

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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 621.313.

До захисту допущено:

В.о.Завідувач кафедри
_____ М.А. Коваленко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2025 р.

.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електричні машини та апарати»

зі спеціальності (спеціалізації) 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

на тему: «Однофазний асинхронний двигун з постійною підключеною ємністю»

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-41мп Букань П.Є.

Керівник: доцент Реуцький М.О.

Рецензент: старший викладач Желінський М.М.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Михайло КОВАЛЕНКО

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Буканю Павлу Євгеновичу

1. Тема дипломного проекту «Однофазний асинхронний двигун з постійною підключеною ємністю»
науковий керівник дисертації Реуцький Микола Олександрович, доцент, к.т.н.,
затверджені наказом по університету від «03 » листопада 2025 р. № 4778 - С
2. Термін подання студентом дисертації 09.12.2025
3. Об'єкт дослідження: Однофазний асинхронний двигун з постійною підключеною ємністю.
4. Предмет дослідження: розробка розрахункової методики та алгоритму розрахунку однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: У роботі необхідно розробити та реалізувати в середовищі Mathcad алгоритм розрахунку однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю, виконати розрахунок його основних характеристик і проаналізувати отримані результати.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: складальні креслення елементів електродвигуна, презентація конструкцій, розрахунків магістерської дисертації.
7. Перелік публікацій: Електромашинний підсилювач поперечного поля потужністю 2кВт / Реуцький М.О., Чамлай Г.Ю., Букань П.Є. // Міжнародний

науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – Київ: «Політехніка». – 2024.

8. Дата видачі завдання 01.11.24

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз технічної документації та креслень електродвигуна.	10.12.24	
2	Опис конструкції	25.02.25	
3	Теоретичний розрахунок електромагнітних і механічних характеристик двигуна за аналітичною методикою	20.06.25	
4	Розробка алгоритму та реалізація розрахункової програми в середовищі Mathcad	23.09.25	
5	Розрахунок параметрів і електромеханічних характеристик базового варіанта двигуна в Mathcad	26.10.25	
6	Висновки по роботі. Оформлення.	01.12.25	

Студент

(підпис)

П.Є.Букань
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

М.О. Реуцький
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 6 розділів, містить приблизно 89 сторінок, 14 рисунків, 15 таблиць та 14 джерел.

Назва магістерської дисертації:

«Однофазний асинхронний двигун з постійною підключеною ємністю»

Мета магістерської роботи — розробка та реалізація розрахункової методики однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю на базі існуючих конструкцій магнітопроводів статора і ротора, а також дослідження впливу параметрів ємності та марки електротехнічної сталі осердя на електромагнітні, механічні й енергетичні характеристики двигуна.

Всі розрахунки проведені в програмі Mathcad.

Ключові слова: Ключові слова: однофазний асинхронний двигун, однофазна мережа, постійно підключена ємність, електромагнітний розрахунок, втрати в сталі, Mathcad.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 6 chapters, contains approximately 89 pages, 14 figures, 15 tables, and 14 references.

Title of the master's thesis:

“Development and Investigation of a Two-Phase Asynchronous Motor with Permanently Connected Capacitor for Ventilation Systems”

The purpose of the master's thesis is the development and implementation of a calculation methodology for a two-phase asynchronous motor with a permanently connected capacitor, based on existing stator and rotor magnetic core designs, as well as the investigation of the influence of capacitor parameters and the grade of electrical steel on the electromagnetic, mechanical, and energy characteristics of the motor.

All calculations were performed using the Mathcad software.

Keywords: two-phase asynchronous motor, single-phase power supply, permanently connected capacitor, electromagnetic calculation, steel losses, Mathcad.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕХНІЧНІ УМОВИ.....	11
1.1 Основні параметри і характеристики	11
1.2 Конструктивно-технічні вимоги	11
1.3 Вимоги до електричних, електромеханічних параметрів і характеристик	12
1.4 Вимоги до надійності	12
1.5 Комплектність	13
1.6 Маркування	13
1.8 Вимоги безпеки.....	14
1.9 Правила приймання	14
1.10 Методи контролю	16
1.11 Транспортування й зберігання	17
1.12 Вказівки по експлуатації.....	17
1.13 Гарантії виробника	17
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	19
2.1 Класифікація вентиляторів.	19
2.2 Принцип роботи конденсаторного двигуна.....	21
2.3 Конструктивні особливості АД із зовнішнім ротором	23
3 Опис конструкції двигуна.....	25
4. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКИ.....	27
4.1 Технічне завдання на двигун серійного виробництва	27
4.2 Розрахунок головної обмотки статора	29
4.3. Розрахунок номінального режиму	34
4.4 Втрати в сталі	35
4.5 Розрахунок допоміжної обмотки	36
4.6 Розрахунок пускового режиму	42
4.7. Тепловий розрахунок закритого асинхронного мікродвигуна	45
5. РОЗРАХУНОК ДВИГУНА BL-B250B-2C-D02-01 В MATHCAD	50

5.1 Технічне завдання.....	50
5.2 Встановлення геометричних головних розмірів	51
5.4 Попередній розрахунок магнітного потоку та індукції.....	54
5.5 Розрахунок обмотк статора.....	54
5.6 Розрахунок активного й індуктивного опорів обмотки статора.....	56
5.7 Розрахунок активного й індуктивного опорів обмотки ротора	59
5.8 Розрахунок струму намагнічування.....	60
5.9 Розрахунок параметрів робочого режиму	63
5.10 Розрахунок втрат	64
5.11 Розрахунок конденсаторної обмотки	66
5.12 Тепловий розрахунок	67
6. СТАРТАП-ПРОЕКТ	70
6.1 Методика проведення експериментального дослідження.....	71
6.2 Суть експерименту	71
6.3 Обробка результатів вимірювань.....	71
6.4 Мета дослідження.....	72
6.5 Статор.....	72
6.6 Ротор	74
ВИСНОВОК	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86
ДОДАТОК А	88
ДОДАТОК Б.....	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВД - вентильний двигун

ЕМ - електрична машина

ЕРС - електрорушійна сила

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

У даній магістерській роботі на основі існуючих класичних методик [1,3] електромагнітного розрахунку асинхронних електричних машин, розроблених переважно для двигунів середньої та великої потужності, створено адаптовану методику розрахунку асинхронного конденсаторного двигуна малої потужності. Зазначена методика реалізована у вигляді обчислювальної програми в середовищі Mathcad, яка дозволяє виконувати інженерний розрахунок малопотужних електричних машин з урахуванням їхніх конструктивних особливостей, магнітних навантажень, втрат у сталі та параметрів конденсаторної обмотки. Розроблена програма призначена для подальшого практичного використання при проектуванні, аналізі та модернізації асинхронних двигунів малої потужності на базі існуючих конструкцій магнітопроводів.

Асинхронні електродвигуни є одними з найпоширеніших типів електричних машин змінного струму завдяки простоті конструкції, високій надійності та економічності. У сучасній техніці вони широко використовуються у вентиляційних установках, насосах, компресорах, холодильних агрегатах, побутовій техніці та системах автоматизації.

Однофазні та двофазні асинхронні двигуни з постійно підключеною ємністю особливо поширені у малопотужних приводах, де важливими є простота пуску, компактність і стабільна робота без зовнішніх пускових пристроїв. Такі двигуни формують обертальне магнітне поле за рахунок двох обмоток — робочої та допоміжної, одна з яких підключена через постійну ємність.

Однією з головних проблем таких машин є високі втрати в сталі осердя статора, що призводять до значного нагріву. Наприклад, при використанні сталі марки 50W800 температура осердя може досягати 120 °С, що знижує довговічність ізоляції та ККД двигуна. Для підвищення енергоефективності актуальним є дослідження впливу матеріалу сталі та параметрів ємності на роботу двигуна, а також створення інструментів автоматизованого розрахунку, які дозволять оперативно виконувати аналіз і порівняння характеристик різних варіантів конструкцій.

Метою роботи є: розроблення програми для розрахунку однофазного (двофазного) асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю на базі готових конструкцій магнітопроводів статора і ротора, а також дослідження впливу параметрів ємності й марки сталі осердя (50W800 та 50W250) на електромагнітні та енергетичні характеристики двигуна.

Об'єкт дослідження: однофазний асинхронний електродвигун з постійно підключеною ємністю малої потужності та електромагнітні процеси, що відбуваються в ньому під час роботи.

Основною задачею роботи є: Створення методики розрахунку однофазного двигуна з постійно підключеною ємністю для існуючих конструкцій магнітопроводу на основі літературних джерел [1,2].

Цілю роботи є:

Створення ефективної програми розрахунку однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю, яка дозволить проводити інженерний аналіз, оцінювати втрати в сталі різних марок та визначати оптимальні параметри електричної ємності для підвищення енергоефективності електричної машини.

Шляхи реалізації: Проведення аналізу існуючих методик електромагнітного розрахунку однофазних асинхронних двигунів з постійно підключеною ємністю для малопотужних машин, формуванні узагальненого алгоритму повного електромагнітного розрахунку з урахуванням режимів роботи та параметрів обмоток, а також у розробці розрахункової програми в середовищі Mathcad, що забезпечує послідовне визначення електромагнітних, енергетичних і втратних показників двигуна. Реалізація методики передбачає врахування конструктивних особливостей статора і ротора, зокрема типу з'єднань, кількості просічок та марки електротехнічної сталі, проведення розрахункових досліджень для типового малопотужного двигуна з аналізом його механічних та енергетичних характеристик, а також формування практичних рекомендацій щодо підвищення енергоефективності шляхом оптимізації конструктивних і схемних рішень.

1 ТЕХНІЧНІ УМОВИ

1.1 Основні параметри і характеристики

Технічні параметри однофазного асинхронного двигуна типу **BL-B250B-2C-D02-01** з постійно підключеною ємністю.

Таблиця 1.1

№	Найменування параметра	Значення
1	Номінальна напруга живлення, В	115
2	Частота живлення, Гц	50 / 60
3	Споживана потужність, Вт	240 / 250
4	Номінальний струм, А	2,2
5	Частота обертання, об/хв	2400 / 2500
6	ККД, %	не менше 70
7	Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	0,8
8	Режим роботи	S1 — тривалий
9	Клас ізоляції	F (до 155 °C)
10	Ступінь захисту	IP44
11	Діапазон температур, °C	-20...+50
12	Вологість, %	до 90
13	Маса, кг	не більше 2,1

1.2 Конструктивно-технічні вимоги

Магнітопровід статора формується з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм марки **50W800** (або у варіанті модернізації — **50W250**), ізольованих термостійким покриттям. Пакет осердя має висоту 42 мм. Під час експлуатації статор може нагріватися до 120 °C, що пояснюється підвищеними вихровими втратами у сталі 50W800, тому рекомендовано застосовувати матеріал 50W250 з меншими питомими втратами.

Ротор — короткозамкнений, виконаний з алюмінієвого сплаву **AK8M3**, типу «біляча клітка». Завдяки зовнішньому розташуванню ротора двигун одночасно виконує функцію вентиляційного колеса.

Корпус алюмінієвий, литий, з покриттям кольору **RAL 5022 (синій)**, забезпечує ступінь захисту IP44. Робоче колесо має діаметр 250 мм, виготовлене з поліаміду, армованого скловолокном, та складається з 7 лопатей.

Обмотки статора виконані мідним дротом з термостійкою ізоляцією класу F, просочені лаком і закріплені поліамідними клинами. Підшипники — кулькові, закритого типу, з мастилом на весь термін служби.

Конструкція двигуна забезпечує низький рівень шуму (до 60 дБ) і стійкість до вібрацій. Балансування ротора проводиться у двох площинах.

1.3 Вимоги до електричних, електромеханічних параметрів і характеристик

1. Робота двигуна має бути стабільною при відхиленні напруги $\pm 10\%$ від номінального значення.
2. Перегрів обмоток не повинен перевищувати $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температурі навколишнього середовища $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. ККД у номінальному режимі — не менше 70%.
4. Коефіцієнт потужності — не нижче 0,8.
5. Рівень механічного шуму — не більше 60 дБ.
6. Двигун повинен забезпечувати пуск без сторонніх пристроїв при напрузі не нижче $0,9 U_{\text{ном}}$.
7. Електромагнітна система забезпечує плавний пуск і рівномірний момент у всьому робочому діапазоні.

1.4 Вимоги до надійності

1.4.1 Середнє напрацювання електродвигуна на відмову повинно бути не менше 40000 г.

1.4.2 Термін служби електродвигуна повинен бути не менше 5 років.

1.4.3 Зберігати двигун необхідно в заводській упаковці у вентильованому приміщенні за температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наявність у повітрі парів і

домішок, що викликають корозію і порушують ізоляцію і герметичність з'єднань, не допускається. Для вантажно-розвантажувальних робіт використовувати відповідну підйомну техніку для запобігання можливих пошкоджень двигуна. Під час вантажно-розвантажувальних робіт виконувати вимоги переміщень для даного типу вантажів. Навантаження й розвантаження повинні проводитися без різких поштовхів і ударів. Транспортувати дозволяється будь-яким видом транспорту за умови захисту двигуна від атмосферних опадів і механічних ушкоджень. Для забезпечення бездоганної роботи і по можливості довгого терміну служби рекомендуємо зберігати пристрій протягом максимум одного року.

1.5 Комплектність

- Електродвигун BL-B250B-2C-D02-01 — 1 шт.
- Паспорт (формуляр) виробу — 1 шт.
- Інструкція з монтажу та експлуатації — 1 шт.
- Упаковка заводська — 1 комплект.

1.6 Маркування

Маркування наноситься термостійким способом на корпус двигуна або табличку з алюмінію.

На табличці вказуються:

- тип двигуна;
- напруга, частота, потужність;
- ККД і $\cos \varphi$;
- рік виготовлення, серійний номер;
- позначки відповідності CE, RoHS.

Висота шрифту не менше 2 мм, нанесення — методом лазерного гравіювання або шовкотрафаретного друку.

1.7 Упакування

Двигун упаковується у вологостійку тару з амортизувальними прокладками. Пакування повинно забезпечувати захист від механічних пошкоджень, корозії та вологи під час транспортування. Допускається багаторазове пакування при зберіганні на складі.

1.8 Вимоги безпеки

Конструкція двигуна повинна відповідати вимогам електробезпеки згідно з ДСТУ.

Обов'язкове захисне заземлення корпусу.

Пуск і робота двигуна допускаються лише при справному конденсаторі та цілісності ізоляції.

Конструкція повинна унеможливлювати доступ користувача до струмопровідних частин.

1.9 Правила приймання

Загальні положення

1.9.1 При прийманні електродвигуна на підприємстві-виробнику проводяться наступні категорії випробувань:

- приймально-здавальні;
- періодичні;
- типові.

1.9.2 Пред'явлення електродвигуна на випробування проводиться по повідомленню.

1.9.3 Електродвигуни на випробування й приймання повинні пред'являтися комплектно відповідно до комплекту поставки.

1.9.4 Контрольно-вимірювальна і випробувальна апаратури повинна бути опломбована й мати посвідчення про перевірку (півірку) із вказівкою терміну чергової перевірки (півірки). Забороняється застосовувати апаратуру, термін перевірки (півірки) котрої минув, з порушеними пломбами, без паспортів і посвідчень.

Включення й калібрування контрольно-випробувальних приладів мусить виконуватись відповідно до інструкцій її експлуатації.

