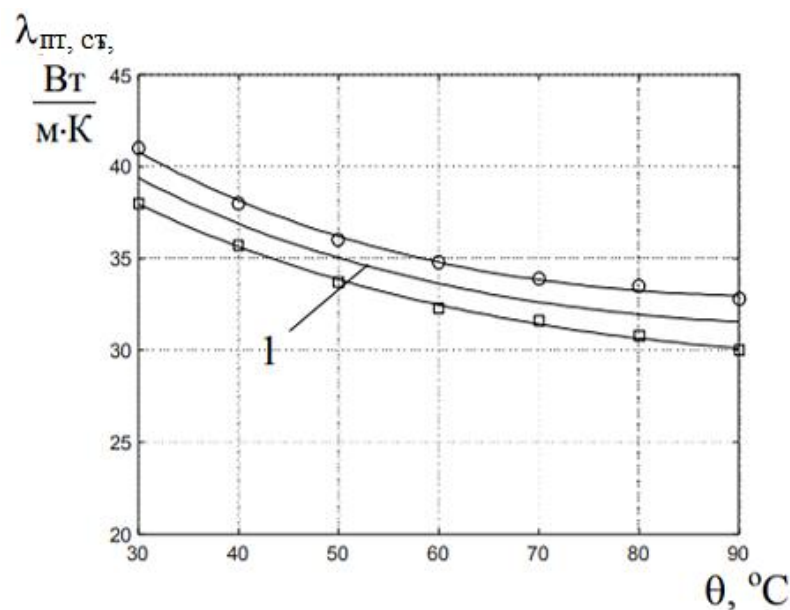


Рисунок 2.4 – Залежність теплопровідності сталі 2013 від температури (позначено: ○ – вздовж прокату; □ – поперек прокату; 1 – усереднені значення)

Залежність питомої теплопровідності сталі від температури може бути апроксимована виразом наступного виду:

$$\lambda_{n,\theta} = (\alpha_k \theta^2 + b_k \theta + c_k)^{-1}$$

де постійні коефіцієнти, наприклад, для усереднених значень питомої теплопровідності сталі 2013 мають величини: $\alpha_k = -1,321 \cdot 10^{-6}$; $b_k = 2,634 \cdot 10^{-4}$; $c_k = 1,869 \cdot 10^{-2}$.

Повітря. Теплопровідність повітря практично лінійно зростає у разі зростання температури. На рисунку 2.5 показані графіки залежності теплопровідності повітря від температури (точками показані експериментальні дані по [10]). Рисунок 2.5 показує, що експериментальні точки дуже добре апроксимуються (середнє квадратичне відхилення 0,07%) лінійною функцією:

$$\lambda_{n,нов} = 7.078 \cdot 10^{-5} \theta + 0.0237.$$

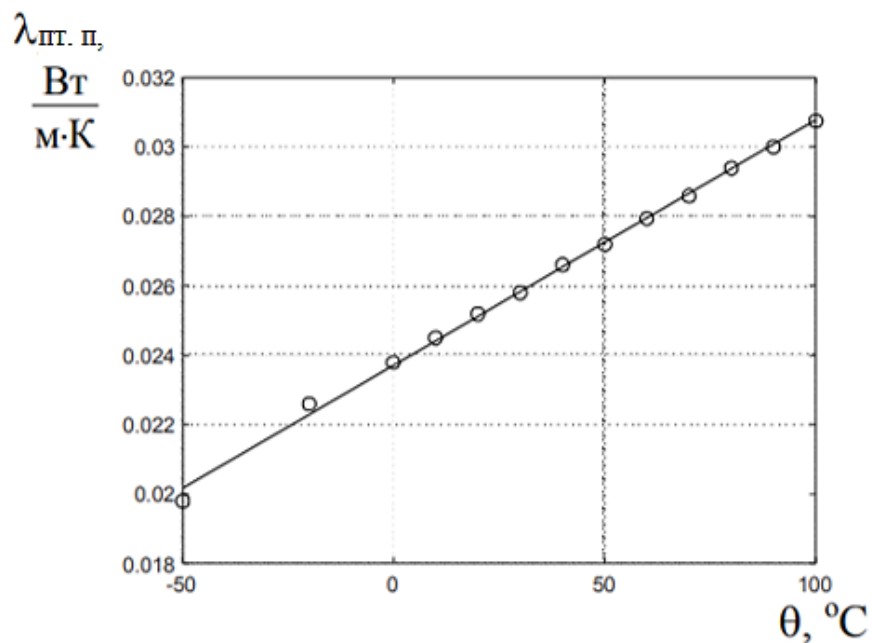


Рисунок 2.5 – Залежність теплопровідності повітря від температури

З рисунка 2.5 випливає, що теплопровідність повітря змінюється дуже суттєво в діапазоні температур, актуальному для моделювання процесів ТДМ. Теплопровідність повітря входить як співмножник у виразі для розрахунку тепловіддачі від корпусу закритого АД, тому температурна залежність цієї теплопровідності може надавати певний вплив на рівень температури елементів двигуна, що встановився. Для двигунів, що обдуваються, вплив цього фактора менш істотний, так як коефіцієнт тепловіддачі від корпусу

визначається ефективністю обдування. Для закритих електричних машин, що не обдуваються, температурна залежність коефіцієнта тепловіддачі від корпусу може відігравати більш істотну роль, тому що аналіз графіків цієї залежності, наведених в [7, 8] показує, що при підвищенні температури корпусу на 60 °С зміна коефіцієнта тепловіддачі може на межах цього температурного діапазону перевищувати 10% середньої величини. Це означає необхідність урахування ефекту від зростання тепловіддачі зі збільшенням температури при побудові моделі.

Слід зазначити, що теплові потоки від обмотки двигуна до охолоджуючого повітря можуть включати повітряні ділянки (наприклад, повітря у внутрішньому корпусі закритого двигуна). Однак на результуючі теплові провідності такими шляхами будуть впливати і теплові провідності через метал, які залежать від температури різноспрямовано з повітрям, завдяки чому буде відбуватиметься часткова компенсація температурного впливу.

Таким чином, ситуація з урахуванням залежності теплопровідностей моделі електричної машини від температури дуже складна. Теплопровідності металів та повітря змінюються різноспрямовано при зміні температури. Так, теплопровідність металевих конструкційних елементів має тенденцію до зменшення при зростанні температури, але різною мірою залежно від матеріалу та його обробки, а теплопровідність повітря, включаючи тепловіддачу з поверхні у навколишнє середовище, зростає зі збільшенням температури. Ця обставина може бути врахована при побудові досить докладної моделі для подальшого чисельного рішення, проте його неможливо «впрямую» врахувати при аналітичному дослідженні системи рівнянь цієї математичної моделі, оскільки це призводить до появи нелінійності математичного опису ТДМ. Також важко врахувати температурну зміну параметрів при побудові моделі з невеликої кількості елементів, де в один вузол об'єднані елементи, по-різному що змінюють свої властивості за зміни температури.

2.7 Вплив температурної залежності теплоємностей та теплових провідностей на результати розрахунку

а) Вплив температурної зміни теплопровідностей на температуру вузлів ТДМ, що встановилася. На рисунку 2.6 показані графіки похибки розрахунку перевищення температури вузлів термодинамічної моделі, $\delta_\tau = (\tau_{0i} - \tau_i) / \tau_i$ у функції відносної величини моменту двигуна де, τ_i – перевищення температури елементів ТДМ, з урахуванням температурної зміни теплопровідностей (температура навколишнього середовища приймалася 20 °С); τ_{0i} – перевищення температури елементів ТДМ, без урахування температурної зміни теплопровідностей (за середніми значеннями температурного діапазону), i – номер вузла термодинамічної моделі. Температурна зміна опору обмоток враховувалося в обох випадках, графіки побудовані для температури навколишнього середовища 20 °С враховувалася в обох випадках, графіки побудовані для температури навколишнього середовища 20 °С.

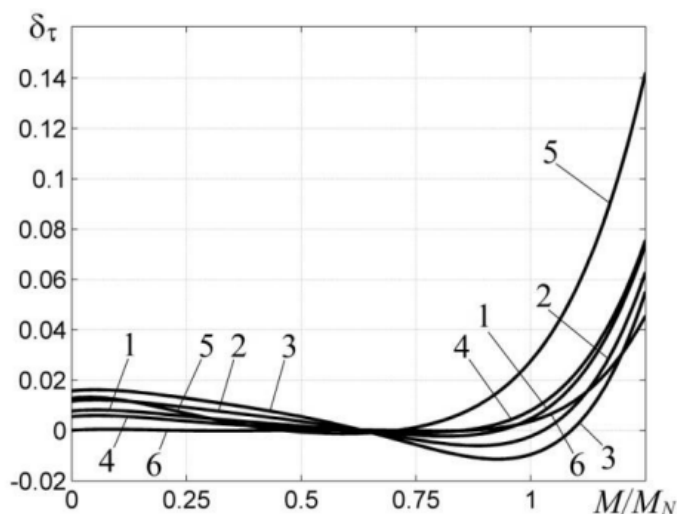


Рисунок 2.6 - Похибки розрахунку перевищення температур вузлів термодинамічної моделі, в усталеному режимі(1-лобові частини обмотки; 2-пазова частина обмотки; 3-статор; 4-внутрішнє повітря; 5-ротор; 6-станина).

На рисунку 2.6 видно, що в діапазоні температур, що не перевищують значення, що відповідають номінальному режиму роботи, похибка розрахунку не суттєва і не перевищує 3%. З цього можна зробити висновок про те, що в термодинамічній моделі, орієнтованій на режими роботи, при яких відхилення температур від середніх значень не великі, а середні значення не перевищують ті, що відповідають номінальному режиму роботи (θ_{Ni}), немає сенсу враховувати температурну зміну теплопровідності. У той же час, слід мати на увазі, що ігнорування температурної залежності теплопровідності може призводити до серйозних помилок розрахунку при температурах, що перевищують θ_{Ni} . Так, при розрахунку перевищення температури лобових частин обмотки статора двигуна 4A100L4 при навантаженні в 140% номінального моменту з урахуванням температурного Зміни теплопровідностей отримуємо 195,8°C, а без його обліку 240,7°C. Зважаючи на експоненційний характер залежності швидкості термічного старіння ізоляції обмотки від її температури [12], така розбіжність слід вважати не прийнятним завдання оцінки теплового стану двигуна.