1.9.5 Підприємство - виготовлювач повинне забезпечувати представників замовника усіма необхідними контрольно-вимірювальними приладами й

випробувальним устаткуванням, вимірювальним інструментом й експлуатаційною документацією на них, необхідними для проведення випробувань і приймання.

1.9.6 Випробування проводяться в нормальних кліматичних умовах при:

- температурі навколишнього середовища від +15 до +35°C;
- відносній вологості повітря від 45 до 80 %;
- атмосферному тиску від 600 до 800 мм рт. ст.

Примітка - При температурі повітря вище +35°C відносна вологість не повинна перевищувати 70 %.

1.9.7 Випробування електродвигунів на міцність при впливі синусоїдальної вібрації на одній частоті (технологічна тряска) проводить бюро цехового контролю, в процесі виготовлення до пред'явлення на приймально-здавальні випробування й робить оцінку в супровідному документі (технологічній карті).

1.9.8 Результати кожного виду випробувань вважаються позитивними а електродвигуни витримавшими їх, якщо в процесі їхнього проведення параметри й характеристики відповідають вимогам дійсних Технічних умов.

1.9.9 Випробні режими електродвигунів повинні встановлюватися й підтримуватися за показниками робочих засобів вимірів з обліком відхилень, які не перевищують значень, зазначених у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Фактор, що впливає	Значення
1. Температура	-40 - +70°C
2. Відносна вологість	75%
3. Час	40000 годин
6. Амплітуда віброприскорення й пікове ударне прискорення: - 50 Гц; - 60 Гц.	<2.8 мм/с
7. Число циклів включення	40000
8. Напруга електроживлення:	115 В

1.10 Методи контролю

1.10.1 Перевірка конструктивно-технічних вимог.

1.10.1.1 Відповідність електродвигуна вимогам - перевіряти зовнішнім оглядом і звіренням із кресленнями із застосуванням міряльного інструмента, що забезпечує точність вимірів у межах допусків, зазначених у кресленнях.

1.10.1.3 Перевірку моменту інерції ротора електродвигуна робити до збірки електродвигуна на готовому якорі методом крутильних коливань.

1.10.1.4 Перевірка працездатності електродвигуна при довільному положенні в просторі не проводиться. Відповідність електродвигуна даній вимозі забезпечується конструкцією електродвигуна й пристрою, у яке вбудовується електродвигун.

1.10.2 Контроль надійності

Контроль надійності проводиться по програмі прискорених випробувань.

1.10.3 Контроль комплектності

Контроль комплектності проводять згідно пункту 1.5.

1.10.4 Комплектність електродвигуна перевіряти візуально на відповідність паспорту й дійсним технічним умовам.

1.10.5 Контроль маркування

1.10.5.1.Перевірку маркування робити шляхом зовнішнього огляду. Зміст, місцезнаходження маркування перевіряти звіренням з конструкторською документацією. Одночасно звіряються заводські номери на маркуванні із заводськими номерами в паспортах.

1.10.6 Контроль упакування

1.10.6.1 Перевірку упакування й консервації електродвигуна робити в процесі укладання його в транспортувальну тару. Необхідно перевірити відповідність виконуваних операцій, застосовуваних матеріалів, тари й комплектуючих виробів конструкторської документації, контролювати хід підготовки електродвигуна до упакування, готовність пакувальної й транспортувальної тари, кількість електродвигунів і документів у пакувальній тарі.

1.11 Транспортування й зберігання

1.11.1 Зберігати двигун необхідно в заводській упаковці у вентильованому приміщенні за температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наявність у повітрі парів і домішок, що викликають корозію і порушують ізоляцію і герметичність з'єднань, не допускається. Для вантажно-розвантажувальних робіт використовувати відповідну підйомну техніку для запобігання можливих пошкоджень двигуна. Під час вантажно-розвантажувальних робіт виконувати вимоги переміщень для даного типу вантажів. Навантаження й розвантаження повинні проводитися без різких поштовхів і ударів. Транспортувати дозволяється будь-яким видом транспорту за умови захисту двигуна від атмосферних опадів і механічних ушкоджень. Для забезпечення бездоганної роботи і по можливості довгого терміну служби рекомендуємо зберігати пристрій протягом максимум одного року.

1.12 Вказівки по експлуатації

1.12.1 Електродвигун повинен експлуатуватися в умовах і режимах, що відповідають вимогам дійсних Технічних умов.

1.12.2 При експлуатації електродвигун не вимагає технічного обслуговування.

1.12.3 Застосування електродвигуна в інших виробках і режимах (умовах), крім зазначених у дійсних Технічних умовах, повинне бути погоджене з розроблювачем.

1.13 Гарантії виробника

1.13.1 Підприємство-виробник гарантує відповідність якості електродвигуна вимогам дійсних Технічних умов при дотриманні споживачем умов експлуатації, зберігання й транспортування, установлених дійсними технічними умовами.

1.13.2 Термін служби електродвигуна - 5 років.

1.13.3 Гарантійний наробіток електродвигунів установлюється 40000 г, або 5 років.

1.13.4 Термін зберігання до введення електродвигуна в експлуатацію - 1 років у вентильованому приміщенні за температури -40°C до +80°C опалювальних приміщеннях.

1.13.5. Протягом гарантійного строку зберігання й експлуатації підприємство-виготовлювач в найкоротший технічно можливий строк усуває відмови й несправності, що виникли в електродвигуні, або робить заміну електродвигуна, що вийшов з ладу, якщо це відбулося з вини підприємства-виготовника.

Після усунення дефектів гарантійний строк продовжується на час, який був витрачений на виклик представника підприємства-виготовлювача й усунення дефектів, про що робиться запис у паспорті, що завіряється представником підприємства-виготовника.

Після закінчення гарантійного строку підприємство-виготовлювач забезпечує в погоджений термін відповідність електродвигуна вимогам дійсних технічних умов й усуває відмови й несправності.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Класифікація вентиляторів.

Вентиляційні системи є важливою складовою будь-якого промислового, громадського або житлового комплексу. Їх основне призначення полягає у забезпеченні циркуляції повітря, видаленні надлишкового тепла, вологи, пилу та шкідливих газів, а також у підтриманні комфортного мікроклімату для людей і технологічного обладнання. Для приводу вентиляційних систем використовуються різні типи електричних машин, серед яких найпоширенішими є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Особливе місце серед них займають двигуни із зовнішнім ротором, оскільки така конструкція дозволяє безпосередньо з'єднати робоче колесо вентилятора з ротором, що забезпечує компактність, рівномірне охолодження двигуна, зниження рівня шуму і зменшення втрат потужності.

Вентилятори, що застосовуються у промисловості, поділяються за конструкцією та принципом дії на осьові (аксіальні), радіальні (відцентрові), діаметральні та спеціальні. В осьових вентиляторах повітря рухається паралельно осі обертання колеса, у радіальних — повітря змінює напрямок руху під дією відцентрової сили, а діаметральні створюють потік повітря уздовж осі робочого колеса, забезпечуючи рівномірний розподіл тиску.

За рівнем створюваного повного тиску вентилятори поділяються на низького, середнього та високого тиску. Вентилятори низького тиску (до 1 кПа) мають широкі лопатки, загнуті назад для підвищення ефективності, характеризуються великою швидкохідністю, а швидкість потоку повітря в них не перевищує 50 м/с. Вентилятори середнього тиску (1–3 кПа) можуть мати лопатки, загнуті як у напрямку обертання, так і проти нього, при цьому швидкість потоку може досягати 80 м/с. Вентилятори високого тиску (3–12 кПа) мають вузькі колеса, схожі за конструкцією на компресорні, і створюють швидкість потоку повітря до 200 м/с.

За напрямком обертання робочого колеса вентилятори поділяються на правого обертання — коли колесо обертається за годинниковою стрілкою, і лівого

— коли проти годинникової. Вони можуть бути як припливними (подача свіжого повітря), так і витяжними (видалення забрудненого повітря). Залежно від форми лопаток робочого колеса вентилятори поділяються на такі, що мають лопатки, загнуті вперед, загнуті назад або прямі радіальні лопатки. Кожен тип має свої переваги: лопатки, загнуті вперед, забезпечують високу продуктивність при малих габаритах і низькому рівні шуму, тоді як загнуті назад — більш високий коефіцієнт корисної дії і меншу чутливість до зміни навантаження.

Вентилятори також класифікують за умовами експлуатації. Залежно від складу та температури переміщуваного середовища вони можуть бути звичайними — для подачі неагресивного повітря з температурою до 80 °C і невеликою запиленістю, корозійностійкими — для агресивних газів, термостійкими — для температур від 80 °C до 200 °C, а також вибухобезпечними — для роботи у вибухонебезпечних середовищах.

За місцем встановлення вентилятори бувають підлогові (на опорі або фундаменті), каналні (вмонтовуються безпосередньо в повітроводі) та дахові (розташовуються на покрівлі будівель). Така класифікація дозволяє вибирати оптимальний тип вентилятора для конкретних умов експлуатації — промислових цехів, адміністративних будівель, житлових будинків або технологічних установок.

Спроектований у даній роботі електродвигун призначений для приводу відцентрового вентилятора низького тиску правого обертання з лопатками, загнутими вперед. Цей тип вентилятора характеризується низьким рівнем шуму, високою ефективністю та стабільною подачею повітря при відносно малих розмірах. Робоче колесо такого вентилятора створює рівномірний тиск повітряного потоку по всьому об'єму, що робить його придатним для застосування в системах промислової та побутової вентиляції, кондиціонування, охолодження електронного обладнання та інших теплових установок.

Завдяки використанню асинхронного двигуна із зовнішнім ротором забезпечується безпосереднє з'єднання вентилятора з валом двигуна, що дозволяє уникнути додаткових з'єднань і втрат механічної енергії. Така конструкція має високий рівень надійності, простоту обслуговування та тривалий термін

експлуатації. На рисунку 2.1 у роботі наведено приклад відцентрового вентилятора низького тиску з лопатками, загнутими вперед, який використовується у поєднанні з електродвигуном типу **BL-B250B-2C-D02-01**.



Рисунок 2.1 - Відцентровий вентилятор правого обертання.

2.2 Принцип роботи конденсаторного двигуна.

У статора такого електродвигуна в пазах розміщено дві окремі обмотки — робочу та допоміжну. Допоміжна (фазозсувна) обмотка підключається до мережі через конденсатор, який створює зсув фази між струмами в обмотках. Основною перевагою такого двигуна є простота конструкції завдяки використанню короткозамкненого ротора, що забезпечує надійність та дешевизну. Недоліком є малий або навіть відсутній пусковий момент при прямому підключенні до мережі без допоміжних засобів.

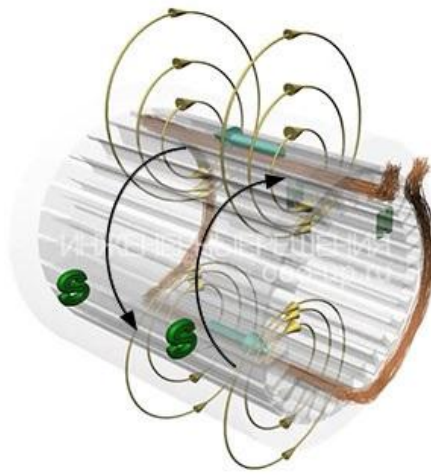


Рисунок 2.2 - Відцентровий вентилятор правого обертання.

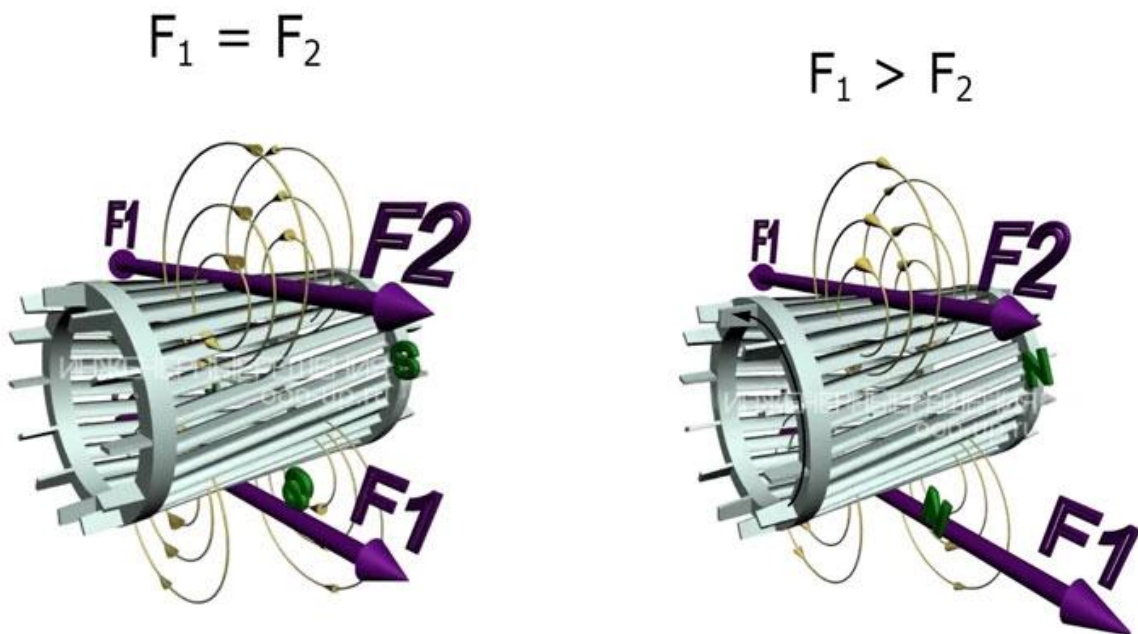


Рисунок 2.3 - Формування обертового магнітного поля в однофазному асинхронному двигуні

Однофазний струм, що протікає по обмотці статора, створює пульсуюче магнітне поле, яке можна розкласти на дві складові — два обертові магнітні поля однакової амплітуди, але спрямовані у протилежні сторони. У стані спокою ротора обидва поля створюють однакові за величиною, але протилежні за напрямком електромагнітні моменти. У результаті їх дія взаємно компенсується, і двигун не розвиває пускового моменту, тобто не здатний самотійно почати обертання. Якщо ж ротор попередньо розкрутити в будь-який бік, один з моментів перевищить інший, і двигун почне працювати у вибраному напрямку.

Щоб забезпечити самозапуск, у конструкцію вводять другу обмотку, яка зміщена у просторі на 90° електричних відносно робочої. Обидві обмотки підключаються до однофазного джерела живлення, проте одна з них (допоміжна) з'єднується через фазозсувний елемент — конденсатор або резистор. Завдяки цьому створюється зсунуте за фазою магнітне поле, яке на початковому етапі забезпечує виникнення крутного моменту й обертання ротора.

У конструкції статора робоча обмотка, як правило, займає близько двох третин пазів і називається головною, тоді як допоміжна (конденсаторна) займає приблизно одну третину пазів. Хоча такий двигун фактично має дві фази, у технічній літературі його прийнято називати однофазним, оскільки живлення подається лише від однофазної мережі.

Серед усіх типів фазозсувних елементів лише конденсатор забезпечує оптимальний зсув струмів між обмотками, що дає можливість отримати найкращі пускові характеристики, високий коефіцієнт потужності та стабільну роботу двигуна. Саме тому однофазні асинхронні двигуни з постійно підключеним конденсатором мають найкращі експлуатаційні властивості серед усіх типів двигунів, призначених для живлення від однофазної мережі.

2.3 Конструктивні особливості АД із зовнішнім ротором

Обернені двигуни набувають все більшої популярності і в різних галузях, так і в вентиляційному обладнанні використовують обернені машини.

АД із зовнішнім ротором мають ряд переваг в порівнянні з аналогічними АД звичної конструкції, а саме:

- масо габаритні показники;
- простіше розміщення у корпусі вентилятора;
- менший аеродинамічний супротив у корпусі;
- менший об'єм вентиляційної сітсеми.

Як приклад наведні турбіни ВЦУ стандартного виконання двигуна і обереного.



Рисунок 2.4 - Турбіни ВЦУ зі стандартним та оберненим виконанням приводу.

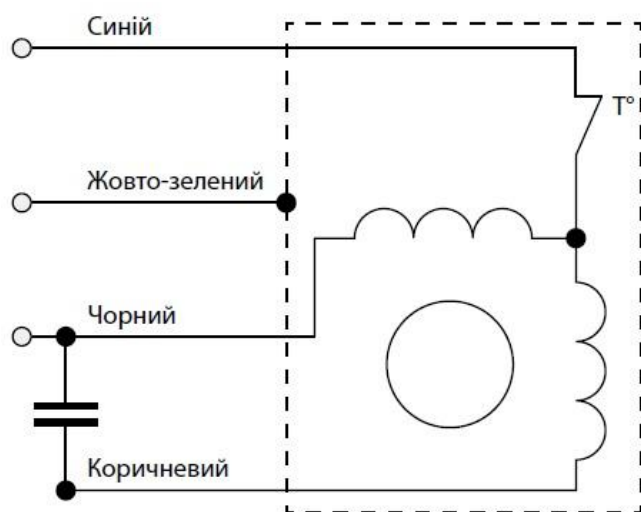


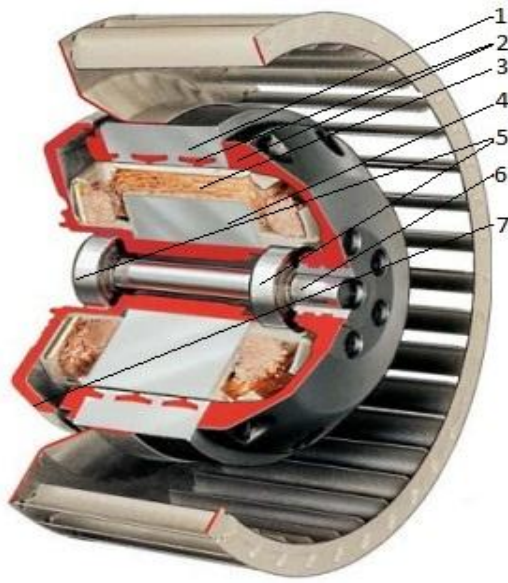
Рисунок 2.5 – Схема включення конденсаторного двигуна.

Приведені на рисунку турбіни ВЦУ 200x74, з ліва турбіна із звичайним приводом, з права аналогічна турбіна з АД оберненого типу. Обернений двигун полегшує монтаж через свою компактність.

Схема підключення однофазного конденсаторного двигуна наведена на рисунку 2.5.

3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА

Асинхронний двигун (рисунок 3.1) із зовнішнім ротором складається з наступних двох основних частин:



- нерухомої – статора двигуна;
- обертової – ротора двигуна.

Нерухома частина електродвигуна - складається з магнітопроводу статора (поз.4), виконана з холоднокатаної сталі, в пазах якої вкладено обмотку статора. З одного боку магнітопроводу закріплено розвідну плату з термозапобіжником. З іншого боку сферо подібний пластамасовий захист лобових частин обмотки.

Рисунок 3.1 – АД із зовнішнім ротором. До статору двигуна шляхом розвальцювання кріпиться алюмінієвий корпус, в спеціально розточених місцях якого встановлюють шарикопідшипники.

Обертова частина двигуна в свою чергу складається з магнітопроводу ротора, який шляхом пресування встановлюється вал на іншому кінці якого знаходиться місце під стопорне кільце для фіксації шарикопідшипників.

Конструкція такого двигуна дозволяє ефективніше використати вільний простір, як за межами корпусу вентилятора так і в самому корпусі.



Рисунок 3.2 – Активна частина статора до і після покриття. Статор двигуна в основі котрого пакет шихтованої електротехнічної сталі є покритим шаром конструкційної пластмаси товщиною від 0,8 до 4 мм. Що виконує роль ізоляційного матеріалу, а також конструкційно несучі деталі. На статорі розташовано 16 пазів грушевидної форми. В середині пакету знаходиться технологічний отвір, в який під час процесу збирання вставляється алюмінієвий корпус. В отворі знаходиться два пів кола що виконують

роль замка. Фото статорів приведено на рисунку 3.2 , ліворуч приведено статор до покриття пластмасою, праворуч після. Статор покритий пластмасою наведеному рисунку пока

Ротор двигуна (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Ротор АД оберненого типу.

Складається з листів шихтованої сталі з 22 пазами трапецеїдальної форми. Пази мають скіс на одну зубцеву поділку. В пазах знаходяться стрижні з алюмінію, з обох боків закорочені КЗ кільцями. З одного боку КЗ кільце переходить в конструкційну частину напів сферичної форми, в центрі котрої розміщено втулку для запресовки валу. З внутрішньої сторони виконано ребра жорсткості, а також у нижньому КЗ кільці балансувальні отвори. Алюміній був залитий статичним методом з наступним пресуванням. Після чого пакет магнітопроводу ротора і алюмінева конструкція була оброблена на верстаті .

4. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКИ

Мета розрахунків

Розрахунки, наведені в розділі 4, не є суто формулярними, а виконують роль базового еталонного етапу, необхідного для адаптації існуючих класичних методик, розроблених для електричних машин більшої потужності, до умов малопотужних асинхронних двигунів. Особлива увага приділяється тим параметрам і коефіцієнтам, вплив яких у машинах малої потужності є визначальним, зокрема значенням індукції в елементах магнітопроводу, втратам у сталі, відносній величині повітряного зазору, щільності струму в обмотках та параметрам конденсаторної фази.

4.1 Технічне завдання на двигун серійного виробництва

Основні технічні характеристики повинні відповідати даним приведеним у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики.

№	Найменування параметра	Од. вим.	Значення / примітка
1	Номінальна корисна потужність	Вт	50
2	Номінальна споживана потужність	Вт	79,5
3	Номінальна напруга живлення	В	220
4	Частота мережі	Гц	50
5	Синхронна швидкість	об/хв	3000 (в тексті “3000 об/мин”)
6	Кількість пазів статора	пази	15
7	Тип обмотки статора	—	одношарова, двоплощинна, “розчесана”, крок ($y = 9$) пазів
8	Обмотувальний коефіцієнт	—	0,906
9	Прийнятий коефіцієнт заповнення	—	1,1
10	Прийнятий коеф. ширини полюса	—	0,665
11	Прийнятий коеф. витків	—	1,1
12	Прийнята магнітна індукція в зазорі	Гс	4900
13	Магнітний потік у зазорі	мкс	≈105
14	Опір головної (робочої) обмотки	Ом	109,5
15	Опір допоміжної (конденсаторної) обмотки	Ом	88,1
16	Номінальний струм головної обмотки з урахуванням втрат	А	0,292

17	Коефіцієнт потужності головної фази	—	0,62
18	Розрахований лінійний номінальний струм двигуна	А	0,58
19	Розрахована ємність робочого конденсатора	мкФ	1,69 (за формулою), прийнято 2 мкФ
20	Напруга на конденсаторі	В	405
21	Пусковий струм (повний)	А	1,295
22	Пускова потужність	Вт	265
23	Пусковий момент	гс·см	≈730 гс·см
24	ККД	%	≈63
25	Зовнішній діаметр статора	мм	89
26	Внутрішній діаметр статора	мм	51,5
27	Розрахункова довжина осердя статора	мм	38
28	Повітряний зазор	мм	0,3

Таблиця 4.2 – Основні розміри ротора.

№	Найменування параметра	Од. вим.	Значення / примітка
1	Повітряний зазор	мм	0,3
2	Внутрішній діаметр статора	мм	51,5
3	Зовнішній діаметр ротора	мм	50,9
4	Розрахункова довжина пакета (активна довжина)	мм	40
5	Кількість пазів ротора	пази	15
6	Тип ротора	—	Короткозамкнений (белича клітка), мідні стержні і кільця
7	Діаметр стержня ротора	мм	5,2
8	Площа перерізу стержня	мм ²	21,2
9	Довжина стержня	мм	40
10	Площа перерізу короткозамкненого кільця	мм ²	40
11	Середній діаметр кільця	мм	40,9
12	Опір одного стержня	Ом	$0,41 \cdot 10^{-4}$
13	Опір елемента кільця	Ом	$0,464 \cdot 10^{-4}$
14	Еквівалентний опір ротора, приведений	Ом	$0,945 \cdot 10^{-4}$
15	Матеріал ротора (пакет)	—	Сталь 912, товщина листа 0,5 мм

Таблиця 4.3 – Основні розміри статора.

№	Найменування параметра	Од. вим.	Значення / примітка
1	Зовнішній діаметр статора	мм	89
2	Внутрішній діаметр статора	мм	51,5
3	Довжина пакета (активна довжина)	мм	38
4	Повітряний зазор	мм	0,3
5	Кількість пазів статора	пази	15
6	Тип паза статора	—	Закритий (щілинний), профіль за штампом
7	Ширина паза біля основи	мм	3,4
8	Ширина паза при виході	мм	1,8
9	Глибина паза	мм	10,0
10	Товщина ярма статора	мм	7,0 (розраховано для індукції ≈ 8500 Гс)
11	Матеріал пакета статора	—	Електротехнічна сталь 912 (товщина листів 0,5 мм)
12	Тип обмотки	—	Одношарова, двоплощинна, «розчесана», крок ($y = 9$) пазів
13	Кількість витків у котушці головної обмотки	вит.	490
14	Діаметр дроту головної обмотки	мм	0,35 (дріт ПЭВ-2 0,35 мм), (без ізоляції)
15	Діаметр дроту допоміжної обмотки	мм	0,25 (ПЭВ-2 0,25 мм)
16	Опір головної обмотки	Ом	109,5
17	Опір допоміжної обмотки	Ом	88,1
18	Магнітна індукція в зазорі	Гс	4900 (прийнято)
19	Індукція в ярмі статора	Гс	$\approx$ 8500
20	Коефіцієнт заповнення паза	—	1,1

4.2 Розрахунок головної обмотки статора

Число пазів на статорі $Z_s = 18$. При цьому числі пазів для конденсаторного двигуна, що має дві обмотки на статорі, розташовані в рівній кількості пазів, можливі два варіанти:

- 1) або з дробовим числом пазів на полюс і фазу:

$$q = Q_A = Q_B = \frac{1/2Z_S}{2p} = \frac{9}{2} = 4\frac{1}{2};$$

2) або $q = Q_A = Q_B = 4$ при двух незаповнених пазах.

Вибираємо другий варіант, здійснений у конденсаторних двигунах єдиної серії нульового габариту.

Вибираємо на статорі одношарову двоплощинну „розчесану” обмотку (рис. 13-13) з кроком $y = \tau = \frac{Z_S}{2p} = \frac{18}{2} = 9$.

Обмотковий коефіцієнт для однофазної обмотки

$$k_o = \frac{0,707}{q \sin \frac{45^\circ}{q}} = \frac{0,707}{4 \sin \frac{45^\circ}{4}} = \frac{0,707}{4 \sin 11^\circ 15'} = 0,906$$

Приймаємо попередньо:

$$k_z = 1,1; \alpha_\delta = 0,665; k_B = 1,1; B_\delta = 49002c$$

Магнітний потік в повітряному зазорі

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l B_\delta = 0,665 \cdot 8,1 \cdot 3,8 \cdot 4900 = 10^5 \text{ мкс.}$$

Приймаємо попередньо: $k_E = 0,9$.

Число витків головної обмотки

$$w_{SA} = \frac{U_H k_E \cdot 10^8}{4 k_B f \Phi k_o} = \frac{220 \cdot 0,90 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0,906} = 992.$$

Число провідників в пазу

$$u_{\pi A} = \frac{w_{SA} a}{pq} = \frac{992 \cdot 1}{1 \cdot 4} = 248.$$

Отримавши із кривої рис. 4.1 $\eta_{II} \cos \varphi_{II} = 0,52$, відповідно до $P_H = 50 \text{ Вт}$, визначаємо номінальний струм у головній обмотці (попередньо):

$$I_{HA} = \frac{P'_S}{V\sqrt{2}U_{H1}} = \frac{P_H}{\eta_{II} \cos \varphi_{II} V\sqrt{2}U_H} = \frac{50}{0,52\sqrt{2} \cdot 220} = 0,308 \text{ A}$$

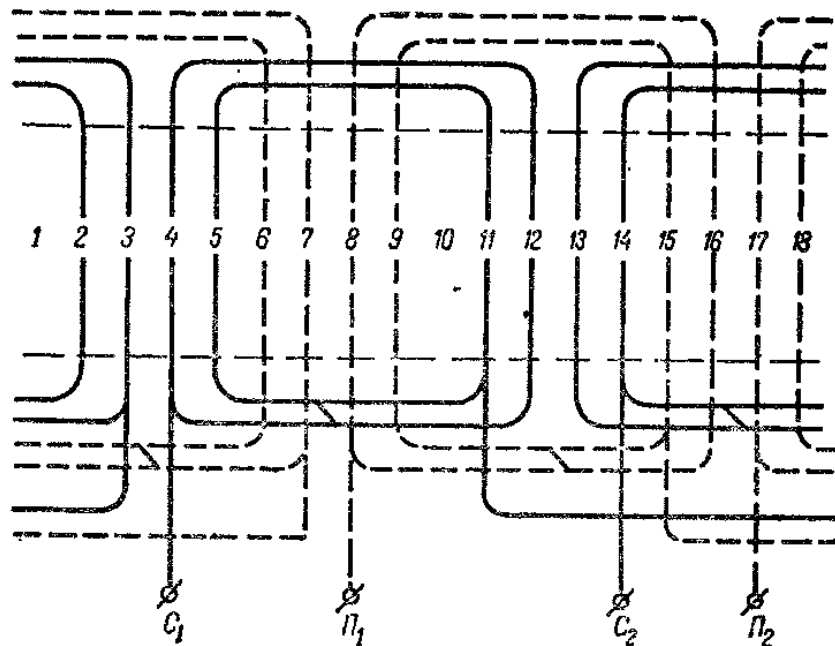


Рис. 4.1. Схема обмотки конденсаторного двигуна.

$$Z_s = 18; 2p = 2; Q_A = Q_B = 4.$$

Знаходимо переріз дроту головної обмотки статора при вибраній щільності струму

$$\Delta S = 5,5 \text{ а/мм}^2$$

$$S'_{SA} = \frac{I_H}{a\Delta_S} = \frac{0,308}{1 \cdot 5,5} = 0,056 \text{ мм}^2.$$

Найближчий перетин за стандартом $S_{SA} = 0,0573 \text{ мм}^2$; діаметр голого дроту $d_{\text{гол}} = 0,27 \text{ мм}$. Вибираємо провід марки ПЭВ-2; діаметр ізолюваного дроту $d_{\text{из}} = 0,32 \text{ мм}$.