б) Вплив температурної зміни теплоємностей та теплопровідностей на постійні часи ТДМ. Працюючи з різними навантаженнями вузли ТДМ мають різну температуру. Це впливає на теплоємності вузлів та теплові провідності. між ними, що призводить до зміни постійних часів при зміні навантаження. На рисунку 2.7 показані графіки відношення постійних часу T_{0j}/T_j шестимасової термодинамічної моделі двигуна 4A100L4 у функції відносної величини моменту двигуна, $T_{ут}$, T_{0j} – постійні часу без урахування температурної залежності теплоємностей та теплопровідностей; T_j – постійні часи з урахуванням температурної залежності цих параметрів; j – номер постійних часу у порядку зростання їх величини.

При розрахунку постійних часу було виконано апроксимацію залежності теплопровідностей від температури формулами та враховано склад різних матеріалів у ланках теплопровідностей.

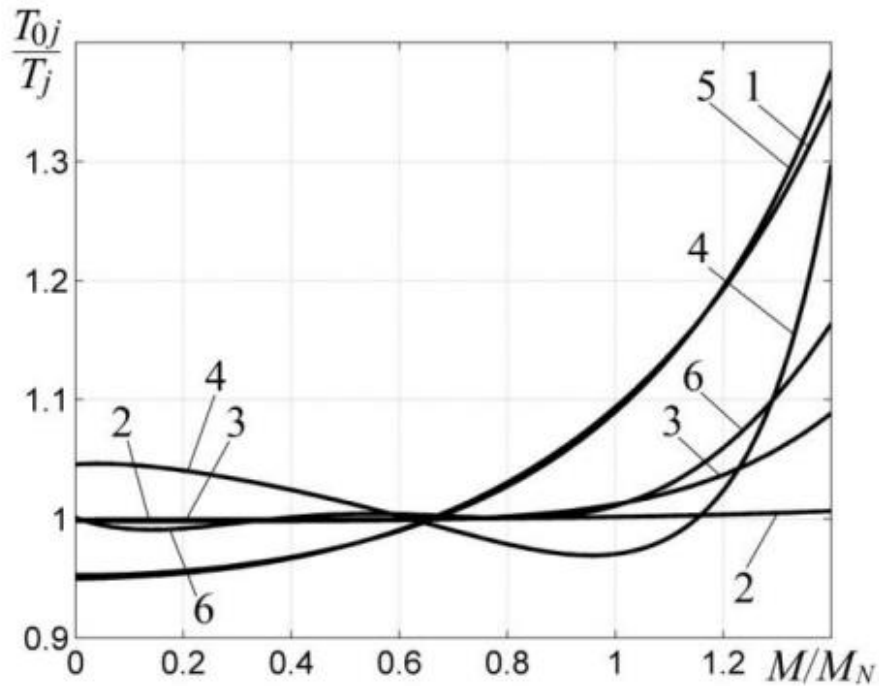


Рисунок 2.7 – Залежність відносних значень постійних часу ТДМ від навантаження на валу (цифрами позначені номери постійних часу у порядку зростання їх величини)

Аналіз графіків на рисунку 2.7 дозволяє відмітити, що в діапазоні температур, що не перевищують значення θ_{Ni} , похибка розрахунку постійних часу не велика і тільки для першої та п'ятої постійних наближається до 10%, при цьому перша постійна пов'язана з теплоємністю внутрішнього повітря, що має величину менше 1 з і не помітно впливає на динаміку температури обмоток. При розрахунках процесів, у ході яких температури вузлів моделі суттєво перевищують значення θ_{Ni} , необхідний облік впливу температури на постійні часу через температурну залежність теплоємностей та теплопровідностей, оскільки при $\theta_i > \theta_{Ni}$ різниця між T_j та T_{0j} виявляється суттєвою для трьох найбільших постійних часів. Дві з цих постійних (четверта і п'ята) мають величини, що знаходяться в межах формальної межі тривалості повторно короткочасного режиму роботи, тому компоненти рішення, що містять ці постійні, можуть змінюватися на інтервалах відповідної тривалості, впливаючи на точність результатів моделювання.

2.8 Розробка геометрії моделі електродвигуна

Для розрахунку електричних та температурних характеристик двигуна змінного струму було вибрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Його основні паспортні дані приведено нижче.[14]

- Частота: 50 Гц
- Номінальна потужність: 2,2 кВт
- Номінальна напруга: 220/380 В
- Номінальний струм: 4,56 А
- Кількість полюсів: 4
- Кімнатна температура: від -20 °С до +40 °С
- ККД при номінальному навантаженні: 87 %
- Коефіцієнт потужності, при номінальному навантаженні: 0,8
- Номінальна швидкість навантаження: 1435 об/хв
- Діапазон робочих температур: від -20 °С до +40 °С

Для розробки моделі двигуна в програмі FluxMotor, потрібно намалювати його геометрію. Основні розміри статора та ротора приведені нижче

Основні характеристики статора:

- Осьова довжина сердечника: 120 мм
- Діаметри: зовнішній (160 мм) і внутрішній (100 мм)
- Кількість зубів статора: 36
- Товщина повітряного зазору: 0,3 мм

Основні характеристики ротора:

- Осьова довжина сердечника: 120 мм
- Діаметри: зовнішній (99,4 мм), внутрішній (35 мм)
- Кількість зубів ротора: 28

Основні параметри обмотки

- Діаметр провідника: 0,75 мм
- Тип намотування: концентрична, з комбінованим кроком і одношарова

- Кроки намотування: 1:8:10 / 1:8
- Кількість витків: 36
- Підключення: зірка,
- Опір фази статора: 1,91 Ом, при 20°C

Програмне забезпечення має математично розпізнати всю конструкцію, щоб мати можливість виконати весь процес обчислення. Для цього необхідно створити сітку. Це дозволяє дискретизувати геометрію двигуна на елементи малих розмірів, за проміжними вузловими точками, наближено розрахованими обчислювальними методами. За допомогою таких визначень, як тип відхилення, релаксація та тип точки, програмне забезпечення автоматично коригує всі набори елементів відповідно до розміру та складності граней, Геометрія моделі двигуна та сітка розбиття в двовимірній постановці показано на рисунку 2.8.

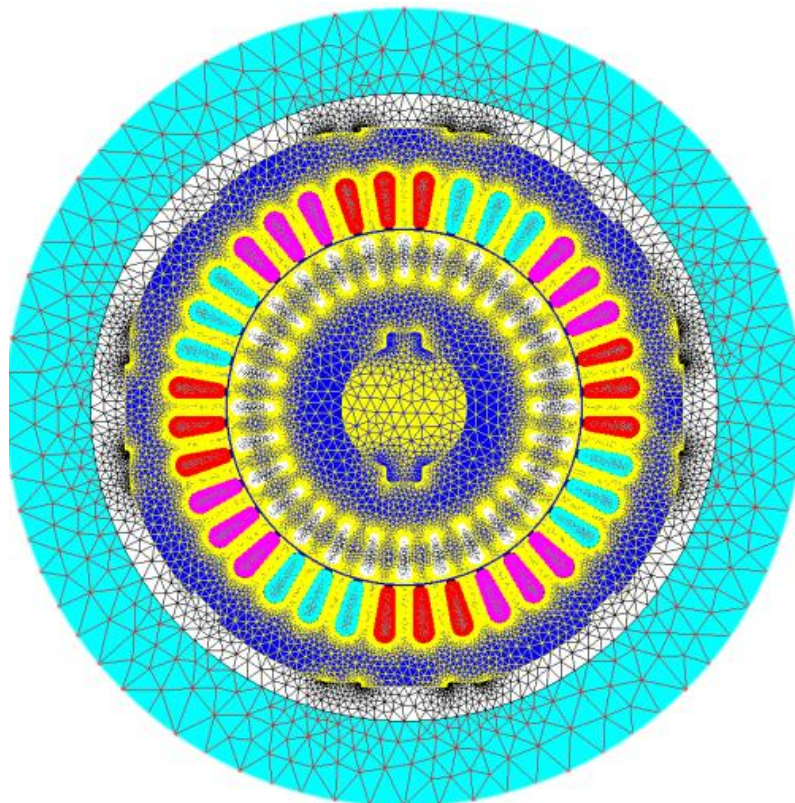


Рисунок 2.8 Сітка кінцевих елементів моделі електродвигуна

Сітка більш щільна в області повітряного зазору через необхідність більш високої точності при розрахунках.

Для електромагнітного моделювання в програмі FluxMotor, необхідно кожному елементу геометрії моделі присвоїти відповідний матеріал. Для цього необхідно ввести їх магнітні та електричні властивості, а також густину. В моделі двигуна котушки виготовлені з міді, статор з електротехнічної сталі, стрижні ротора з алюмінію. Електричні та магнітні параметри матеріалів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Електричні та магнітні параметри матеріалів моделі

Мідь	
Відносна магнітна проникність	1
Питомий опір	$1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м
Густина	8940, кг/м ³
Алюміній	
Відносна магнітна проникність	1
Питомий опір	$2,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м
Густина	2698, кг/м ³
Електротехнічна сталь	
Початкова відносна проникність	11368,21
Намагніченість насичення	1,97, Т
Питомий опір	$4,8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м
Густина	7650, кг/м ³

При моделюванні буде вважати, що рухомою частиною геометрії є ротор, та повітряний зазор. Всі інші елементи моделі є фіксованими. Ця умова дасть можливість програмі коректно змоделювати обертальний рух конструкції моделі.[13]

У роботі при побудові моделі прийнято такі припущення:

1. Поле в активній зоні двигуна плоскопаралельне, картина поля у будь-якому поперечному перерізі машини однакова.
2. Поле лобових частин обмоток не розглядається, вплив крайових ефектів не враховується.
3. Струми в обмотці двигуна змінюються в часі за гармонічним законом. Вплив часових гармонік не враховується.

2.9 Висновки до розділу

1. Показано, що в електричних двигунах теплове та електромагнітне поле є взаємопов'язаними, та безпосередньо впливають на його конструкцію. Серед існуючих методів моделювання було вибрано чисельний метод розрахунку поля що базується на методі кінцевих елементів.

2. Приведено математичні моделі для розрахунку електромагнітних та теплових полів, що дають змогу визначити втрати в двигунах та температури його елементів, як в стаціонарному та і в перехідному процесі.

3. Проведений аналіз показує важливість урахування температурної зміни опору обмоток під час побудови термодинамічних моделей електричних машин. Показано, що зміна температури обмоток буде незначною в межах циклу, але середній рівень температури вузлів моделі істотно залежатиме від факту врахування температурної зміни опорів. Температурну залежність теплопровідностей та теплоємностей міді та алюмінію в більшості випадків можна не враховувати. Ігнорування температурної залежності теплопровідностей повітря і сталі, а також теплоємності залізвмісних елементів двигуна може призводити до помітних помилок розрахунку.

4. В програмі FluxMotor розроблено геометрію моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на основі його паспортних даних. Побудовано сітку скінчених елементів, та присвоєно електричні та магнітні параметри матеріалів елементам моделі

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Попередній розрахунок параметрів електродвигуна

Оскільки інтерес представляє знаходження електричних та температурних характеристик двигуна за номінальних умов, необхідно попередньо знайти величину ковзання. Знаючи, що це чотирьополосна машина і її номінальна швидкість становить 1450 об/хв при частоті 50 Гц, рівняння (3.1) і (3.2) були використані для розрахунку номінального ковзання. Результат був приблизно 0,0433, тому це значення буде використовуватися відтепер.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (3.2)$$

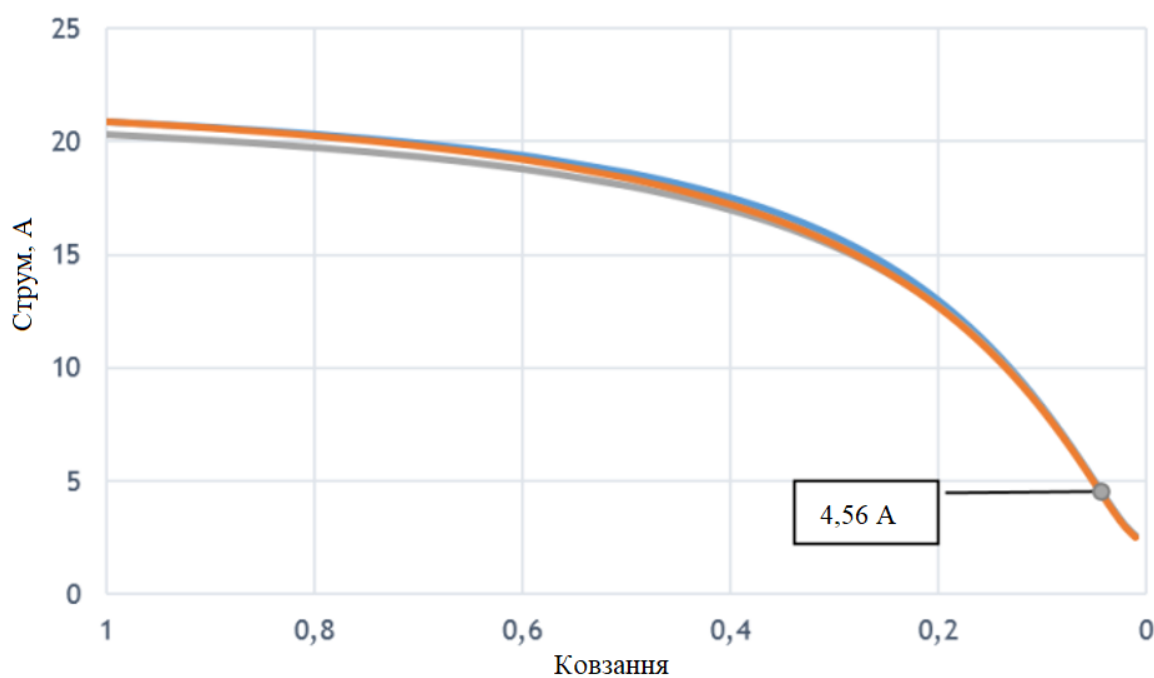


Рисунок 3.1 Залежність вхідного струму від ковзання

На рисунку 3.1 трифазні струми представлені як функція ковзання, де можна побачити, що кожна фаза починається з високого значення струму та падає, тоді як ковзання зменшується. Це високе значення струму є абсолютно

нормальним, тому що під час запуску двигуна значення струму можуть досягати приблизно восьмикратного значення номінального струму. Вони повинні бути рівними, але в стартовому періоді вони не рівні. Це відбувається через випадкове початкове відносне положення між ротором і статором. У той час як кількість зубців статора становлять 36, а кількість полюсів 4, кількість стрижнів ротора становить 28, що не ділиться на 3. Це означає, що опір ротора на фазу різний для трьох фаз. Поки двигун обертається, усі значення струму прагнуть досягти однакового значення. При досягненні номінального стану (при номінальному ковзанні) можна побачити, що значення струму дорівнює значенню на таблиці двигуна (4,56 А).

На рис. 3.2 показана крива зміни механічного моменту як функція ковзання, де вказується номінальна робоча точка.

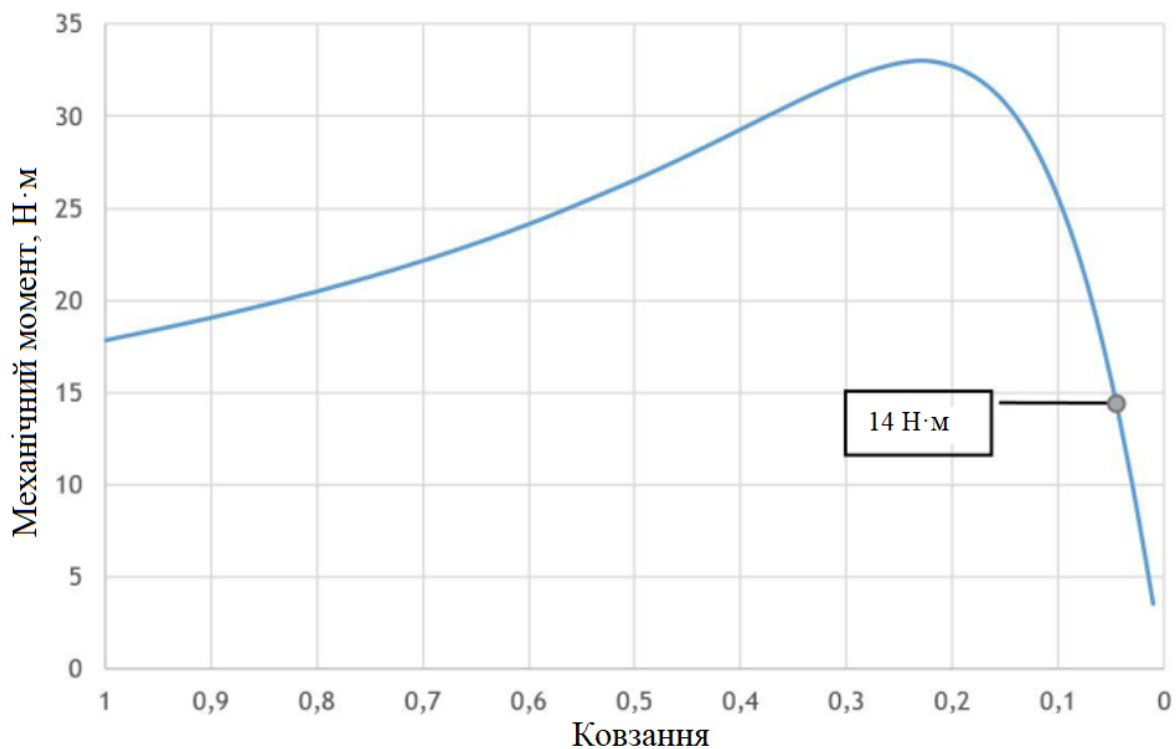


Рисунок 3.2 Залежність механічного моменту від ковзання

Щоб переконатися, що результати моделювання близькі до очікуваних, необхідно розрахувати крутний момент при номінальному стані. Для

номінальної швидкості двигуна 1435 об/хв, механічна потужність становить 2,2 кВт Розрахункове значення становило 14,64 Н·м.

Зміна механічної потужності як функція ковзання представлена на рисунку 3.3, а також номінальна точка стану.

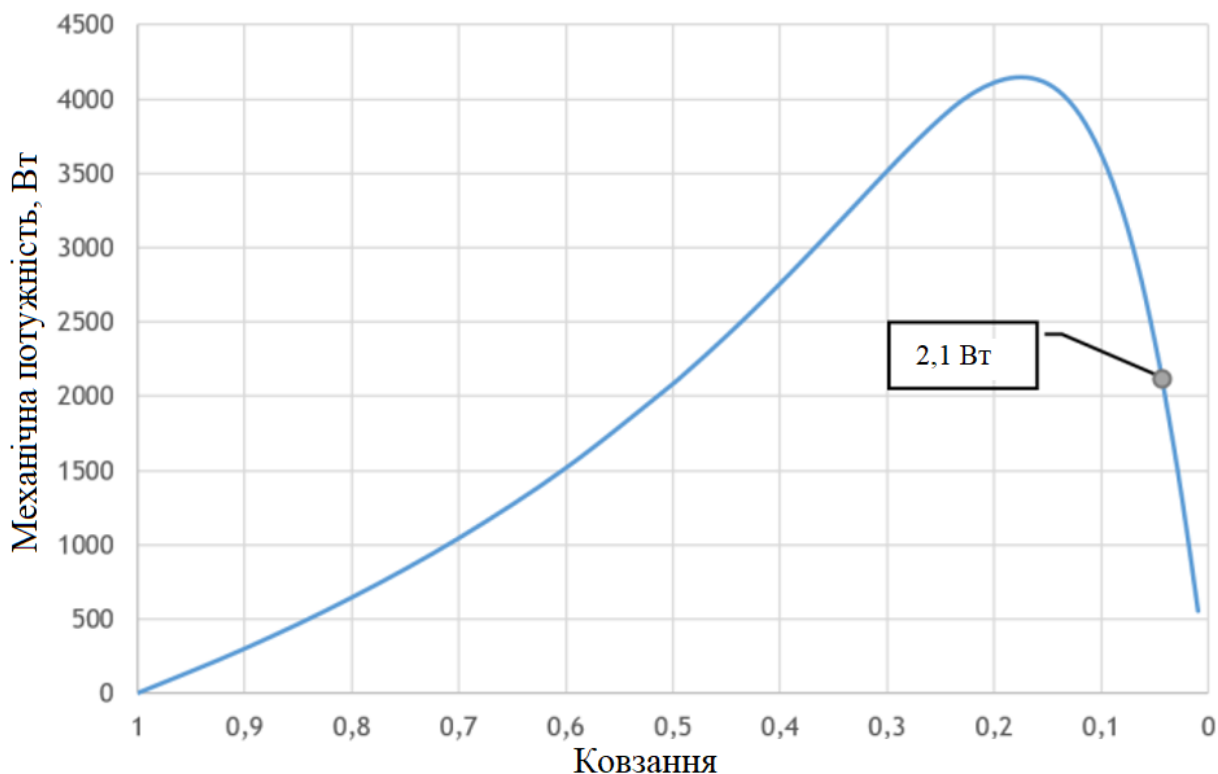


Рисунок 3.3 – Залежність механічної потужності від ковзання.