Перетин міді в пазу

$$S_{MSA} = s_{SA} u_{HA} = 0,0573 \cdot 248 = 14,2 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт заповнення для головної обмотки

$$k_{\text{зап}} = \frac{d_{\text{из}}^2 u_{\text{п}}}{S_{\text{п}} - S_{\text{из}}} = \frac{0,32^2 \cdot 248}{55,1 - 8} = 0,54.$$

1. Опір обмоток статора

Визначивши середній крок секції по пазах $y_{\text{ср}} = 7$, розраховуємо

середню довжину лобової частини:

$$l_{\pi S} = k_1 \tau_y \beta + 2,3 = k_1 \frac{\pi(D \pm h_{nS})}{2p} \frac{y_{\text{ср}}}{\tau} + 2B = 1,2 \frac{\pi(5,15 + 0,85)}{2} \times \\ \times \frac{7}{9} + 2 \cdot 1 = 10,82 \text{ см.}$$

Середня довжина піввитку

$$l_{\text{ср}} = l + l_{\pi S} = 3,8 + 10,82 = 14,62 \text{ см.}$$

Загальна довжина дроту головної обмотки

$$L_{SA} = 2l_{\text{ср}} w_{SA} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 14,62 \cdot 992 \cdot 10^{-2} = 289,5 \text{ м.}$$

Активний опір головної обмотки

$$r_{SA} = \rho \frac{L_{SA}}{S_S \cdot a} = \frac{1}{46} \cdot \frac{289,5}{0,0573 \cdot 1} = 109,5 \text{ Ом.}$$

4.3 Розрахунок магнітної системи

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання для одношарової обмотки та напівовального паза

$$\lambda_{\pi} = \left[\frac{h_1}{3d_2} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_{\text{ш}}}{2d_2} + \frac{h_2}{d_2} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k_{\beta 1} \right] = \\ = \left[\frac{3,83}{3 \cdot 7,15} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,15} + \frac{0,3}{7,15} + \frac{0,5}{1,5} \right) 1 \right] = 1,231.$$

Для однофазної одношарової обмотки з $q > 1$ знаходимо коефіцієнти

$$k_{\beta 1} = \beta = 1; N = 1$$

$$\xi_S = 2 \left(F k_{\beta 1} - \frac{F_1 N}{2Q} \right) - \Delta_z \left(G k_{\beta 1} - \frac{G_1 N}{2Q} \right) - \\ - k_0^2 \left(\frac{t_R}{t_S} \right)^2 (1 + \beta_{\text{СК}}^2) = 2 \left(1,75 \cdot 1 - \frac{0,17 \cdot 1}{2 \cdot 4} \right) - \\ - 0,06 \left(0,8 \cdot 1 - \frac{0,37 \cdot 1}{2 \cdot 4} \right) - 0,906^2 \cdot 1,18^2 (1 + 0,85^2) = 1,45.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{\delta} = \frac{t_S}{11,9 \delta k_{\delta}} \xi_S = \frac{9}{11,9 \cdot 0,3 \cdot 1,17} \cdot 1,45 = 3,12.$$

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання для однофазної котушкової обмотки з числом котушкових груп $2p$

$$\lambda_{\pi} = 0,27 \frac{q}{l} (l_{\pi} - 0,64\tau) = 0,27 \frac{4}{3,8} (10,82 - 0,64 \cdot 8,1) = 1,6.$$

Сумарний коефіцієнт магнітної провідності

$$\Sigma\lambda = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\delta} + \lambda_{\Omega} = 1,231 + 3,12 + 1,6 = 5,95.$$

Індуктивний опір головної обмотки статора

$$\begin{aligned} x_{SA} &= 0,158 \frac{t}{100} \left(\frac{w_{SA}}{100} \right)^2 \frac{l}{pq} \Sigma\lambda = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{992}{100} \right)^2 \frac{3,8}{1 \cdot 4} 5,95 = \\ &= 43,7 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Розрахунок магнітного ланцюга

Результати розрахунку магнітного ланцюга зведені у табл. 4.4.

Таблица 4.4

Найменування ділянки магнітного ланцюга	Індукція, Гс	Магнітна напруга, a
Повітряний зазор	$B_{\delta} = 4900$	$F_{\delta} = 276$
Зубці статора	$B_{ZS} = 14350$	$F_{ZS} = 31$
Ярмо статора	$B_{aS} = 13800$	$F_{aS} = 69,5$
Зубці ротора	$B_{ZR} = 11350$	$F_{ZR} = 7,36$
Ярмо ротора	$B_{aR} = 9970$	$F_{aR} = 12,6$

Коефіцієнт насичення

$$k_Z = \frac{F_{\delta} + F_{ZS} + F_{ZR}}{F_{\delta}} = \frac{276 + 31 + 7,36}{276} = 1,14.$$

Наповнене значення мало відрізняється від прийнятого $k_Z = 1,1$, тому перерахунку не робимо.

Намагнічуюча сила магнітного ланцюга

$$\begin{aligned} F_{\text{цепи}} &= F_{\delta} + F_{ZS} + F_{aS} + F_{ZR} + F_{aR} = \\ &= 276 + 31 + 69,5 + 7,36 + 12,6 = 396,46 \text{ А.} \end{aligned}$$

Намагнічуючий струм

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\text{цепи}}}{0,9m\omega_S k_0} = \frac{1 \cdot 396,46}{0,9 \cdot 2 \cdot 992 \cdot 0,906} = 0,245 \text{ А.}$$

Індуктивний опір, що відповідає потоку в повітряному зазорі,

$$x_{mA} = \frac{k_E U_H}{I_{\mu}} = \frac{0,9 \cdot 220}{0,245} = 805 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт k_E перевіряємо за допомогою векторної діаграми за попереднім значенням струму I_{HA} , розрахованим параметрам r_{SA} і x_{SA} і $\cos \varphi = 0,92$ за рис. 2-17. Згідно з векторною діаграмою $k_E = 0,88$, що мало відрізняється від раніше обраного значення.

4.3. Розрахунок номінального режиму

Вихідні параметри схеми заміщення головної фази:

$$r_{SA} = 109,5 \text{ ом; } x_{SA} = 43,7 \text{ ом; } x_{mA} = 805 \text{ Ом.}$$

Наведений активний опір ротора

$$r_{RA} = \frac{r_9 4m\omega_{SA}^2 k_{oA}}{Z_R k_{CK}^2} = \frac{0,945 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 2 \cdot 992^2 \cdot 0,906^2}{15 \cdot 0,99^2} = 41 \text{ Ом.}$$

Наведений реактивний опір ротора

$$x_{RA} = x_S \frac{\Sigma \lambda'_R}{\Sigma \lambda_S} = 43,7 \cdot \frac{4,48}{5,95} = 32,9 \text{ Ом,}$$

Де

$$\Sigma \lambda'_R = \Sigma \lambda_R \frac{l_R}{l} \cdot \frac{Z_S}{Z_R} \left(\frac{k_{oA}}{k_{oR}} \right)^2 = 4,29 \cdot \frac{4,18}{3,8 \cdot 15} \left(\frac{0,9}{0,99} \right)^2 = 4,48.$$

Номінальне ковзання приймаємо $s_H = 0,03$. Розраховуємо коефіцієнти α та β для опорів розгалуження:

$$\alpha = \frac{r_{RA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{41}{805 + 32,9} = 0,049$$

$$\beta = \frac{x_{mA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{805}{805 + 32,9} = 0,962$$

Активний опір розгалуження

$$r'_{RA1} = \frac{\alpha \beta x_{mA} s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{0,049 \cdot 0,962 \cdot 805 \cdot 0,03}{24 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}} = 345 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір розгалуження

$$x'_{RA1} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \alpha + s^2}{\alpha^2 + s^2} =$$

$$= 0,962 \cdot 32,9 \frac{\frac{41}{32,9} \cdot 0,049 + 0,03^2}{24 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}} = 593 \text{ Ом.}$$

Повний опір головної фази

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r'_{RA1}) + j(x_{SA} + x'_{RA1}) =: (109,5 + 345) +$$

$$+ j(43,7 + 593) = 454,5 + j636,7; Z_{A1} = 784 \text{ Ом.}$$

Струм у головній обмотці без урахування втрат у сталі

$$I_{A1} = \frac{\dot{U}_H}{Z_{A1}} = \frac{220}{454 + j636,7} = 0,163 - j0,229;$$

$$I_{A1} = I_{HA} = 0,28 \text{ А.}$$

Повний опір розгалуження

$$Z'_{RA1} = 345 + j593; z'_{RA1} = 685 \text{ Ом.}$$

Електрорушійна сила

$$E_1 = I_{A1} z'_{RA1} = 0,28 \cdot 685 = 192 \text{ В.}$$

Електромагнітна потужність

$$P_\vartheta = m i_{A1}^2 r'_{RA1} = 2 \cdot 0,28^2 \cdot 345 = 53,8 \text{ Вт.}$$

Повна механічна потужність на валу двигуна

$$P'_R = P_\vartheta (1 - s) = 53,8 \cdot 0,97 = 52 \text{ Вт.}$$

Корисна механічна потужність на валу

$$P_R = P'_R - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}} = 52 - 3,5 = 48,5 \text{ Вт.}$$

Приймаємо

$$P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} = 3,5 \text{ Вт.}$$

Корисний момент

$$M = \frac{P_R \cdot 10^{+5}}{1,028n} = \frac{48,5 \cdot 10^{+5}}{1,028 \cdot 2910} = 1620 \text{ Г} \cdot \text{См.}$$

4.4 Втрати в сталі

Втрати в сталі статора

$$P_{cs1} = P_{cs} \left(\frac{E_1}{k_E U_H} \right)^2 = 5,85 \left(\frac{192}{176} \right)^2 = 6,96 \text{ Вт.}$$

Втрати в сталі ротора

$$P_{CR1} = P_{CR} \left(\frac{E_1}{k_E U_H} \right)^2 s^{1,3} = 1,89 \cdot 1,19 \cdot 0,03^{1,3} = 0,0236 \text{ Вт},$$

де P_{CR} беруть для

$$k_E U_H = 0,8 \cdot 220 = 176 \text{ В}.$$

Сумарні втрати у сталі

$$P_c = P_{CS1} + P_{CR1} = 6,96 + 0,024 = 6,98 \text{ Вт}.$$

Струм втрат у сталі

$$I_c = \frac{P_{CS1} + P_{CR1}}{2E_1} = \frac{6,98}{2 \cdot 192} = 0,0182 \text{ А}.$$

Струм в головній обмотці з урахуванням втрат в сталі

$$\dot{I}_{SA} = I'_{SA} + jI''_{SA} = (0,163 + 0,018) - j0,229 = 0,181 - j0,229$$
$$I_{SA} = 0,292 \text{ а}.$$

Щільність струму в головній обмотці

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{s_A} = \frac{0,292}{0,0573} = 5,1 \text{ а/мм}^2$$

Коефіцієнт потужності головної фази

$$\cos \varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}} = \frac{0,181}{0,292} = 0,62$$

Втрати в обмотці статора

$$P_{MS} = 2I_{SA}^2 r_{SA} = 2 \cdot 0,292^2 \cdot 109,5 = 18,7 \text{ Вт}$$

Споживана потужність

$$P_S = P_\Sigma + P_{MS} + P_c = 53,8 + 18,7 + 6,98 = 79,48 \text{ Вт}.$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{48,5}{79,48} = 0,61$$

4.5 Розрахунок допоміжної обмотки

Розраховуємо допоміжну обмотку з умови отримання кругового поля в номінальному режимі.

Коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} = \frac{636,7}{454,5} = 1,4$$

Ємність у допоміжній обмотці

$$x_{c\phi} = k^2 x_{A1} + k r_{A1} = 1,42 \cdot 636,7 + 1,4 \cdot 454,5 = 1888 \text{ ом};$$

$$C_p = \frac{10^6}{2\pi f x_{c\phi}} = \frac{10^6}{314 \cdot 1888} = 1,69 \text{ мкф}.$$

Беремо найближчий за ємністю конденсатор $C_p = 2 \text{ мкф}$; тоді

$$x_{C_p} = \frac{10^6}{2\pi f C_p} = \frac{10^6}{314 \cdot 2} = 1590 \text{ Ом}.$$

Кількість витків допоміжної обмотки

$$w_B = k w_A = 1,4992 = 1390$$

Приймаючи $k = t$, визначаємо переріз проводу допоміжної обмотки.

$$S'_B = \frac{S_A}{t} = \frac{0,0573}{1,4} = 0,041 \text{ мм}^2.$$

Найближчий стандартний переріз $S_B = 0,0415 \text{ мм}^2$.

Діаметр проводу $d_{\text{гол}} = 0,23 \text{ мм}; d_{\text{из}} = 0,28 \text{ мм}$

Активний опір

$$r_{SB} = k^2 r_{SA} \frac{S'_B}{S_B} = 1,4^2 \cdot 109,5 \frac{0,041}{0,0415} = 212 \text{ ом}.$$

Повний опір допоміжної фази

$$\begin{aligned} Z'_{B1} &= (k^2 r_{A1} + r_C) + j(k^2 x_{A1} - x_{Cp}) = \\ &= 1,4^2 \cdot 454,5 + j(1,4^2 \cdot 636,7 - 1590) = 890 - j340. \end{aligned}$$

Оскільки через округлення величини робочої ємності ми дещо відступили від умов отримання кругового поля, уточнюємо номінальний режим за формулами для загального випадку еліптичного обертового поля.