3.2 Розрахунок втрат

Для розрахунку температурного поля потрібно знати втрати, в двигуні. Після аналізу результатів, та визначення ковзання, необхідно зосередитися на номінальній точці ковзання, щоб обчислити втрати в провідниках та втрати на перемагнічування.

Втрати у котушках статора становлять 158,21 Вт, що є сумою втрат в обмотки трьох обмотках асинхронного двигуна. Втрати в роторі становлять 55,43 Вт.

Програмне забезпечення розраховує втрати статора та ротора за допомогою методу Бертотті. Для їх розрахунку використовуються залежність питомих втрат від магнітного потоку. На рисунку 3.4 показано дану характеристику для сталі ротора та статора.

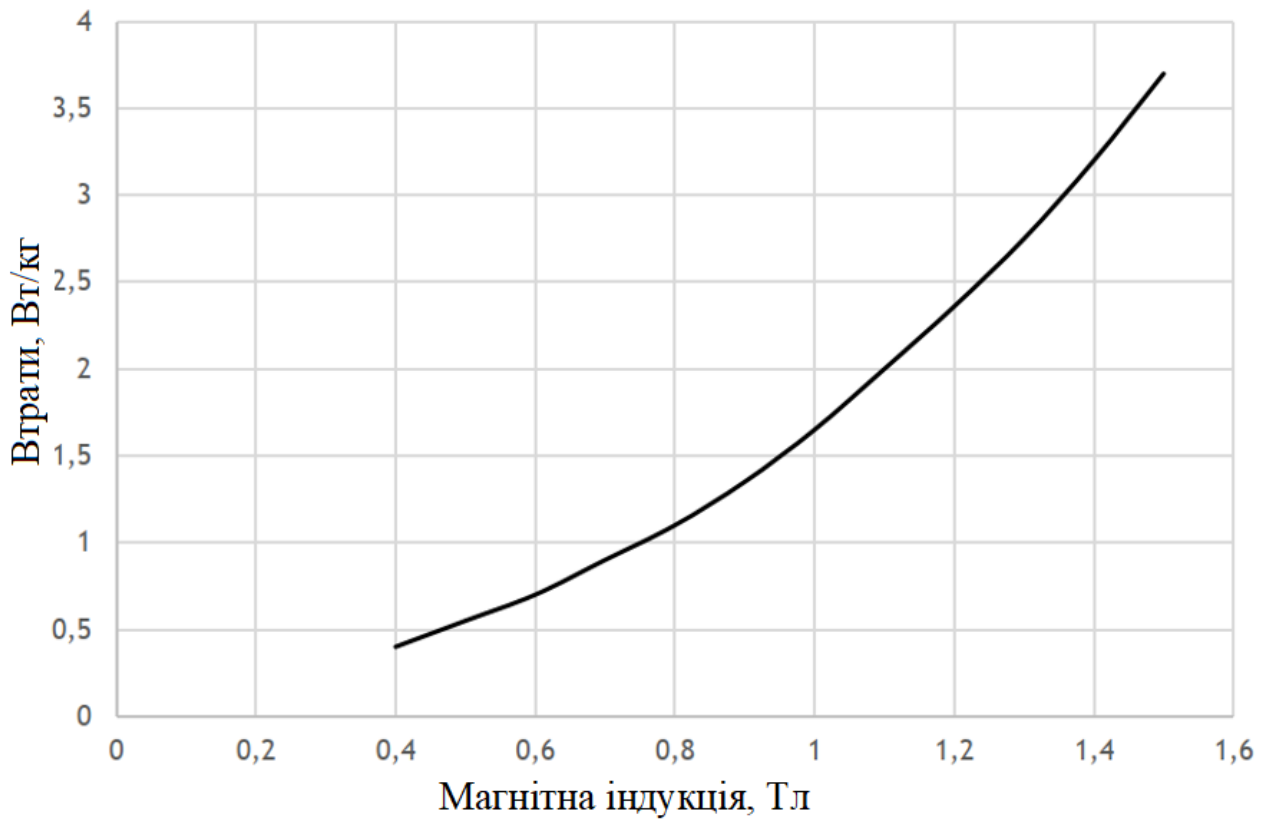


Рисунок 3.4 – Залежність втрат в сталі від магнітного потоку

Втрати магнітних матеріалах визначаються як сума двох типів втрат: втрат на гістерезис і втрат на вихрові струми. Результати розрахунку втрат в залозі приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Втрати в статорі та роторі

Тип втрат	Статор, Вт	Ротор, Вт
Гістерезис	19,184	0,008
Вихрові струми	4,63	0,000
Сумарні втрати	23,814	0,008

3.3 Температурний розрахунок електродвигуна

В даному пункті представлені теплові результати, отримані при двовимірному моделюванні. Ця термічна симуляція тривала 10000 секунд (приблизно 2 години 47 хвилин), а початкова температура була встановлена на рівні 21°C. Для того, щоб краще зрозуміти теплову поведінку протягом усього процесу, представлені деякі проміжні кроки. На рисунку 3.5 представлені температури двигуна з початкового кроку (0 секунд) до останнього кроку (10000 секунд). Можна побачити, що температури ротора і статора на початку моделювання однакові; однак це починає змінюватися десь між 1000 і 2000 секундами. Іншими словами, між цими значеннями ротор починає нагріватися більше, ніж статор.

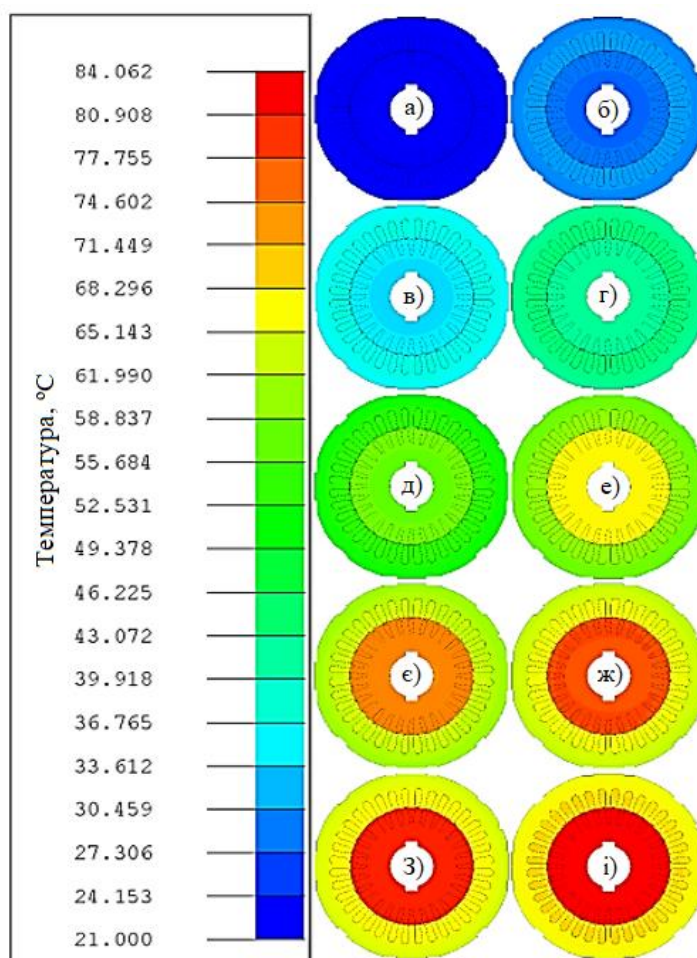


Рисунок 3.5 – Теплова поведінка двигуна в момент часу: а) 0 с; б) 300с; в) 600 с; г) 1000 с; д) 2000 с; е) 3000 с; є) 4000 с; з) 5000 с; з) 6000 с; і) 10000 с

Нижче представлені більш конкретні результати щодо теплової поведінки двигуна для деяких етапів моделювання.

На рисунку 3.6 видно, що через 600 секунд (10 хвилин) двигун все ще знаходиться в процесі початкового нагрівання, хоча температура вже почала зростати. Тепер видно, що температури ротора і статора досить різні. Найнижчі температури знаходяться всередині ротора, поблизу вала, а найвищі температури знаходяться в котушках статора, маючи різницю близько $3,5^{\circ}\text{C}$. У зовнішній частині статора спостерігаються найнижчі температури статора через конвекцію повітря.

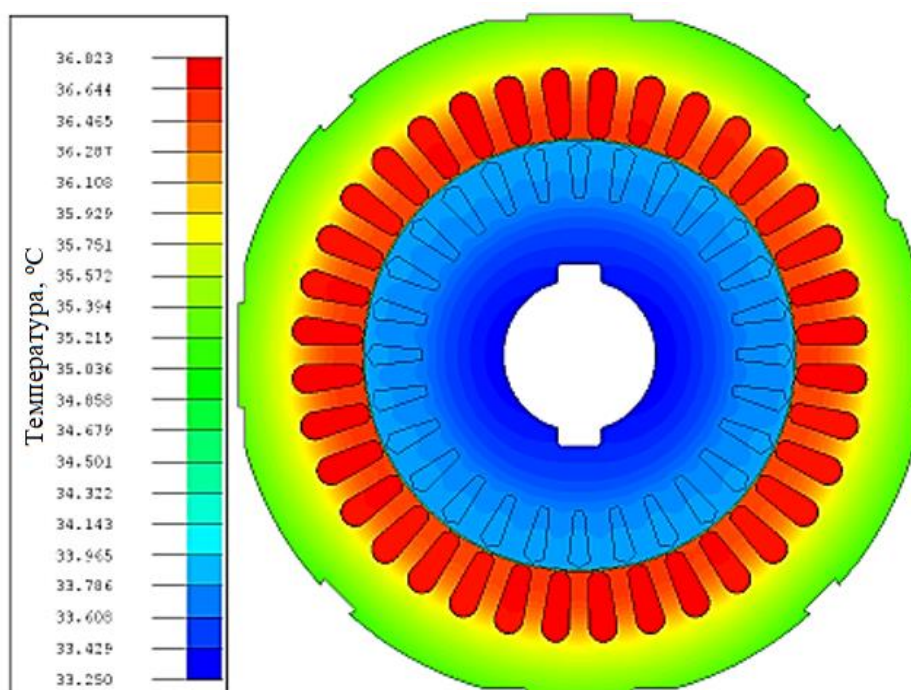


Рисунок 3.6 – Теплова поведінка двигуна після 600 с.

На рисунку 3.7 показано, що на момент часу 1200 секунд (20 хвилин) двигун уже подвоїв початковий розподіл температури. Хоча котушки статора мають найвищі температури, різниця між ними та стержнями ротора зменшується. У цей момент ці температури вже відрізняються приблизно на $0,5^{\circ}\text{C}$. Також можна побачити, що різниця температур між найнижчою та найвищою точками статора збільшилася.

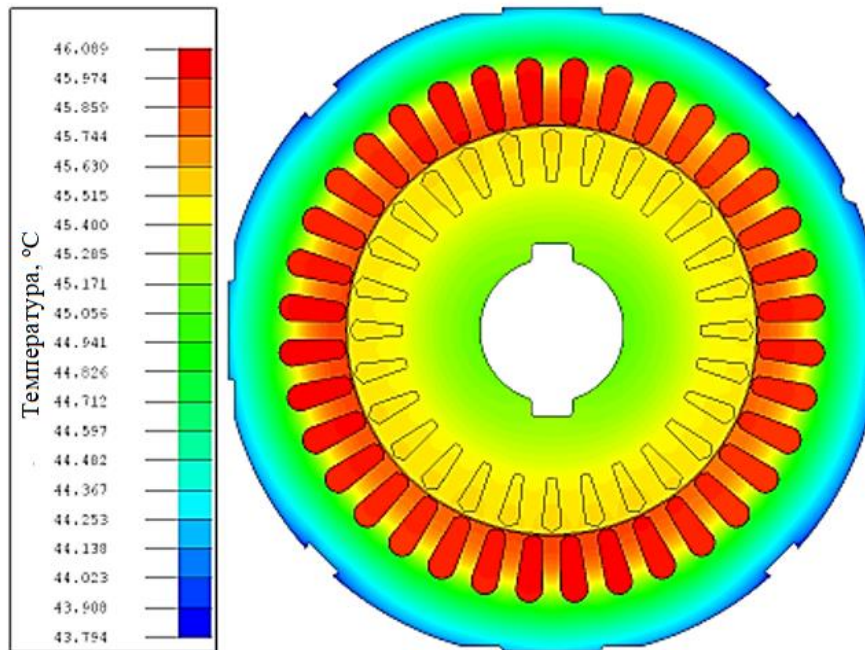


Рисунок 3.7 – Теплова поведінка двигуна після 1200 с.

Через 2000 секунд (33 хвилини та 20 секунд), на рисунку 3.8 видно, що через вплив стрижнів ротора температура ротора вже перевищила температуру котушок статора.

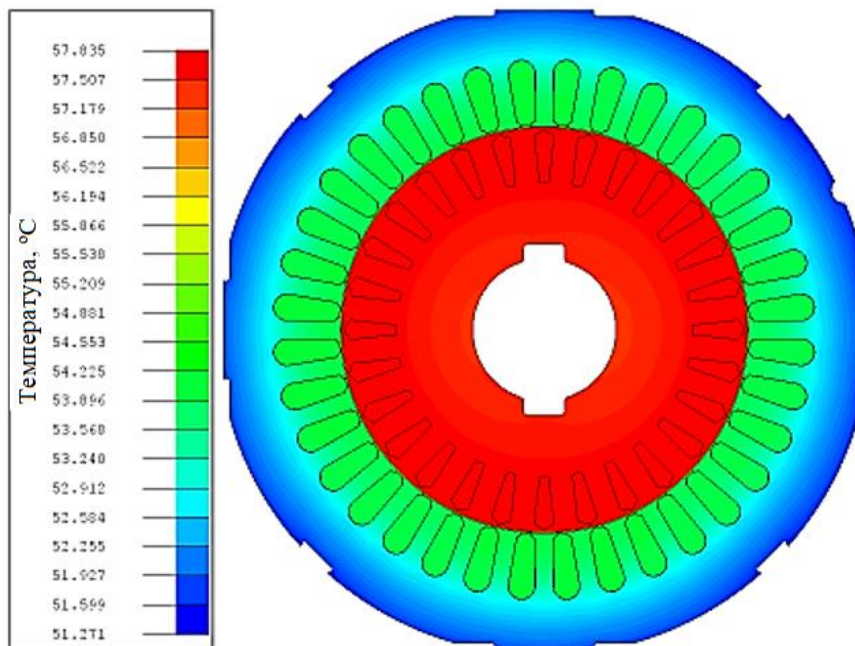


Рисунок 3.8 – Теплова поведінка двигуна після 2000 с.

Через 6000 секунд (1 годину 40 хвилин) на рисунку 3.9 видно, що різниця між температурами ротора та статора продовжує зростати, перебуваючи в цей момент приблизно на 12°C. На цьому етапі температура двигуна майже стабілізувалася.

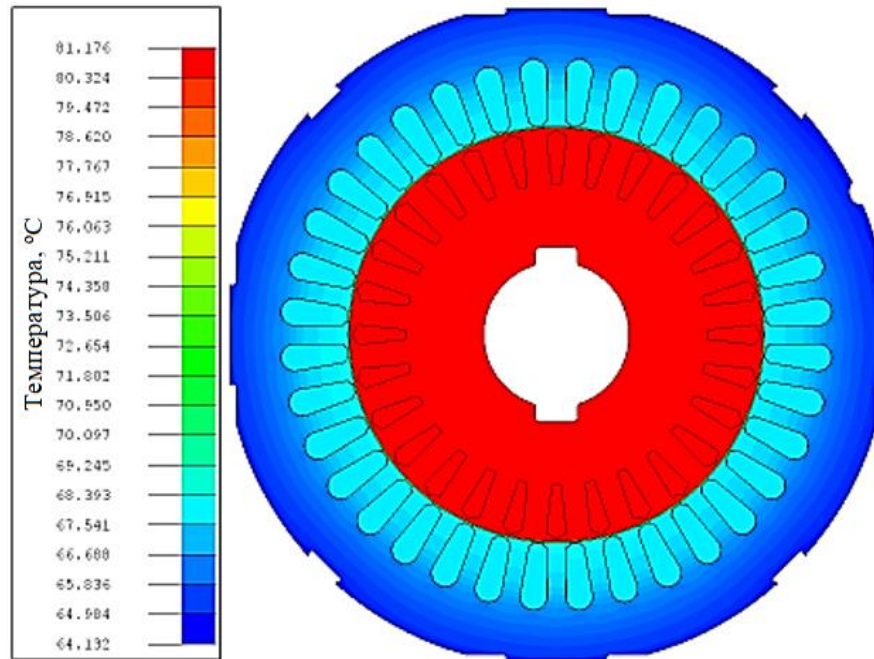


Рисунок 3.9 – Теплова поведінка двигуна після 6000 с.

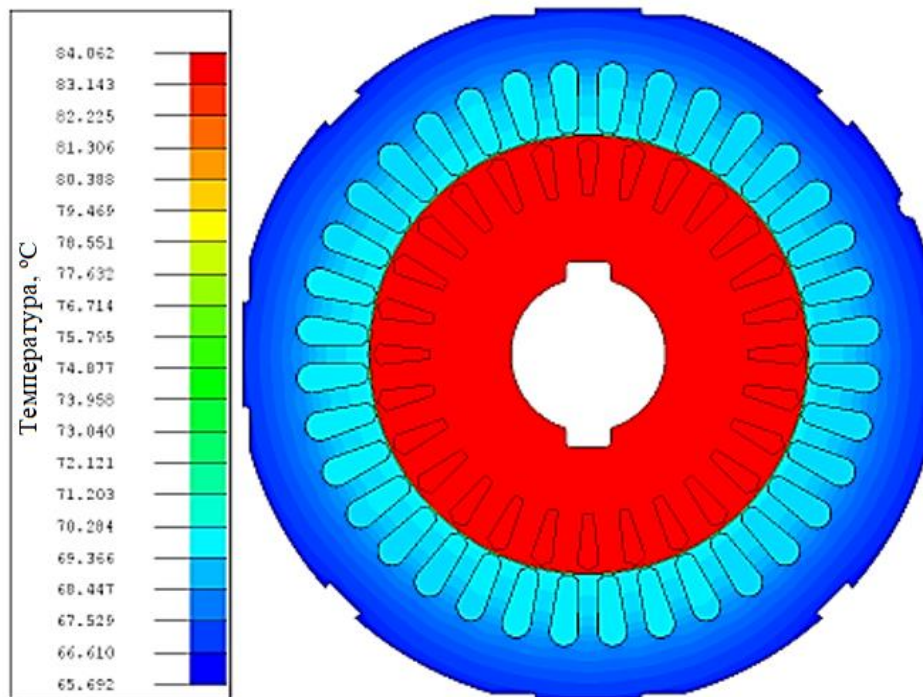


Рисунок 3.10 – Теплова поведінка двигуна після 10000 с.

На рисунку 3.9 видно, що теплова поведінка двигуна не сильно змінилася з попереднього кроку (6000 секунд).

На рисунку 3.10 показано температурне поле після 10000 секунд моделювання (2 години, 46 хвилин і 40 секунд) температура двигуна вже стабілізувалася, Після досягнення стабільної робочої точки можна стверджувати, що різниця температур між ротором і статором становить близько 13 °С, а різниця між найхолоднішою і найгарячішою точками статора становить близько 5,5 °С.