Опори розгалуження головної фази оберненої послідовності

$$r'_{RA2} = \frac{\alpha \beta x_{mA}(2-s)}{\alpha^2 + (2-s)^2} = \frac{0,049 \cdot 0,962 \cdot 805 \cdot 1,97}{0,049^2 + 1,97^2} = 19,1 \text{ Ом};$$

$$x'_{RA2} = \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \alpha + (2-s)^2}{\alpha^2 + (2-s)^2} =$$

$$= 0,962 \cdot 32,9 \frac{32,9 \cdot 0,049 + 1,97^2}{0,049^2 + 1,97^2} = 32,1 \text{ Ом};$$

$$Z'_{RA2} = r'_{RA2} + jx'_{RA2} = 19,1 + j32,1;$$

$$Z_{RA2} = 37,4 \text{ Ом.}$$

Повний опір головної фази оберненої послідовності

$$Z_{A2} = (r_{SA} + r'_{RA2}) + j(x_{SA} + x'_{RA2}) =$$

$$= (109,5 + 19,2) + j(43,7 + 32,1) = 128,7 + j75,8 \text{ ом.}$$

Повні опори допоміжної фази прямої та оберненої послідовностей

$$Z_{B1} = k^2 r_{A1} + j(k^2 x_{A1} - x_C) =$$

$$= 1,4^2 \cdot 454,5 + j(1,4^2 \cdot 636,7 - 1590) = 890 - j340 \text{ Ом};$$

$$Z_{B2} = k^2 r_{A2} + j(k^2 x_{A2} - x_C) =$$

$$= 1,4^2 \cdot 128,7 + j(1,4^2 \cdot 75,8 - 1590) = 252 - j1441 \text{ Ом.}$$

Складові струму статора прямої та оберненої послідовностей головної фази

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U}_H \frac{Z_{B2} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$

$$= 220 \frac{252 - j1441 - j1,4(128,7 + j75,8)}{(454,5 + j636,7)(252 - j1441) + (128,7 + j75,8)(890 - j340)} =$$

$$= 0,163 - j0,238$$

$$I_{A1} = 0,289 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U}_H \frac{Z_{B1} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}Z_{B2} + Z_{A2}Z_{B1}} =$$

$$= 220 \frac{890 - j340 + j1,4(454,5 + j636,7)}{(454,5 + j636,7)(252 - j1441) + (128,7 + j75,8)(890 - j340)} =$$

$$= -0,0191 + j0,0478$$

$$I_{A2} = 0,0575 \text{ A}$$

Струм статора головної фази без урахування втрат у сталі

$$I_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = 0,163 - j0,238 - 0,0191 + j0,0478 = 0,144 - j0,19;$$

$$I_A = 0,245 \text{ A.}$$

Втрати в сталі від поля прямої послідовності

$$E_1 == I_{A1} z'_{RA1} = 0,289 \cdot 685 = 198b$$

$$P_{cS1} = P'_{cS} \left(\frac{E_1}{U_H k_E} \right)^2 = 5,85 \left(\frac{198}{220 \cdot 0,8} \right)^2 = 7,4 \text{ Вт};$$

$$P_{cR1} = P'_{cR} \left(\frac{E_1}{U_H k_E} \right)^2 s^{1,3} = 1,89 \left(\frac{198}{220 \cdot 0,8} \right)^2 \cdot 0,03^{1,3} = 0,025 \text{ Вт};$$

$$P_{cl} = P_{cS1} + P_{cR1} = 7,4 + 0,025 = 7,425 \text{ Вт}.$$

Додатковий струм від втрат у сталі прямої послідовності

$$I_{cl} = \frac{P_{cl}}{2E_1} = \frac{7,425}{2 \cdot 198} = 0,019 \text{ А}$$

Втрати в сталі від поля оберненої послідовності

$$E_2 == I_{A2} z'_{RA2} = 0,0515 \cdot 37,4 = 1,92$$

$$P_{cS2} = P'_{cS} \left(\frac{E_2}{U_H k_E} \right)^2 = 5,85 \left(\frac{1,92}{176} \right)^2 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

$$P_{cR2} = P'_{cR} \left(\frac{E_2}{U_H k_E} \right)^2 s^{1,3} = 1,89 \left(\frac{1,92}{176} \right)^2 0,03^{1,3} = 2,36 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

$$P_{c2} = P_{cS2} + P_{cR2} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

Додатковий струм від втрат у сталі оберненої послідовності

$$I_{c2} = \frac{P_{c2}}{2E_2} = \frac{7 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,92} = 0,0002 \text{ А}$$

Струми статора з урахуванням втрат у сталі

$$\dot{I}_{SA1} = (I'_{A1} + I_{cl}) + jI''_{A1} = (0,163 + 0,019) - j0,238 = 0,182 - j0,238$$

$$\dot{I}_{SA2} = (I'_{A2} + I_{c2}) + jI''_{A2} = (-0,0191 + 0,0002) + j0,0478 = -0,0189 + j0,0478$$

$$\dot{I}_{SA} = \dot{I}_{SA1} + \dot{I}_{SA2} = 0,182 - j0,238 - 0,0189 + j0,0478 = 0,163 - j0,19$$

$$I_{SA} = 0,249a;$$

$$\dot{I}_{SB1} = j \frac{\dot{I}_{A1}}{k} + \frac{I_{c1}}{k} = j \frac{0,163 - j0,238}{1,4} + \frac{0,019}{1,4} = 0,184 + j0,117;$$

$$\dot{I}_{SB2} = -j \frac{\dot{I}_{A2}}{k} + \frac{I_{c2}}{k} =$$

$$\dot{I}_{SB} = \dot{I}_{SB1} + \dot{I}_{SB2} = 0,184 + j0,117 + 0,0344 + j0,0136 = 0,218 + j0,131;$$

$$I_{SB} = 0,247.$$

Густини струму в головній та допоміжній обмотках

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{S_A} = \frac{0,249}{0,0573} = 4,35 \text{ A/mm}^2$$
$$\Delta_B = \frac{I_{SB}}{S_B} = \frac{0,247}{0,0415} = 5,96 \text{ A/mm}^2$$

Повний струм мережі

$$\dot{I}_S = \dot{I}_{SA} + \dot{I}_{SB} = 0,163 - j0,19 + 0,218 + j0,131 = 0,381 - j0,059$$
$$I_S = 0,386 \text{ A.}$$

Електромагнітна потужність

$$P_\Sigma = 2I_{A1}^2 r'_{RA1} - 2I_{A2}^2 r'_{RA2} =$$
$$= 2 \cdot 0,2892 \cdot 315 - 2 \cdot 0,0575^2 \cdot 19,2 = 57,5 - 0,102 = 57,4 \text{ Вт}$$

Повна механічна потужність на валу

$$P'_R = P_\Sigma (1 - s) = 57,4(1 - 0,03) = 56,6 \text{ Вт}$$

Корисна механічна потужність на валу

$$P_R = P'_R - P_{\text{Мех}} - P_d = 56,6 - 3,5 = 53,1 \text{ Вт}$$

Корисний момент

$$M = \frac{P_R \cdot 10^5}{1,028n} = \frac{53,1 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 2910} = 1780 \text{ Г} \cdot \text{Вт}$$

Втрати в міді статора

$$P_{MS} = I_{SA}^2 r_{SA} + I_{SB}^2 r_{SB} =$$
$$= 0,249^2 \cdot 109,5 + 0,247^2 \cdot 212 = 19,74 \text{ Вт.}$$

Втрати в міді ротора

$$P_{MR} = 2I_{A1}^2 r'_{RA1} s + 2I_{A2}^2 r'_{RA2} (2 - s) =$$
$$= 2 \cdot 0,289^2 \cdot 345 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,052^2 \cdot 19,1 \cdot 0,97 = 1,83 \text{ Вт.}$$

Енергоспоживання

$$P_S = P'_R + P_{MS} + P_{MR} + P_c =$$
$$= 56,6 + 19,74 + 1,83 + 7,43 = 85,6 \text{ Вт.}$$

Сума втрат

$$\begin{aligned}\Sigma P &= P_{MS} + P_{MR} + P_c + P_{\text{мех}} + P_d = \\ &= 19,74 + 1,83 + 7,43 + 3,5 = 32,5 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

Ефективність

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_s} = 1 - \frac{32,5}{85,6} = 0,62.$$

Коефіцієнт потужності основної фази

$$\cos \varphi_A = \frac{I'_{SA}}{I_{SA}} = \frac{0,163}{0,249} = 0,655.$$

Коефіцієнт потужності допоміжної фази

$$\cos \varphi_B = \frac{I'_{SB}}{I_{SB}} = \frac{0,218}{0,247} = 0,88$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{I'_S}{I_S} = \frac{0,381}{0,386} = 0,987$$

Напруга допоміжної обмотки

$$\begin{aligned}\dot{U}_{B1} &= \dot{I}_{SB1}(Z_{B1} - Z_C) = \\ &= (0,184 + j0,117)(890 + j1250) = 18 + j334; \\ \dot{U}_{B2} &= \dot{I}_{SB2}(Z_{B2} - Z_C) = \\ &= (0,0344 + j0,0136)(252 + j149) = 6,63 + j8,54; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} = 18 + j334 + 6,63 + j8,54 = 24,6 + j342,5; \\ U_B &= 344 \text{ В.}\end{aligned}$$

Напруга конденсатора

$$\begin{aligned}\dot{U}_C &= \dot{I}_{SB} Z_C = -(0,218 + j0,131)j1590 = 208 - j347 \\ U_C &= 405\end{aligned}$$

Ми обираємо робочий конденсатор MBGCH-2-500-2GI.

Рис. На рисунку 4.2 показано векторну діаграму мотора конденсатора в номінальному режимі. Округлення значення робочої ємності призводило до певного порушення умов кругового поля (часовий зсув струмів і напруг у фазах і відхиляється від , а відношення струмів відрізняється від значення коефіцієнта перетворення).

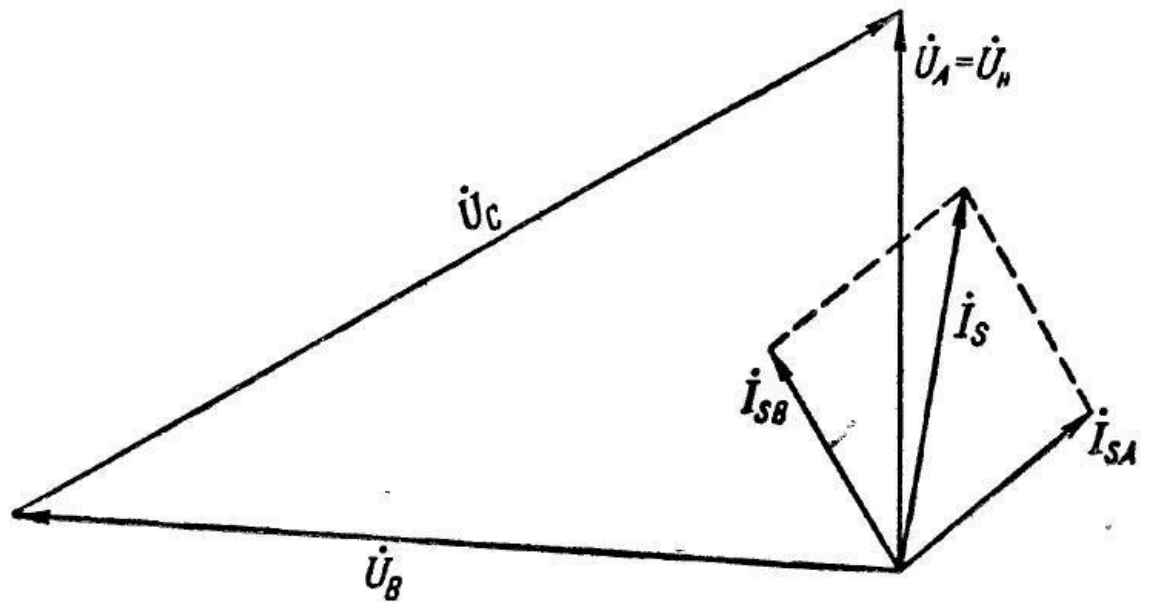


Рис. 4.2. Векторна схема конденсаторного двигуна з постійно увімкненою ємністю (номінальний режим).

Оскільки отриманий ступінь еліптичності малий, вплив оберненого поля в номінальному режимі можна ігнорувати на практиці.

4.6 Розрахунок пускового режиму

Параметри основної схеми заміни обмотки:

$$\begin{aligned}
 r'_{RAK} &= \frac{\alpha \beta x_{mA}}{\alpha^2 + 1} = \frac{0,049 \cdot 0,962 \cdot 805}{0,049^2 + 1} = 38 \text{ } \Omega; \\
 x'_{RAK} &= \beta x_{RA} \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \alpha + 1}{\alpha^2 + 1} = \\
 &= 0,962 \cdot 32,9 \frac{\frac{41}{32,9} \cdot 0,049 + 1}{0,049^2 + 1} = 33,6 \text{ } \Omega; \\
 Z_{AK} &= (r_{SA} + r'_{RAK}) + j(x_{SA} + x'_{RAK}) = \\
 &= (109,5 + 38) + j(43,7 + 33,6) = 147,5 + j77,3; \\
 Z_{BK} &= k^2(r_{AK} + r_C) + j(k^2 x_{AK} - x_C) = \\
 &= 1,4^2(147,5 + 0) + j(1,4^2 \cdot 77,3 - 1590) = 289 - j1438.
 \end{aligned}$$

Прямі послідовні струми основної обмотки:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AK1} &= \frac{\dot{U}_H}{2} \left(\frac{1}{Z_{AK}} - \frac{jk}{Z_{BK}} \right) = \\ &= \frac{220}{2} \left(\frac{1}{147,5 + j77,3} - \frac{j1,4}{289 - j1438} \right) = 0,695 - j0,329; \\ I_{AK1} &= 0,77a; \\ \dot{I}_{AK2} &= \frac{\dot{U}_H}{2} \left(\frac{1}{Z_{AK}} + \frac{jk}{Z_{BK}} \right) = \\ &= \frac{220}{2} \left(\frac{1}{147,5 + j77,3} + \frac{j1,4}{289 - j1438} \right) = 0,481 - j0,287; \\ I_{AK2} &= 0,56a. \end{aligned}$$

Загальний основний обмотковий струм

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AK} &= \dot{I}_{AK1} + \dot{I}_{AK2} = (0,695 - j0,329) + \\ &+ (0,481 - j0,287) = 1,176 - j0,616; \\ I_{AK} &= 1,33a. \end{aligned}$$

Повний допоміжний струм обмотки

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BK} &= I'_{BK} + jI''_{BK} = j \frac{\dot{I}_{AK1}}{k} - j \frac{\dot{I}_{AK2}}{k} = \\ &= j \frac{0,695 - j0,329}{1,4} - j \frac{0,481 - j0,287}{1,4} = 0,031 + j0,151. \\ I_{BK} &= 0,153a. \end{aligned}$$

Густина струму в обмотці ока

$$\Delta_{AK} = \frac{I_{AK}}{s_A} = \frac{1,33}{0,0573} = 23,2a/mm^2$$

Коефіцієнт потужності основної фази

$$\cos \varphi_{AK} = \frac{I'_{AK}}{I_{AK}} = \frac{1,176}{1,335} = 0,885.$$

Густина струму в допоміжній обмотці

$$\Delta_{BK} = \frac{I_{BK}}{s_B} = \frac{0,153}{0,0415} = 3,7a/mm^2$$

Коефіцієнт потужності допоміжної фази

$$\cos \varphi_{BK} = \frac{I'_{BK}}{I_{BK}} = \frac{0,031}{0,153} = 0,203$$

Повний пусковий струм

$$\begin{aligned} \dot{I}_K &= \dot{I}_{AK} + \dot{I}_{BK} = (1,176 - j0,616) + \\ &+ (0,031 + j0,151) = 1,21 - j0,465 \\ I_K &= 1,295a. \end{aligned}$$

Кратність пускового струму

$$i_K = \frac{I_K}{I_H} = \frac{1,295}{0,386} = 3,35.$$

Повний коефіцієнт потужності при запуску

$$\cos \varphi_K = \frac{I'_K}{I_K} = \frac{1,21}{1,295} = 0,935$$

Електромагнітна енергія пускового режиму

$$P_{\text{эк}} = mr'_{RAK} (I_{AK1}^2 - I_{AK2}^2) = 2 \cdot 40 (0,77^2 - 0,562) = 22,5 \text{ Bm}.$$

Пусковий крутний момент

$$M_K = \frac{P_{\text{эК}} \cdot 10^5}{1,028 n_c} = - \frac{22,5 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 3000} = 730 \text{ Г} \cdot \text{см}.$$

Кратність Пусковий мультиплікатор крутного моменту

$$m_K = \frac{M_K}{M_H} = \frac{730}{1780} = 0,41.$$

Споживання енергії при запуску

$$P_{SK} = U_H I_K \cos \varphi_K = 220 \cdot 1,295 \cdot 0,935 = 265 \text{ см}.$$

Напруга допоміжної обмотки при запуску

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BK} \dot{I}_{BK} (Z'_{BK} - Z_C) &= (0,031 + j0,151) \times \\ \times (268 - j1472 + j1590) &= -9,45 + j44,16; \\ U_{BK} &= 45 \end{aligned}$$

Напруга конденсатора

$$\begin{aligned} \dot{U}_C = \dot{I}_{BK} Z_C &= -(0,031 + j0,151) j1590 = 242 - j39,3; \\ \zeta_C &= 246 \text{ в}. \end{aligned}$$

Таким чином розробляється двигун конденсатора з постійно ввімкненою ємністю, який містить такі номінальні дані:

$$P_H = 53,1 \text{ Вт}; n_H = 2910 \text{ об/мин}; I_H = 3,386 \text{ А}; \\ \cos \varphi = 0,987; \eta = 0,62.$$

Оскільки двигун має лише одну робочу потужність $C_p = 2 \text{ мк}$, його стартовий крутний момент невеликий. Кратність пускового моменту становить $m_K = 0,41$, кратність пускового струму $-i_K = 3,35$.