3.4 Моделювання роботи двигуна в навантаженому режимі

Важливим етапом є моделювання поведінки асинхронного двигуна з приєднанням навантаження. В даному моделюванні робота двигуна розпочнеться з нульової швидкості. Початкове значення інерції буде рівним 0,00897 кг·м². Значення моменту сили змінюватиметься під час моделювання. Спочатку двигун запуститься в режимі холостого ходу ($T = 0$ Н·м), а потім збільшиться до номінального робочого навантаження ($T = 14$ Н·м). Дана часова залежність показана на рисунку 3.11.

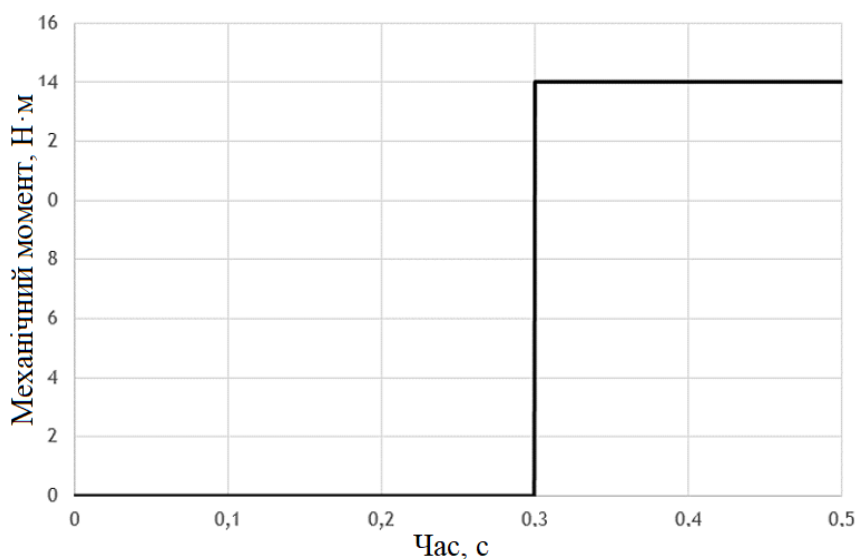


Рисунок 3.11 – Часова залежність механічного моменту двигуна.

Пускові струми можуть досягати значень приблизно у 8 разів вищих за їх номінальне значення, тому початкові значення є очікуваними (рисунок 3.12).

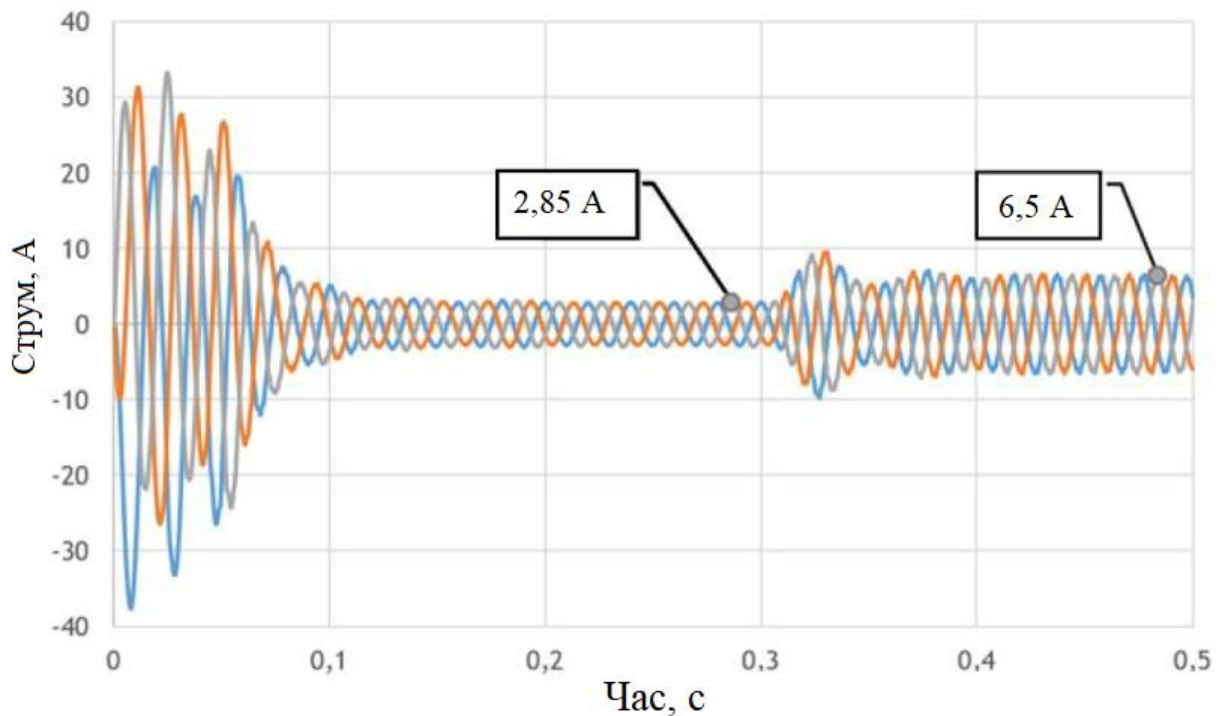


Рисунок 3.12 -- Робочий струм двигуна

Після цього значення струму зменшуються, оскільки двигун працює в режимі холостого ходу ($T = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$). У цьому стані значення струму становлять близько 2,85 А, але це пікове значення. Ефективне значення можна розрахувати, поділивши його на $\sqrt{2}$. Отже, середньоквадратичне значення струму без навантаження становить близько 2,02 А.

У момент часу 0,3 секунди механічний момент зростає, а також зростає сила струму, досягаючи номінального струму. Значення номінального струму, отриманого при моделюванні становить $6,5\sqrt{2} \approx 4,6 \text{ А}$.

Як видно на рисунок 3.13, двигун запускається з нульової швидкості, а потім швидкість починає збільшуватися, поки не стабілізується в режимі холостого ходу, зі швидкістю приблизно 1499 об/хв.

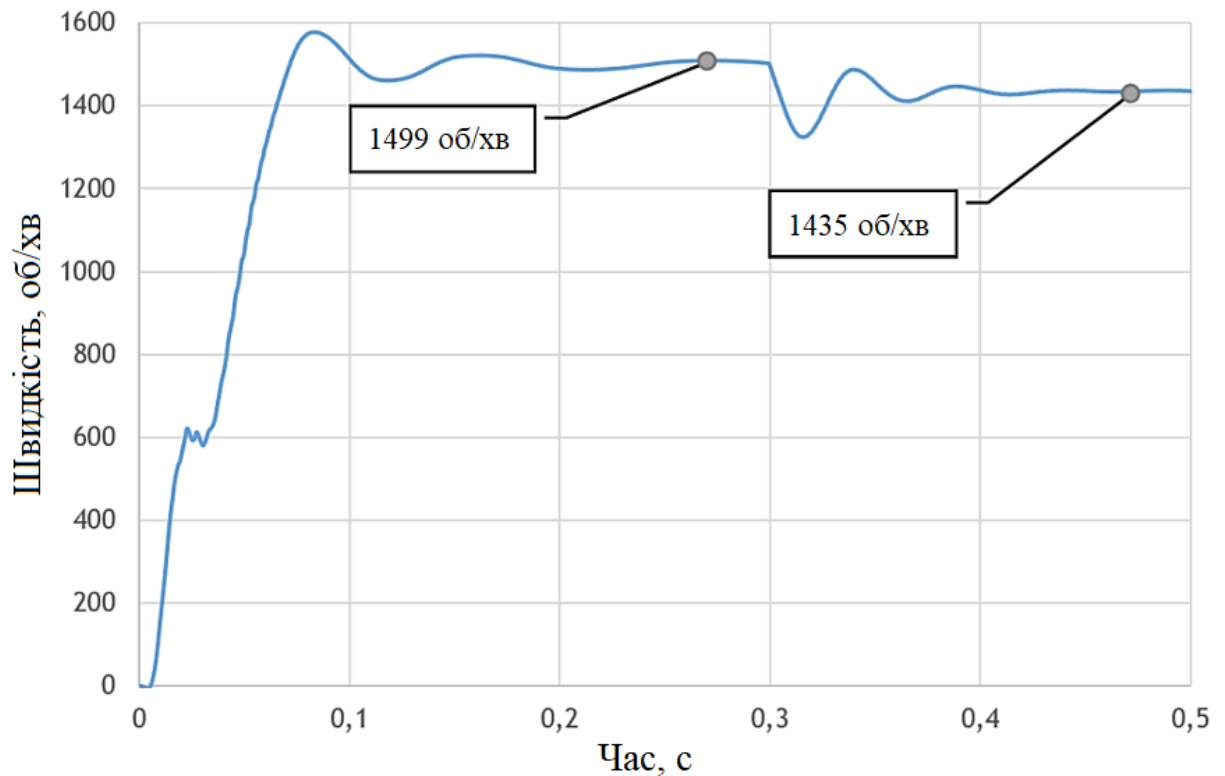


Рисунок 3.13 Графік залежності швидкості двигуна

Починаючи з 0,3 секунди, двигун працює в умовах номінального навантаження. Це означає, що механічний момент збільшився, тому швидкість падає і стабілізується на 1435 об/хв. Це значення дорівнює паспортному значенню двигуна.

В попередньому пункті було визначено оптимальну величину ковзання, що близька до 1, тому початковий механічний момент досягає дуже високих значень. Після цього на рисунок 3.14 можна побачити, що це значення падає до дуже низького значення, близького до 0 Н·м. У цей момент двигун працює без навантаження. Через 0,3 секунди двигун починає працювати в умовах номінального навантаження, і можна побачити очікуване значення механічного моменту, який становить 14 Н·м.

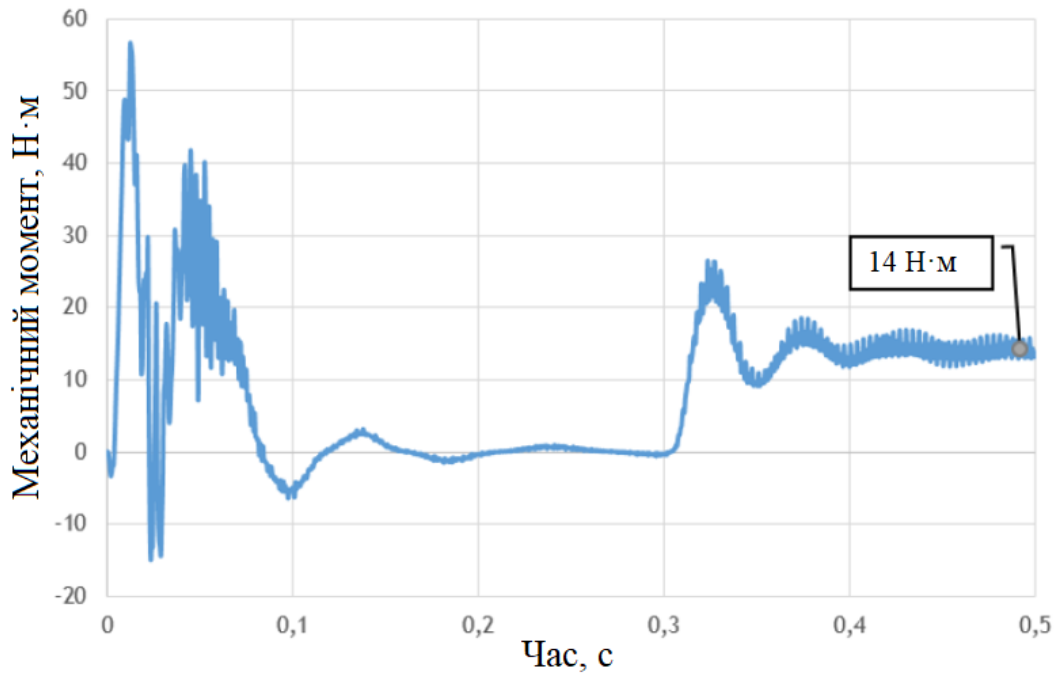


Рисунок 3.14 Механічний момент двигуна

Графік механічної потужності близький до механічного моменту. На рисунку 3.15 видно, що механічна потужність має високі значення на початку, а потім стає нульовою в стані холостого ходу.

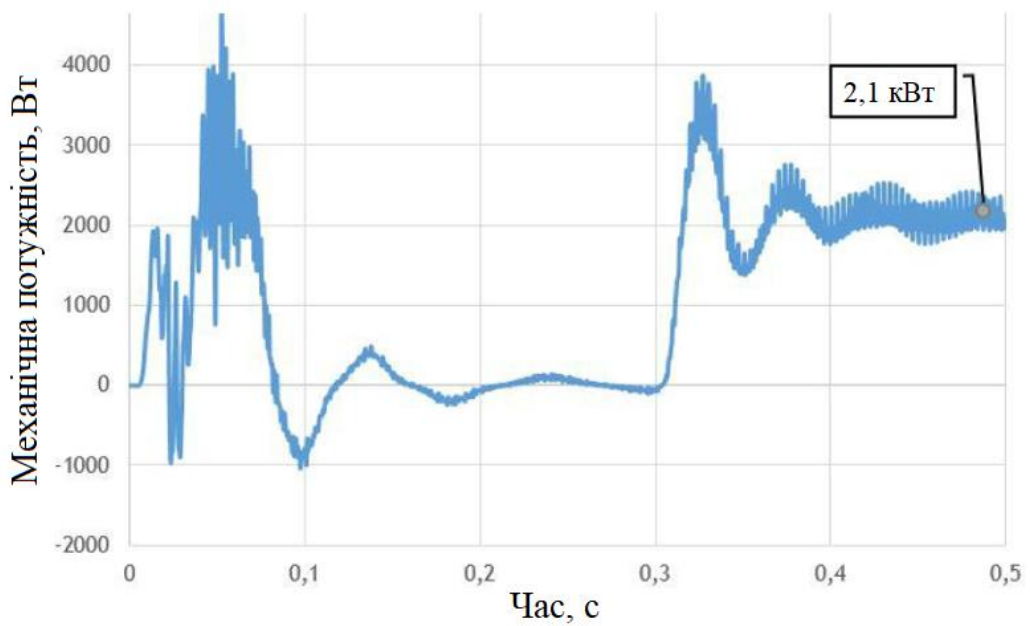


Рисунок 3.15 Механічна потужність

Однак він ще не стабілізувався, тому деякі пульсації все ще можна побачити, коли двигун працює в режимі холостого ходу, хоча його значення при стабілізації буде приблизно 90 Вт.

Після 0,3 секунди двигун починає працювати в умовах номінального навантаження, і як і очікувалося, механічна потужність у цей момент становить приблизно 2,1 кВт.

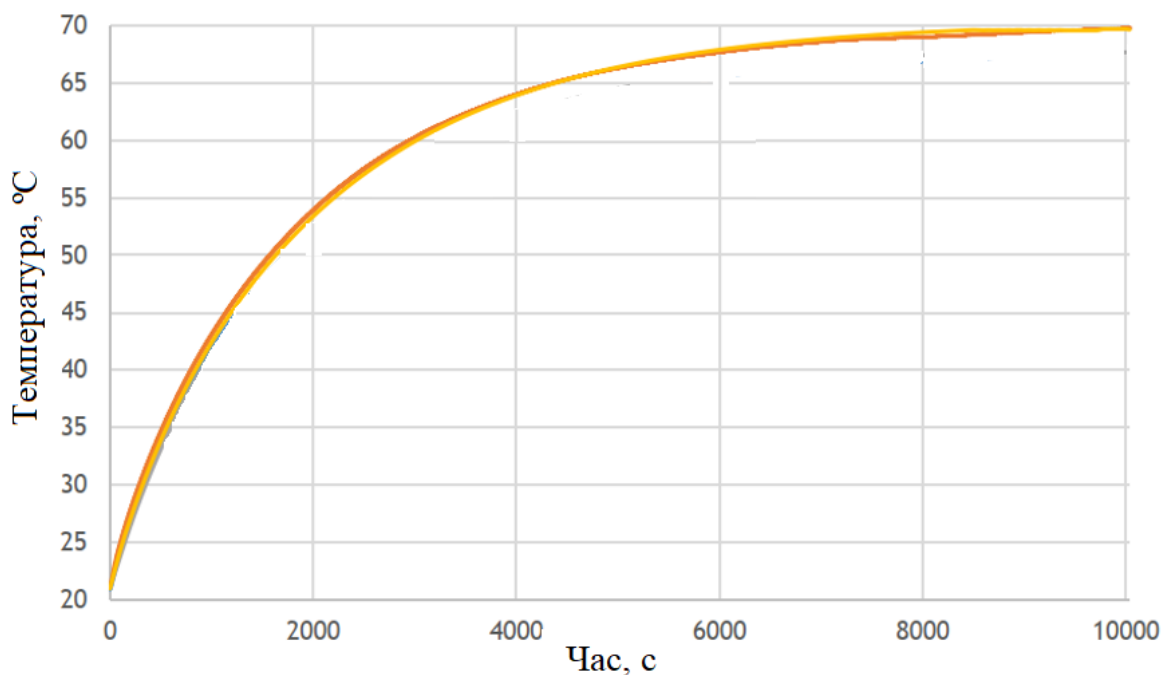


Рисунок 3.16 Температура ротора двигуна

На рисунку 3.16 показана крива температури ротора двигуна отримана при моделюванні протягом 10000 секунд. Можна побачити, що температура активно зростає впродовж перших 1,5 години. Та досягає значення 67 °C. Надалі температура залишається практично незмінною, та не перевищує 75 °C.

3.5 Висновки до розділу

1. В результаті моделювання та розрахунків було встановлено, що при номінальному значенні ковзання $s = 0,04$, струм в обмотках становить 4,56 А а механічна потужність 14 Н·м.

2. Показано, що загальні втрати в двигуні становлять 158,21 Вт, з них втрати на гістерезис і втрат на вихрові струми становлять 23,8 Вт.

3. Температурний розрахунок показав, що в навантаженому режимі максимальна температура ротора не перевищує 80 °С. Дана температура не призведе до зміни електромагнітних характеристик елементів електродвигуна, при його експлуатації при температурі оточуючого середовища не вище 40 °С.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи безпеки під час експлуатації електродвигунів

Особливості організації охорони праці на підприємстві відіграють важливу роль. Простої та зниження ефективності праці, викликані аваріями, нещасними випадками на виробництві, професійними захворюваннями, не тільки уповільнюють виробничі процеси, а й стають причиною високих додаткових витрат для підприємства. Крім того, ці явища значною мірою негативно впливають на безпеку виробництва, якість продукції та ставлення до роботи працюючих.

Установки власних потреб є важливим елементом електростанцій і підстанцій. Пошкодження в системі власних потреб неодноразово приводили до порушення роботи електростанцій і до аварійного стану енергосистем. Основним механізмом власних потреб є асинхронні електродвигуни різного виконання. Двигун перетворює електричну енергію(якою живиться із мережі, або генератора)в механічну.

Зараз промисловість випускає електродвигуни 380 В потужністю до 400 кВт, а електродвигуни 3 - 6 кВ, починаючи з потужності 160 - 200 кВт. На КЕС, ТЕЦ, а також АЕС висока напруга системи власних потреб, як правило, приймається рівною 6 кВ. На КЕС з агрегатами потужністю 800 - 1200 МВт і відповідно з великими механізмами власних потреб доцільно застосування напруги 10 кВ. На ГЕС електродвигуни основних механізмів живляться від мережі 380/220 В, а електродвигуни великих механізмів - від мережі 6 (10) кВ.

Під час експлуатації асинхронних двигунів власних потреб 0,4 кВ небезпечним чинником є можливість ураження працівників електричним струмом при дотику до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою. Також небезпечним фактором є електрична дуга, що виникає при коротких замиканнях і наявність у двигунів обертових частин.

Профілактичні заходи захисту від шкідливих та небезпечних факторів:

- Для захисту від електричної дуги застосовуються засоби максимального струмового захисту.

- Для захисту обертових частин електродвигуна застосовуються кожухи під якими і знаходяться обертові частини, зняття кожухів під час роботи двигуна забороняється через можливість захоплення обертовими частинами одягу.

- Використання кондиціювання та вентиляції повітря, використання індивідуальних засобів захисту а також забезпечення працівників спеціальним одягом і застосування незалежних джерел живлення для аварійного освітлення.

- Захисні заходи від шкідливих та небезпечних факторів:

- Зниження (ослаблення) шуму в самих його джерелах (конструкція обладнання).

- Чітке дотримання правил технічної експлуатації.

- Встановлення звукоізоляційних огорожувальних конструкцій і звукопоглинальних екранів.