4.7. Тепловий розрахунок закритого асинхронного мікродвигуна

Тепловий розрахунок проводиться методом теплової схеми заміщення.

Двигун - закритий, що обдувається.

Вихідні дані - геометричні розміри в сантиметрах:

Геометричні розміри та дані серійного двигуна наведено нижче

$$D_a = 10,2; l_s = 4,6; D = 6; \delta = 0,025; \\ D_K = 12,37; l_{\text{кор}} = 19,6; D_{B1} = 11,6; \\ D_{B2} = 5,6; d_1 = 0,75; d_2 = 0,53; \\ h_{zs} = 1,2; \delta' = 0,005.$$

Середня ширина зубця статора ; висота спинки

$$b_{zp} = 0,35 h_{as} = 0,9$$

статора.

Обмотка статора виконана дротом ПЕВ-2 діаметром ($d_{\text{гол}} = 0,31 \text{ мм}; d_{\text{из}} = 0,36 \text{ мм}$).

Ізоляція паза - електрокартон на сторону. Листи статора ізолювані лаком; коефіцієнт заповнення пакета сталлю. Число зубців

$$0,3 \text{ мм}; k_c = 0,93; Z_s = 24$$

статора.

Втрати: у міді статора; у сталі; механічні (без вентилятора); в обмотці ротора; додаткові; сума втрат.

$$P_{mS} = 428 \text{ мВт}; P_c = 20,28 \text{ мВт}; P_{\text{мех}} = 5,5 \text{ мВт}; P_{MR} = 17,5 \text{ мВт}; P_{\text{доб}} = 0,9 \text{ мВт}; \Sigma P = 91,5 \text{ мВт}$$

Опір ізоляції провідників у пазу

$$n_1 = \frac{d_1 + d_2}{4d_{\text{из}}} = \frac{0,75 + 0,53}{4 \cdot 0,036} = 8,9;$$

$$n_2 = \frac{h_{zs}}{2d_{\text{из}}} = \frac{1,2}{2 \cdot 0,036} = 17;$$

$$\delta'_1 = \delta'(n_1 - 1) + \frac{\delta'}{2} = 0,005(8,9 - 1) + \frac{0,005}{2} = 0,042 \text{ см};$$

$$\delta'_2 = \delta'(n_2 - 1) + \frac{\delta'}{2} = 0,005(17 - 1) + \frac{0,005}{2} = 0,0825 \text{ см};$$

$$\delta_3 = \frac{\delta'_1 \delta'_2}{2\delta'_2 + \delta'_1} = \frac{0,042 \cdot 0,0825}{2 \cdot 0,0825 + 0,042} = 0,0167 \text{ см};$$

$$l_1 = lk_c = 4,6 \cdot 0,93 = 4,28 \text{ см};$$

$$\Pi = d_1 + 2h_1 = 0,75 + 2 \cdot 1,2 = 3,15 \text{ см};$$

$$R_{\text{из}} = \frac{\delta_3}{Z_s l_1 \Pi k_c} = \frac{0,0167}{24 \cdot 4,28 \cdot 3,15 \cdot 0,0004} = 0,129 \text{ град/Вт}.$$

Опір пазової ізоляції

$$R_{\Pi} = \frac{\delta_{\Pi}}{Z_s \Pi l_1 k'_{t2}} = \frac{0,03}{24 \cdot 4,28 \cdot 3,15 \cdot 0,0005} = 0,1852 \text{ град/Вт}.$$

Опір спинки статора

$$R_c = \frac{h_{as}}{S_{as} k_{Fe}} = \frac{0,9}{125 \cdot 0,58} = 0,01242 \text{ град/Вт},$$

де

$$S_{as} = \pi D_{al} l_1 = \pi \cdot 9,3 \cdot 4,28 = 125 \text{ см}^2;$$

$$D_{al} = \frac{D_a + D + 2h_{zs}}{2} = \frac{10,2 + 6 + 2 \cdot 1,2}{2} = 9,3 \text{ см}.$$

Опір зубцевого шару статора

$$R_z = \frac{h_{zs}}{S_z k_{Fe}} = \frac{1,2}{35,9 \cdot 0,58} = 0,0577$$

де

$$S_z = Z_s b_{zcp} l_1 = 24 \cdot 0,35 \cdot 4,28 = 35,9 \text{ см}^2$$

Опір зубцевого шару для втрат міді статора

$$R_{zM} = R_z \frac{2h_{zs}}{\Pi} = 0,0577 \frac{2 \cdot 1,2}{3,15} = 0,044 \text{ град/Вт.}$$

Опір зазору

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{S_{\delta} k_{tb}} = \frac{0,025}{86,7 \cdot 0,00023} = 1,25 \text{ град/Вт,}$$

$$S_{\delta} = \pi D l = \pi \cdot 6,0 \cdot 4,6 = 86,7 \text{ см}^2$$

де.

Опір ротора приймаємо $R_R = 0,5$ град/Вт.

Опір підшипникового щита приймаємо

$$R_{щ} = 0,0012 \text{ град/Вт.}$$

Визначення потенціалів „генераторів“ див. 12-16.

Потенціал „генератора втрат у сталі статора“

$$V_c = 0,5 P_c (R_c + R_z) = 0,5 \cdot 20,2 (0,0124 + 0,0577) = 0,71^{\circ}\text{C}$$

Потенціал „генератора втрат у міді статора“

$$V_{MS} = (P_{MS} + 0,5 P_{доб}) R_{из} = (42 + 0,5 \cdot 0,9) \cdot 0,129 = 5,5^{\circ}\text{C}$$

Потенціал "генератора втрат у роторі"

$$V_R = (P_{MR} + P_{Mex} + 0,5 P_{доб}) R_R =$$

$$= (17,5 + 5,5 + 0,5 \cdot 0,9) \cdot 0,5 = 11,7^{\circ}\text{C.}$$

Розрахунок температури корпусу.

$$t_{окр} = 25^{\circ}\text{C}$$

Навколишня

температура.

Приблизне перевищення температури корпусу

$$\theta'_{ск} = \frac{\Sigma P}{S_{кор} k_s k_1} = \frac{91,5}{1000 \cdot 7,9 \cdot 1,97 \cdot 10^{-3}} \approx 6^{\circ}\text{C}$$

де

$$S_{\text{кор}} = \frac{\pi D_{\text{кор}}^2}{2} + \pi D_{\text{кор}} l_{\text{кор}} = \frac{\pi \cdot 12,37^2}{2} + \pi 12,37 \cdot 19,6 = 1000 \text{ см}^2;$$

$$k_1 = 0,56 \cdot 10^{-3} D_{\text{кор}}^{0,5} = 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot 12,37^{0,5} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град};$$

$$k_s = \frac{7,06}{k_{I1}} \cdot 10^{-4} n(D_{\text{в}1} - D_{\text{в}2}) =$$

$$= \frac{7,06}{1,5} \cdot 10^{-4} \cdot 2800(11,6 - 5,6) = 7,9;$$

$$k_{n1} = 1,5 \text{ для } 2p = 2.$$

$$P_{\text{л}} = 1,63 k_{\text{изл}} S_{\text{кор}} D_{\text{кор}}^{0,5} \left[\left(\frac{t_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{t_1}{1000} \right)^4 \right] =$$

$$= 1,63 \cdot 0,9 \cdot 1000 \cdot 12,37^{0,5} \left[\left(\frac{304}{1000} \right)^4 - \left(\frac{298}{1000} \right)^4 \right] = 3,41 \text{ см},$$

де (сірий колір); $k_{\text{изл}} = 0,9$

$$t_1 = 273 + t_{\text{окр}} = 273 + 25 = 298^\circ \text{K}$$

$$t_2 = t_1 + \theta'_{\text{ск}} = 298 + 6 = 304^\circ \text{K}.$$

Тепло, що розсіюється шляхом конвекції,

$$P_{\text{К}} = \Sigma P - P_{\text{л}} = 91,5 - 3,41 = 88,09.$$

Середнє перевищення температури корпусу

$$\theta_{\text{ск}} = \left(\frac{5360 k_{n2} P_{\text{К}}}{S_{\text{кор}} k_s D_{\text{кор}}^{3,5}} \right)^{0,8} = \left(\frac{5360 \cdot 0,87 \cdot 88,09}{1000 \cdot 7,9 \cdot 12,37^{0,5}} \right)^{0,8} = 8,65^\circ \text{C}.$$

Оскільки відповідає попередньо прийнятому значенню, то робимо друге наближення. Приймаємо; тоді випромінюване тепло може бути розраховане при

$$\theta_{\text{ск}} = 8,65 \theta'_{\text{ск}} = 6^\circ \theta''_{\text{ск}} = 8,4^\circ t_1 = 298^\circ \text{C} t_2 = t_1 + \theta''_{\text{ск}} = 298 + 8,4 = 306,4^\circ \text{C}$$

$$P_{\text{л}} = 1,63 k_{\text{изл}} S_{\text{кор}} D_{\text{кор}}^{0,5} \left[\left(\frac{t_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{t_1}{1000} \right)^4 \right] =$$

$$= 1,63 \cdot 0,9 \cdot 1000 \cdot 12,37^{0,5} \left[\left(\frac{306,4}{1000} \right)^4 - \left(\frac{298}{1000} \right)^4 \right] = 4,65 \text{ Вт}.$$

Тепло, що розсіюється шляхом конвекції,

$$P_K = \Sigma P - P_{\text{л}} = 91,5 - 4,65 = 86,85 \text{ см.}$$

Середнє перевищення температури корпусу

$$\theta_{\text{сК}} = \left(\frac{5360 k_{\text{н2}} P_K}{S_{\text{Коп}} k_s D_{\text{Коп}}^{0,5}} \right)^{0,8} = \left(\frac{5360 \cdot 0,87 \cdot 86,85}{1000 \cdot 7,9 \cdot 12,37^{0,5}} \right)^{0,8} = 8,6^\circ \text{C}.$$

Середня температура корпусу

$$t_{\text{сК}} = t_{\text{ОКр}} + \theta_{\text{сК}} = 25 + 8,6 = 33,6^\circ \text{C}.$$

Розрахункова температура корпусу

$$\begin{aligned} t_{\text{рК}} &= \theta_{\text{рК}} + t_{\text{оКр}} = 9,8 + 25 = 34,8^\circ \text{C}, \\ \theta_{\text{рК}} &= \theta_{\text{сК}} k_p = 8,6 \cdot 1,142 = 9,8^\circ \text{C}; \\ k_p &= 0,906 \left(\frac{l_{\text{Коп}}}{D_{\text{Коп}}} \right)^{0,5} = 0,906 \left(\frac{19,6}{12,37} \right)^{0,5} = 1,142. \end{aligned}$$

5. РОЗРАХУНОК ДВИГУНА BL-B250B-2C-D02-01 В MATHCAD

У даному розділі здійснюється програмна реалізація методики електромагнітного розрахунку асинхронного конденсаторного двигуна малої потужності, розробленої та обґрунтованої в попередніх розділах роботи. Метою цього етапу є формування універсальної обчислювальної моделі, яка дозволяє відтворювати повний електромагнітний розрахунок двигунів малої потужності на основі класичних методик, первинно орієнтованих на машини середньої та великої потужності з урахуванням електромагнітних навантажень для мікродвигунів.

Програмна модель, реалізована в середовищі Mathcad, об'єднує всі основні етапи розрахунку в єдину логічну послідовність: визначення геометричних параметрів магнітної системи, розрахунок магнітного кола, параметрів обмоток, струмів, втрат у сталі та міді, а також енергетичних і механічних характеристик двигуна. Такий підхід дозволяє не лише автоматизувати розрахунок конкретної машини, але й адаптувати методику до інших малопотужних двигунів шляхом зміни вихідних даних без перебудови всієї розрахункової схеми.

Особливістю запропонованої програмної реалізації є її орієнтація на електричні машини малої потужності, для яких суттєвими є відносно великі втрати в сталі, підвищений вплив повітряного зазору, технологічних особливостей магнітопроводу та параметрів конденсаторної обмотки. У зв'язку з цим у програмі передбачено можливість коригування ключових коефіцієнтів і параметрів, що дозволяє адекватно відобразити специфіку малопотужних асинхронних двигунів.

5.1 Технічне завдання

Таблиця – 5.1

№	Найменування параметра	Значення	Одиниці
1	Номінальна споживана потужність	240	Вт
2	Номінальна напруга живлення	115	В
3	Номінальна частота обертання ротора	2400	об/хв
4	Номінальна частота обертання ротора	40	об/с
5	Кількість пар полюсів	1	–
6	Частота мережі	50	Гц
7	Синхронна частота обертання	50	об/с
8	Кількість фаз	2	–
9	Споживаний струм	2.08696	А

10	Активний опір обмотки	55.10	Ом
11	Зовнішній діаметр магнітопроводу статора	68	мм
12	Зовнішній діаметр ротора	92	мм
13	Внутрішній діаметр магнітопроводу статора	68.4	мм
14	Діаметр вала ротора	20	мм
15	Повітряний зазор між статором і ротором	0.2	мм
16	Активна довжина магнітопроводу	42	мм
17	Кількість пазів статора	16	–
18	Кількість пазів ротора	22	–
19	Ширина зубця ротора	3.2	мм
20	Ширина зубця статора	4.3	мм
21	Ширина щілини ротора	1.0	мм
22	Ширина щілини статора	2.0	мм
23	Висота щілини ротора	1.2	мм
24	Висота щілини статора	0.9	мм
25	Глибина пазу ротора	4.2	мм
26	Глибина пазу статора	11.5	мм
27	Ширина пазу при основі ротора	7.8	мм
28	Ширина пазу при основі статора	5.6	мм
29	Ширина пазу при вершині ротора	7.4	мм
30	Ширина пазу при вершині статора	7.2	мм
31	Висота прямокутної частини пазу ротора	2.2	мм
32	Висота прямокутної частини пазу статора	4.6	мм
33	Висота ярма ротора	8.2	мм
34	Висота ярма статора	12.4	мм

5.2 Встановлення геометричних головних розмірів

Основні розміри машини відповідають розмірам магнітної системи базової двохполюсної машини, оскільки в якості прототипу магнітної системи вибрано саме цю машину

Зовнішній діаметр магнітопроводу статора, м

Зовнішній діаметр ротора, м

$$D_a = 68\text{мм} = 0.068 \cdot \text{м}$$

$$D_{RZ} = 92\text{мм} = 0.092 \cdot \text{м}$$

Внутрішній діаметр магнітопроводу статора, м

Внутрішній діаметр ротора, м

$$D_{RV} = 68.4\text{мм} = 0.0684 \cdot \text{м}$$

$$D = 20\text{мм} = 0.02 \cdot \text{м}$$

Проміжок між статором і ротором, м

$$\delta = \frac{(D_{RV} - D_a)}{2} = \frac{0.0684 - 0.068}{2} = 0.2 \cdot \text{мм}$$