- Для ослаблення вібрації кожухів, огорож та інших деталей застосовується вібропоглинання шляхом нанесення на віброуючу поверхню шару гуми, пластиків, які розсіюють енергію вібрацій.

- Для захисту людини від впливу підвищеної температури потрібно передбачити кондиціювання, вентиляцію повітря; встановлення поглинаючих екранів; забезпечити працівників спецодягом.

- Живлення світильників аварійного освітлення здійснюється від незалежних джерел живлення. Потрібно передбачити наявність у кожного працівника ліхтарика.

При експлуатації двигунів власних потреб напругою 0,4 кВ пожежну безпеку обумовлює наявність горючих ізоляційних матеріалів, а також наявність масла в системі змащення підшипників кочення електродвигунів.

Причини пожеж при експлуатації двигуна поділяють на:

- електричного характеру: іскріння в електричних апаратах; струми короткого замикання і струмові перевантаження; погані контакти в місцях з'єднання; електрична дуга;
- неелектричного характеру: недотримання персоналом вимог безпеки; несправність обладнання (перегрів).
- При загорянні електродвигуна його необхідно відключити, розібрати схему, включити заземлювальний ніж і приступити до гасіння пожежі за допомогою вуглекислого або порошкового вогнегасників. Місця проведення вогневих робіт необхідно забезпечити вогнегасником і асбесполотном. Також для запобігання пожежі застосовуються пожежні крани і пожежні гідранти.

Отже під час технологічного процесу дуже важливим є дотримання вимог безпеки. Порушення цих вимог може призвести до виходу з ладу асинхронного двигуна, що бере участь у технологічному процесі, важких аварій, великих матеріальних втрат на відновлення, поранення або навіть смерті обслуговуючого персоналу.

4.2 Організація цивільного захисту на об'єкті господарської діяльності

Об'єкт господарської діяльності (підприємство, установа, організація) – основна ланка в системі ЦЗ держави. На об'єкті, де зосереджено людські і матеріальні ресурси, здійснюють економічні і захисні заходи.

Відповідно до законодавства, керівництво підприємств, установ і організацій незалежно від форм власності і підпорядкування забезпечує своїх працівників засобами індивідуального та колективного захисту, місцем у захисних спорудах, організовує евакозаходи, створює сили для ліквідації наслідків НС та забезпечує їх готовність, виконує інші заходи з ЦЗ і несе пов'язані з цим матеріальні та фінансові витрати. Власники потенційно небезпечних об'єктів відповідають також за оповіщення і захист населення,

що проживає в зонах можливого ураження від наслідків аварій на цих об'єктах.

Начальником ЦЗ об'єкта є керівник об'єкта. він відповідає за організацію і стан ЦЗ об'єкта, керує діями органів і сил цз під час проведення рятувальних робіт на ньому. Заступники начальника ЦЗ об'єкта допомагають йому з питань евакуації, матеріально-технічного постачання, інженерно-технічного забезпечення тощо (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Структура ЦЗ об'єкта господарської діяльності

Органом повсякденного управління ЦЗ є відділ (сектор) з питань НС та ЦЗ, який організовує і забезпечує повсякденне керівництво виконанням завдань ЦЗ на об'єкті.

Для підготовки та втілення в життя заходів з окремих напрямів створюють служби зв'язку та оповіщення, сховищ і укриттів, протипожежної охорони, охорони громадського порядку, медичної

допомоги, протирадіаційного і протихімічного захисту, аварійно-технічного та матеріально-технічного забезпечення тощо. Начальниками служб призначають начальників установ, відділів, лабораторій, на базі яких вони утворюються.

Службу зв'язку та оповіщення створюють на базі вузла зв'язку об'єкта. Головне завдання служби – забезпечити своєчасне оповіщення керівного складу та службовців про загрозу аварії, катастрофи, стихійного лиха, нападу противника; організувати зв'язок і підтримувати його в стані постійної готовності.

Протипожежну службу створюють на базі підрозділів відомчої пожежної охорони. Служба розробляє протипожежні профілактичні заходи і контролює їх виконання; організовує локалізацію і гасіння пожежі.

Медичну службу формують на базі медичного пункту, поліклініки об'єкта. На неї покладають організацію проведення санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів, надання медичної допомоги потерпілим та евакуацію їх у лікувальні установи, медичне обслуговування робітників, службовців і членів їхніх сімей у місцях розосередження.

Службу охорони громадського порядку створюють на базі підрозділів відомчої охорони. Її завдання – організувати і забезпечити надійну охорону об'єкта, громадського порядку в умовах НС, під час ліквідації наслідків аварії, стихійного лиха, а також у воєнний час.

Службу протирадіаційного і протихімічного захисту організовують на базі хімічної лабораторії чи цеху. На неї покладають розробку та здійснення заходів щодо захисту робітників і службовців, джерел водозабезпечення, радіаційного і хімічного спостереження, проведення заходів з ліквідації радіаційного і хімічного зараження та здійснення дозиметричного контролю.

Службу сховищ та укриттів організовують на базі відділу капітального будівництва, житлово-комунального відділу. Вона розробляє план захисту робітників, службовців та їх сімей з використанням сховищ та укриттів, забезпечує їх готовність та правильну експлуатацію.

Аварійно-технічну службу створюють на базі виробничо-технічного відділу або відділу головного механіка. Служба розробляє та здійснює попереджувальні заходи, що підвищують стійкість основних споруд, інженерних мереж та комунікацій у нс, організовує проведення робіт з ліквідації і локалізації аварії на комунально-енергетичних мережах.

Службу матеріально-технічного забезпечення створюють на базі відділу матеріально-технічного постачання об'єкта. Вона організовує своєчасне забезпечення формувань усіма засобами оснащення, постачання продуктів харчування і предметів першої необхідності робітників та службовців на об'єкті та у місцях розосередження, ремонт техніки і майна.

Транспортну службу організовують на базі транспортного відділу, гаражу об'єкта. вона розробляє і здійснює заходи із забезпечення перевезень, пов'язаних із розосередженням працівників та доправлення їх до місця роботи, проведення рятувальних робіт.

Кожна служба створює, забезпечує, готує формування служби (команди, групи, ланки) і керує ними під час виконання робіт. Формування загального призначення – рятувальні загони (команди, групи, ланки), зведені рятувальні загони (команди), підпорядковані безпосередньо начальнику цз об'єкта. кожне з них має свою структуру і можливості. Наприклад, зведена рятувальна команда (ЗРК) у своєму складі має підрозділи різного призначення, такі як ланка зв'язку і розвідки, дві рятувальні групи, група механізації, санітарна дружина тощо. ЗРК може самостійно виконувати основні рятувальні та інші невідкладні роботи (РНР) в осередку ураження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі проведений аналітичний огляд та аналіз науково-технічної інформації стосовно електричних двигунів змінного струму. Проаналізовано їх конструкцію та шляхи підвищення ефективності.

2. Показано, що в електричних двигунах теплове та електромагнітне поле є взаємопов'язаними, та безпосередньо впливають на його конструкцію. Приведено математичні моделі для розрахунку електромагнітних та теплових полів, що дають змогу визначити втрати в двигунах та температури його елементів, як в стаціонарному та і в перехідному процесі.

3. Проведений аналіз показує важливість врахування температурної зміни опору обмоток під час побудови термодинамічних моделей електричних машин. Показано, що температурну залежність теплопровідностей та теплоємностей міді та алюмінію в більшості випадків можна не враховувати. Ігнорування температурної залежності теплопровідностей повітря і сталі, а також теплоємності залізозмісних елементів двигуна може призводити до помітних помилок розрахунку.

4. На основі розробленої моделі було розраховано, що при номінальному значенні ковзання $s = 0,04$, струм в обмотках становить 4,56 А, а механічна потужність 14 Н·м. Розрахунок втрат показав, що вони становлять 158,21 Вт, з них втрати на гістерезис і втрат на вихрові струми складають 23,8 Вт. Температурний розрахунок показав, що в навантаженому режимі максимальна температура ротора не перевищує 80 °С. Дана температура не призведе до зміни електромагнітних характеристик елементів електродвигуна, при його експлуатації при температурі оточуючого середовища не вище 40 °С.

5. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, їх реалізація дозволяє провести заходи безпеки під час експлуатації електродвигунів та здійснити організацію цивільного захисту на об'єктах господарської діяльності

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с
2. Акимов Л.В. Динамические параметры асинхронных двигателей частотно-регулируемых электроприводов / Л.В. Скимов, В.О. Котляров, Д.Г. Литвиненко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 3. – С. 10-14.
3. Залізецький А.М. Дослідження частотного електропривода в статичних режимах роботи /А.М. Залізецький, О.В. Пізньор // Вісник Хмельницького національного технічного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2012. – № 3. – С. 69-74.
4. Моделирование переходных процессов высокоскоростных асинхронных двигателей в Ansys Maxwell / В. Е. Плюгин [и др.] // Электротехнические и компьютерные системы = Electrotechnic and Computer Systems. – 2016. – № 22 (98). – С. 160-164.
5. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с
6. Мьller, T.; Blazek, G.; Henning, F. Design concept of a lightweight electric motor casing with support from thermomechanical simulations. Int. J. Automot. Compos. 2016, 2, 2
7. Стьопін Ю. О. Математична модель теплових процесів асинхронних електродвигунів при несиметрії напруг //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2015. – №. 165. – С. 128-129.
8. M. Bose, A. Bhattacharjee, and R. Sudha, “Calculation of induction motor model parameters using “nite element method,” International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), vol. 2, no. 3, pp. 41–43, 2012.

9. Зубенко Д. Ю., Петренко О. М. Теплова і електрична математична модель для асинхронних електродвигунів //Комунальне господарство міст. – 2019. – №. 149. – С. 16-18.
10. Flux Leading Software for Electromagnetic and Thermal Simulations: <http://www.cedrat.com/software/flux/>
11. Adouni, A.; Cardoso, A.J.M. Thermal analysis of low-power three-phase induction motors operating under voltage unbalance and inter-turn short circuit faults. *Machines* 2020, 9, 2.
12. Xie, Y.; Wang, Y. 3D temperature field analysis of the induction motors with broken bar fault. *Appl. Therm. Eng.* 2014, 66, 25–34.
13. Костяєва М. С. Вимоги безпеки під час експлуатації електродвигунів власних потреб //ББК 74.58 І-66. – 2016. – С. 88.
14. Automation & Motors European Product Lines [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.weg.net/institutional/UA/en/>