Активна довжина магнітопроводу, м

$$l_\delta = 42\text{мм} = 0.042 \cdot \text{м}$$

Кількість зубців (пазів) статора

Кількість зубців (пазів) ротора

$$Z_1 = 16$$

$$Z_2 = 22$$

Розміри зубцево-пазової зони ротора, мм

Розміри зубцево-пазової зони статора, мм

Ширина зубця ротора

Ширина зубця статора

$$b_{RZ} = 3.2\text{мм} = 0.0032 \cdot \text{м}$$

$$b_{SZ} = 4.3\text{мм} = 0.0043 \cdot \text{м}$$

Ширина шліца ротора

Ширина шліца статора

$$b_{RH} = 1.0\text{мм}$$

$$b_{SH} = 2.0\text{мм}$$

Висота шліца ротора

Висота шліца статора

$$h_{RH} = 1.2\text{мм}$$

$$h_{SH} = 0.9\text{мм}$$

Глибина пазу ротора

Глибина пазу статора

$$h_{Rp} = 4.2\text{мм}$$

$$h_{Sp} = 11.5\text{мм}$$

Ширина пазу при основі ротора

Ширина пазу при основі статора

$$b_{R2} = 7.8\text{мм}$$

$$b_{S2} = 5.6\text{мм}$$

Ширина пазу при вершині ротора

Ширина пазу при вершині статора

$$b_{R1} = 7.4\text{мм}$$

$$b_{S1} = 7.2\text{мм}$$

Відстань між овалами пазу

Висота прямокутної частини пазу

$$h_{R1} = 2.2\text{мм}$$

$$h_{S1} = 4.6\text{мм}$$

Висота ярма статора

Висота ярма ротора

$$h_{aR} = 8.2\text{мм}$$

$$h_{aS} = 12.4\text{мм}$$

Споживаний струм

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{240}{115} = 2.08696 \cdot A$$

Площа перерізу паза під вкладання обмотки

$$S_{\Sigma} = 39.718\text{мм}^2 = 3.9718 \times 10^{-5} \cdot \text{м}$$

5.3 Визначення полюсних і зубцевих поділок

Полюсна поділка статора в метрах

$$\tau_S = \frac{\pi \cdot D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.068}{2 \cdot 1} = 0.10681 \cdot \text{м}$$

Полюсна поділка статора в зубцях

$$\tau_{S\tau 1} = \frac{Z_1}{2p} = \frac{16}{2 \cdot 1} = 8$$

Полюсна поділка ротора

$$\tau_R = \frac{\pi \cdot D_{RV}}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.0684}{2 \cdot 1} = 0.10744 \cdot \text{м}$$

Зубцева поділка статора

$$t_{1S} = \frac{\pi D_a}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0.068}{16} = 0.01335 \cdot m$$

Зубцева поділка ротора

$$t_R = \frac{\pi D_{RV}}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0.0684}{22} = 0.00977 \cdot m$$

Число пазів на полюс і фазу

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{16}{2 \cdot 1 \cdot 2} = 4$$

Уточнення обмотувального коефіцієнта

$$k_{o\phi} = \frac{0.707}{q \cdot \sin\left(\frac{\frac{\pi}{4}}{q}\right)} = \frac{0.707}{4 \cdot \sin\left(\frac{\frac{\pi}{4}}{4}\right)} = 0.90599$$

5.4 Попередній розрахунок магнітного потоку та індукції

Попереднє значення індукції у повітряному проміжку

$$B'_\delta = 0.337 Tл$$

Магнітний потік у повітряному проміжку (попередньо)

$$\Phi' = \alpha'_\delta \cdot \tau_S \cdot l_\delta \cdot B'_\delta = 0.665 \cdot 0.1068142 \cdot 0.042 \cdot 0.337 = 0.0010054 \cdot Bб$$

де коефіцієнт полюсного перекриття для двополюсних машин (1)

$$\alpha'_\delta = 0.665$$

5.5 Розрахунок обмотк статора

Кількість паралельних гілок

$$a = 1.0$$

Коефіцієнт форми поля (1)

$$k'_B = 1.11$$

Коефіцієнт відношення ЕРС до напруги (1)

$$k'_E = 0.9$$

Число послідовних витків у фазі

$$W'_1 = \frac{U_1 \cdot k'_E}{4 \cdot a \cdot k'_B \cdot f \cdot \Phi' \cdot k_{o\phi}} = \frac{115 \cdot 0.9}{4 \cdot 1 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 0.0010054 \cdot 0.9059906} = 511.839798$$

приймаємо

$$W_1 = 512$$

Число провідників у котушці

$$W'_A = \frac{W_1 \cdot a}{p \cdot q} = \frac{512 \cdot 1}{1 \cdot 4} = 128$$

приймаємо

$$W_A = 128$$

Попередній коефіцієнт заповнення пазу

$$k'_{zan} = 0.7$$

Попередньо визначаємо діаметр ізолюваного проводу

$$d_{изпрос} = \sqrt{\frac{k'_{zan} \cdot S_{\Sigma}}{W_A}} = \sqrt{\frac{0.7 \cdot 3.9718 \times 10^{-5}}{128}} = 0.46606 \cdot \text{мм}$$

Число елементарних провідників обмотки

$$n_{el} = 1.0$$

Обмотка статора виконується круглим дротом:

- діаметр дроту без ізоляції

$$d_{el} = 0.425 \text{ мм}$$

- діаметр ізолюваного дроту

$$d_{iz} = 0.465 \text{ мм}$$

- переріз елементарного провідника

$$S_{el} = 0.1419 \text{ мм}^2$$

- переріз ефективного провідника

$$S_{ef} = S_{el} \cdot n_{el} = 0.1419 \cdot 0.001^2 \cdot 1 = 0.1419 \cdot \text{мм}^2$$

Коефіцієнт заповнення пазу головної обмотки стататора

$$K_z = \frac{d_{iz}^2 \cdot n_{el} \cdot W_A}{S_{\Sigma}} = \frac{(0.465 \cdot 0.001)^2 \cdot 1 \cdot 128}{3.9718 \times 10^{-5}} = 0.69683$$

Густина струму в обмотці статора

$$J_1 = \frac{I_1}{a \cdot S_{\text{ел}} \cdot n_{\text{ел}}} = \frac{2.08696}{1 \cdot 0.1419 \cdot 0.001^2 \cdot 1} = 14.70723 \cdot \frac{A}{\text{мм}^2}$$

Уточнене значення магнітного потоку в повітряному проміжку

$$\Phi = \frac{U_1 \cdot k'_E}{4 \cdot a \cdot k'_B \cdot f \cdot W_1 \cdot k_{\text{об}}} = \frac{115 \cdot 0.9}{4 \cdot 1 \cdot 1.11 \cdot 50 \cdot 512 \cdot 0.9059906} = 0.0010051 \cdot \text{Вб}$$

Уточнене значення індукції в повітряному проміжку

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha'_\delta \cdot \tau_S \cdot l_\delta} = \frac{0.00101}{0.665 \cdot 0.10681 \cdot 0.042} = 0.33689 \cdot \text{Тл}$$

5.6 Розрахунок активного й індуктивного опорів обмотки статора

Довжина лобової частини обмотки статора

Емпіричний коефіцієнт для дво полюсної машини.

$$k_1 = 1.2$$

Прямолінійна частина вильоту лобової частини обмотки

$$B = 10 \text{ мм} = 0.01 \cdot \text{м}$$

Крок обмотки по пазам для шаблонової обмотки, яку використовують на підприємстві.

$$y = 8$$

$$L_S = k_1 \cdot \frac{\pi \cdot (D_a - h_{Sp})}{2p} \cdot \frac{y}{\tau_{S \pm l}} = 1.2 \cdot \frac{\pi \cdot (0.068 - 11.5 \cdot 0.001)}{2 \cdot 1} \cdot \frac{8}{8} = 106.49999 \cdot \text{мм}$$

Середня довжина піввитка

$$L_{SA} = L_S + l_\delta = 0.1065 + 0.042 = 0.1485 \cdot \text{м}$$

Загальна довжина провідника головної фази

$$L_A = 2 \cdot L_{SA} \cdot W_1 = 2 \cdot 0.1485 \cdot 512 = 152.06399 \cdot \text{м}$$

Питомий електричний опір міді

$$\rho_{Cu} = \frac{10^{-6}}{41} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 2.43902 \times 10^{-5} \cdot \text{Ом} \cdot \text{мм}$$

Активний опір обмотки статора, Ом

$$r_{SA} = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_A}{S_{ef} \cdot a} = 2.43902 \times 10^{-8} \cdot \frac{152.06399}{1.419 \times 10^{-7} \cdot 1} = 26.13726 \cdot \text{Ом}$$

Коефіцієнт пазового розсіювання для одношарової обмотки і овального пазу

$$\lambda_p = \frac{h_{SI}}{3 \cdot b_{SI}} \cdot k_{\beta 1} + \left(0.785 - \frac{b_{SH}}{2 \cdot b_{SI}} + \frac{h_{SH}}{b_{SH}} \right) \cdot k_{\beta 2} = \frac{4.6 \cdot 0.001}{3 \cdot 7.2 \cdot 0.001} \cdot 1 + \left(0.785 - \frac{2 \cdot 0.001}{2 \cdot 7.2 \cdot 0.001} + \frac{0.9 \cdot 0.001}{2 \cdot 0.001} \right) \cdot 1 = 1.30907$$

де коефіцієнти

$$k_{\beta 1} = 1.0$$

$$k_{\beta 2} = 1.0$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання для одношарової обмотки і овального пазу

коефіцієнт повітряного проміжку статора

$$k_{\delta S} = \frac{5 + \frac{b_{SH}}{\delta}}{5 + \frac{b_{SH}}{\delta} \cdot \frac{t_{IS} - b_{SH}}{t_{IS}}} = \frac{5 + \frac{2 \cdot 0.001}{0.0002}}{5 + \frac{2 \cdot 0.001}{0.0002} \cdot \frac{0.01335 - 2 \cdot 0.001}{0.01335}} = 1.11094$$

коефіцієнт повітряного проміжку ротора

$$k_{\delta R} = \frac{5 + \frac{b_{RH}}{\delta}}{5 + \frac{b_{RH}}{\delta} \cdot \frac{t_R - b_{RH}}{t_R}} = \frac{5 + \frac{1 \cdot 0.001}{0.0002}}{5 + \frac{1 \cdot 0.001}{0.0002} \cdot \frac{0.00977 - 1 \cdot 0.001}{0.00977}} = 1.05395$$

коефіцієнт повітряного проміжку

$$k_{\delta} = k_{\delta S} \cdot k_{\delta R} = 1.11094 \cdot 1.05395 = 1.17088$$

де коефіцієнт

$$\xi_S = 2 + 0.022 \cdot q^2 - k_{o\sigma}^2 \cdot (1 + \Delta_{ZI}) = 2 + 0.022 \cdot 4^2 - 0.90599^2 \cdot (1 + 0.07) = 1.47372$$

де коефіцієнт

$$\Delta_{ZI} = 0.07$$

$$\lambda_d = \frac{t_{IS}}{11.9 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi_S = \frac{0.01335}{11.9 \cdot 0.0002 \cdot 1.17088} \cdot 1.47372 = 7.061$$

Коефіцієнт лобового розсіювання для одношарової обмотки і овального пазу

$$\lambda_l = 0.27 \cdot \frac{q}{l_\delta} \cdot (L_S - 0.64 \cdot \tau_S) = 0.27 \cdot \frac{4}{0.042} \cdot (0.1065 - 0.64 \cdot 0.10681) = 0.98072$$

Коефіцієнт розсіяння обмотки статора

$$\Sigma \lambda_l = \lambda_p + \lambda_d + \lambda_l = 1.30907 + 7.061 + 0.98072 = 9.35079$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора

$$x_A = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_l}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot \Sigma \lambda_l = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.042}{1 \cdot 4} \cdot 9.35079 = 20.3331$$

де енергетичний коефіцієнт

$$\cos \varphi \cdot \eta = 0.48$$

Крок обмотки по пазах

$$y = \frac{Z_l}{2p} = \frac{16}{2 \cdot 1} = 8$$

Попереднє значення лінійного навантаження, А/м (звідки це значення)

$$A' = 25922.602 \frac{A}{m} = 25.9226 \cdot \frac{A}{mm}$$

Теплофактор, А²/м³ (звідки це значення)

$$(AJ) = 0.168 \cdot 10^{12} \frac{A^2}{m^3} = 168 \cdot \frac{A^2}{mm^3}$$

Густина струму в обмотці статора (попередньо), А/м²

$$J'_l = \frac{(AJ)}{A'} = \frac{1.68 \times 10^{11}}{25922.602} = 6.48083 \times 10^6 \cdot \frac{A}{m^2}$$

Переріз ефективного провідника (попередньо), м²

$$S'_{\text{эф}} = \frac{I_{lн}}{a \cdot J'_l} = \frac{2.08696}{1 \cdot 6.48083 \times 10^6} = 0.32202 \cdot mm^2$$

Площа поперечного перетину пазу для розміщення провідників, м²

$$S_p = 44 mm^2$$

5.7 Розрахунок активного й індуктивного опорів обмотки ротора

Питомий електричний опір алюмінію

$$\rho_{Al} = 0.04878 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} = 4.878 \times 10^{-8} \cdot \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}$$

Поперечний переріз стрижня ротора, м²

$$S_{st} = 18.67 \text{ мм}^2$$

Активний опір короткозамкненого стрижня, Ом

$$r_{st} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_{\delta}}{S_{st}} = 4.878 \times 10^{-8} \cdot \frac{0.042}{18.67 \cdot 0.001^2} = 0.00011 \cdot \text{Ом}$$

Розміри короткозамкненого кільця, м

$$d_{kl} = 74.0 \text{ мм} = 0.074 \cdot \text{м}$$

$$a_{kl} = 7.35 \text{ мм} = 0.00735 \cdot \text{м}$$

$$b_{kl} = 6.0 \text{ мм} = 0.006 \cdot \text{м}$$

Активний опір частини короткозамкненого кільця між стрижнями, Ом

$$r_{kl} = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot d_{kl}}{Z_2 \cdot a_{kl} \cdot b_{kl}} = 4.878 \times 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0.074}{22 \cdot 0.00735 \cdot 0.006} = 1.16886 \times 10^{-5} \cdot \text{Ом}$$

Коефіцієнт скосу

$$k_{ск} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right)}{\frac{\pi \cdot p}{Z_2}} = \text{sinc}\left(\frac{\pi \cdot 1}{22}\right) = 0.9966$$

Активний опір короткозамкненого кільця, Ом

$$r_R = \frac{4 \cdot m \cdot W_1^2 \cdot k_{об}^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2} \cdot \left(r_{st} + \frac{r_{kl}}{2 \cdot k_{ск}^2} \right) = \frac{4 \cdot 2 \cdot 512^2 \cdot 0.90599^2}{22 \cdot 0.9966^2} \cdot \left(0.00011 + \frac{1.16886 \times 10^{-5}}{2 \cdot 0.9966^2} \right) = 9.10836 \cdot \text{Ом}$$

Коефіцієнт пазового розсіяння обмотки ротора

$$\lambda_{pR} = \frac{h_{R1}}{3 \cdot b_{R1}} \cdot k_{\beta R1} + \left(\frac{h_{RH}}{b_{RH}} \right) \cdot k_{\beta R2} = \frac{2.2 \cdot 0.001}{3 \cdot 7.4 \cdot 0.001} \cdot 1 + \frac{1.2 \cdot 0.001}{1 \cdot 0.001} \cdot 1 = 1.2991$$

де коефіцієнти

$$k_{\beta R1} = 1.0$$

$$k_{\beta R2} = 1.0$$

Коефіцієнт диференціального розсіювання обмотки ротора

$$\xi_r = 1.3$$

де коефіцієнт

$$\lambda_{dR} = \frac{t_R}{11.9 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi_r = \frac{0.00977}{11.9 \cdot 0.0002 \cdot 1.17088} \cdot 1.3 = 4.55657$$

Коефіцієнт лобового розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_{lR} = \frac{2.9 \cdot d_{kl}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{Z_2}\right)^2} \cdot \ln \left[\frac{4.7 \cdot d_{kl}}{2 \cdot (a_{kl} \cdot 1 + b_{kl})} \right] = \frac{2.9 \cdot 0.074}{22 \cdot 0.042 \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{22}\right)^2} \cdot \ln \left[\frac{4.7 \cdot 0.074}{2 \cdot (0.00735 + 0.006)} \right] = 7.30909$$

Коефіцієнт розсіювання обмотки ротора

$$\Sigma \lambda_2 = \lambda_{pR} + \lambda_{dR} + \lambda_{lR} = 1.2991 + 4.55657 + 7.30909 = 13.16476$$

Приведений коефіцієнт розсіювання обмотки ротора

$$\Sigma \lambda'_2 = \Sigma \lambda_2 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \left(\frac{k_{o\delta}}{k_{ck}} \right)^2 = 13.16476 \cdot \frac{16}{22} \cdot \left(\frac{0.90599}{0.9966} \right)^2 = 7.91246$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора, Ом

$$x_R = x_A \cdot \frac{\Sigma \lambda'_2}{\Sigma \lambda_2} = 20.33315 \cdot \frac{7.91246}{13.16476} = 12.2209 \cdot \text{Ом}$$

5.8 Розрахунок струму намагнічування

Магнітопровід виконуємо з сталі В50W800

Магнітна напруженість повітряного проміжку, А

$$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_o} \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.33689 \cdot 1.17088 \cdot 0.0002 = 125.5613 \cdot \text{А}$$

Розрахункова індукція у зубці статора, Тл

$$B_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{1S}}{b_{SZ} \cdot k_c} = \frac{0.33689 \cdot 0.01335}{0.0043 \cdot 0.95} = 1.10114 \cdot \text{Тл}$$

де коефіцієнт сталі

$$k_c = 0.95$$

Індукція у зубці ротора, Тл

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_R}{b_{RZ} \cdot k_c} = \frac{0.33689 \cdot 0.00977}{0.0032 \cdot 0.95} = 1.08244 \cdot Tл$$

Висота ярма статора, м

$$h_{aS} = 0.0124$$

Індукція у ярмі статора, Тл

$$B_{aS} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{aS} \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0.00101}{2 \cdot 12.4 \cdot 0.001 \cdot 0.042 \cdot 0.95} = 1.01571 \cdot Tл$$

Висота ярма ротора, м

$$h_{aR} = 0.0082$$

Індукція у ярмі ротора, Тл

$$B_{aR} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{aR} \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0.00101}{2 \cdot 8.2 \cdot 0.001 \cdot 0.042 \cdot 0.95} = 1.53595 \cdot Tл$$

По таблицях кривих намагнічення для сталі визначаються напруженості магнітного поля

Напруженість магнітного поля у зубцях статора, А/м

$$H_{Z1} = 370 \frac{A}{м} = 370$$

Напруженість магнітного поля у зубцях ротора, А/м

$$H_{Z2} = 360 \frac{A}{м} = 360$$

Напруженість магнітного поля у ярмі статора, А/м

$$H_{aS} = 190 \frac{A}{м} = 190$$

Напруженість магнітного поля у ярмі ротора, А/м

$$H_{aR} = 600 \frac{A}{м} = 600$$

Розрахункова висота зубця статора, м

$$h_{Z1} = h_{Sp} = 0.0115 \cdot м$$

Магнітне напруження зубцевої зони статора, А

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 2 \cdot 0.0115 \cdot 370 = 8.51 \cdot A$$

Розрахункова висота зубця ротора, м

$$h_{Z2} = h_{Rp} = 0.0042 \cdot m$$

Магнітне напруження зубцевої зони ротора, А

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} = 2 \cdot 0.0042 \cdot 360 = 3.024 \cdot A$$

Довжина середньої магнітної лінії ярма статора, м

$$L_{aS} = \frac{\pi(D_a - h_{aS})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.068 - 12.4 \cdot 0.001)}{2 \cdot 1} = 0.08734 \cdot m$$

Магнітне напруження ярма статора, А

$$\varepsilon_s = 0.52$$

$$F_{aS} = L_{aS} \cdot \varepsilon_s \cdot H_{aS} = 0.08734 \cdot 0.52 \cdot 190 = 8.62882 \cdot A$$

Довжина середньої магнітної лінії ярма ротора, м

$$L_{aR} = \frac{\pi \cdot h_{aR}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 8.2 \cdot 0.001}{2 \cdot 1} = 0.01288 \cdot m$$

$$\varepsilon_R = 0.3$$

Магнітне напруження ярма ротора, А

$$F_{aR} = L_{aR} \cdot \varepsilon_R \cdot H_{aR} = 0.01288 \cdot 0.3 \cdot 600 = 2.3185 \cdot A$$

Магнітне напруження на пару полюсів, А

$$F_k = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_{aS} + F_{aR} = 125.5613 + 8.51 + 3.024 + 8.62882 + 2.3185 = 148.04262 \cdot A$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола

$$k_\mu = \frac{F_k}{F_\delta} = \frac{148.04262}{125.5613} = 1.17905$$

Струм намагнічування, А

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_k}{0.9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{o\delta}} = \frac{1 \cdot 148.04262}{0.9 \cdot 2 \cdot 512 \cdot 0.90599} = 0.1773 \cdot A$$

Відносне значення струму намагнічування, в.о.

$$I_{\mu^*} = \frac{I_\mu}{I_1} = \frac{0.1773}{2.08696} = 0.08496$$

Опір взаємодукції, Ом

$$x_\mu = \frac{k'_E \cdot U_1}{I_\mu} = \frac{0.9 \cdot 115}{0.1773} = 583.74038 \cdot \Omega$$

5.9 Розрахунок параметрів робочого режиму

Розрахунок коефіцієнтів

$$\alpha = \frac{r_R}{x_\mu + r_R} = \frac{9.10836}{583.74038 + 9.10836} = 0.01536$$

$$\beta = \frac{x_\mu}{x_\mu + r_R} = \frac{583.74038}{583.74038 + 9.10836} = 0.98464$$

Активний опір розгалуження, Ом

$$s = 0.01 = 0.01$$

$$r'_{r1} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_\mu \cdot s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{0.01536 \cdot 0.98464 \cdot 583.74038 \cdot 0.01}{0.01536^2 + 0.01^2} = 262.78226$$

Реактивний опір розгалуження, Ом

$$x'_{r1} = x_R \cdot \beta \cdot \frac{\frac{r_R}{x_R} \cdot \alpha + s}{\alpha^2 + s^2} = 12.2209 \cdot 0.98464 \cdot \frac{\frac{9.10836}{12.2209} \cdot 0.01536 + 0.01}{0.01536^2 + 0.01^2} = 768.11349$$

Повний опір головної фази, Ом

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r'_{r1}) + (x_A + x'_{r1})i = 26.13726 + 262.78226 + (20.33315 + 768.11349) \cdot i = 288.91953 + 788.44664i$$

$$Z_{|A1|} = |Z_{A1}| = |288.91953 + 788.44664i| = 839.71578$$

Повний опір головної фази зворотної послідовності, Ом

$$r'_{r2} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_\mu \cdot (2 - s)}{\alpha^2 + (2 - s)^2} = \frac{0.01536 \cdot 0.98464 \cdot 583.74038 \cdot (2 - 0.01)}{0.01536^2 + (2 - 0.01)^2} = 4.43724$$

$$x'_{r2} = x_R \cdot \beta \cdot \frac{\frac{r_R}{x_R} \cdot \alpha + (2 - s)}{\alpha^2 + (2 - s)^2} = 12.2209 \cdot 0.98464 \cdot \frac{\frac{9.10836}{12.2209} \cdot 0.01536 + (2 - 0.01)}{0.01536^2 + (2 - 0.01)^2} = 6.08124$$

$$Z_{A2} = (r'_{r2} + r'_{r2}) + (x_A + x'_{r2})i = 4.43724 + 4.43724 + (20.33315 + 6.08124) \cdot i = 8.87448 + 26.41438i$$

$$Z_{|A2|} = |Z_{A2}| = |8.87448 + 26.41438i| = 27.86532$$

Струм головної обмотки без врахування втрат в сталі, А

$$I_{A1} = \frac{U_1}{Z_{A1}} = \frac{115}{288.91953 + 788.44664i} = 0.04712 - 0.12859i$$

$$I_{|AI|} = |I_{AI}| = |0.04712 - 0.12859i| = 0.13695$$

Повний опір розгалудження, Ом

$$Z'_{rI} = (r'_{rI}) + (x'_{rI})i = 262.78226 + 768.11349 \cdot i = 262.78226 + 768.11349i$$

$$Z'_{|rI|} = |Z'_{rI}| = |262.78226 + 768.11349i| = 811.8207$$

Електрорушійна сила, В

$$E_I = I_{|AI|} \cdot Z'_{|rI|} = 0.13695 \cdot 811.8207 = 111.17974 \cdot B$$

Електромагнітна потужність, Вт

$$P_E = m \cdot I_{|AI|}^2 \cdot Z'_{|rI|} = 2 \cdot 0.13695^2 \cdot 811.8207 = 30.45237 \cdot Bm$$

Повна електромагнітна потужність двигуна на валу, Вт

$$P'_E = P_E \cdot (1 - s) = 30.45237 \cdot (1 - 0.01) = 30.14785 \cdot Bm$$

Корисна потужність на валу двигуна, Вт

$$P_m = 3$$

$$P_R = P'_E - P_m = 30.14785 - 3 = 27.14785 \cdot Bm$$

5.10 Розрахунок втрат

Питома маса сталі, кг/м³

$$\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \frac{\kappa z}{M^3} = 7.8 \times 10^6 \cdot \frac{z}{M^3}$$

$$P_R = P'_E - P_m = 70.23 - 3 = 67.23$$

Маса зубців і ярем ротора та статора, г (перевірити формули по геометрії)

$$G_{SA} = \gamma_c \cdot \pi \cdot (D + h_{aS}) \cdot h_{aS} \cdot l_\delta \cdot k_c = 7.8 \times 10^6 \cdot \pi \cdot (0.02 + 12.4 \cdot 0.001) \cdot 12.4 \cdot 0.001 \cdot 0.042 \cdot 0.95 = 392.81138 \cdot z$$

$$G_{SA} = 392.81138 = 0.39281 \cdot \kappa z$$

$$G_{Sz} = \gamma_c \cdot Z_I \cdot b_{SZ} \cdot h_{ZI} \cdot l_\delta \cdot k_c = 7.8 \times 10^6 \cdot 16 \cdot 0.0043 \cdot 0.0115 \cdot 0.042 \cdot 0.95 = 246.23726 \cdot z$$

$$G_{Sz} = 246.23726 = 0.24624 \cdot \kappa z$$

$$G_{RA} = \gamma_c \cdot \pi \cdot (D_{RZ} + h_{aR}) \cdot h_{aR} \cdot l_\delta \cdot k_c = 7.8 \times 10^6 \cdot \pi \cdot (0.092 + 8.2 \cdot 0.001) \cdot 8.2 \cdot 0.001 \cdot 0.042 \cdot 0.95 = 803.33917$$

$$G_{RA} = 803.33917 = 0.80334 \cdot \kappa z$$

$$G_{Rz} = \gamma_c \cdot Z_2 \cdot b_{RZ} \cdot h_{Z2} \cdot l_\delta \cdot k_c = 7.8 \times 10^6 \cdot 22 \cdot 0.0032 \cdot 0.0042 \cdot 0.042 \cdot 0.95 = 92.02153$$

$$G_{Rz} = 92.02153 = 0.09202 \cdot \kappa z$$

Питомі втрати в сталі, Вт/г

$$p_{50} = 2.2 \frac{Bm}{\kappa z} = 0.0022 \cdot \frac{Bm}{z}$$

Питомі втрати в зубцях і ярмах ротора та статора, Вт

$$p'_{SA} = 1.6 \cdot p_{50} \cdot B_{as}^2 \cdot G_{SA} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} = 1.6 \cdot 0.0022 \cdot 1.01571^2 \cdot 392.81138 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} = 1.42648 \cdot Bm$$

$$p'_{Sz} = 1.6 \cdot p_{50} \cdot B_{zl}^2 \cdot G_{Sz} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} = 1.6 \cdot 0.0022 \cdot 1.10114^2 \cdot 246.23726 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} = 1.05094 \cdot Bm$$

$$p'_{RA} = 1.6 \cdot p_{50} \cdot B_{ar}^2 \cdot G_{RA} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} = 1.6 \cdot 0.0022 \cdot 1.53595^2 \cdot 803.33917 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} = 6.67107 \cdot Bm$$

$$p'_{Rz} = 1.6 \cdot p_{50} \cdot B_{z2}^2 \cdot G_{Rz} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} = 1.6 \cdot 0.0022 \cdot 1.08244^2 \cdot 92.02153 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} = 0.37952 \cdot Bm$$

Сумма питомих втрат в активній частині, Вт

$$P_c = p'_{SA} + p'_{Sz} + p'_{RA} + p'_{Rz} = 1.42648 + 1.05094 + 6.67107 + 0.37952 = 9.52801 \cdot Bm$$

Струм втрат в сталі, А

$$I_c = \frac{P_c}{2 \cdot E_l} = \frac{9.52801}{2 \cdot 111.17974} = 0.04285 \cdot A$$

Струм в головній обмотці з урахуванням струму втрат в сталі, А

$$I_{SA} = I_{Al} + I_c = 0.04712 - 0.12859i + 0.04285 = 0.08997 - 0.12859i$$

$$I_{|SA|} = |I_{Al}| = |0.04712 - 0.12859i| = 0.13695 \cdot A$$

Коефіцієнт потужності головної фази

$$\cos \varphi_A = \frac{I_\mu}{I_{|SA|}} = \frac{0.1773}{0.13695} = 1.29466$$

Втрати в обмотці статора головної обмотки, Вт

$$P_{MS} = 2 \cdot I_{|SA|}^2 \cdot r_{Al} = 2 \cdot 0.13695^2 \cdot 55.10417 = 2.06702 \cdot Bm$$

Споживана потужність головною обмоткою статора, Вт

$$P_S = P_E + P_{MS} + P_c = 30.45237 + 2.06702 + 9.52801 = 42.04741 \cdot Bm$$

Коефіцієнт корисної дії головної обмотки

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{27.14785}{42.04741} = 0.64565$$

5.11 Розрахунок конденсаторної обмотки

Коефіцієнт трансформації

$$Z'_{A1} = \operatorname{Re}(Z_{A1}) = \operatorname{Re}(288.91953 + 788.44664i) = 288.91953$$

$$Z''_{A1} = \operatorname{Im}(Z_{A1}) = \operatorname{Im}(288.91953 + 788.44664i) = 788.44664$$

$$k_{tr} = \frac{Z''_{A1}}{Z'_{A1}} = \frac{788.44664}{288.91953} = 2.72895$$

$$k_{tr} = 1.08$$

Ємністий опір споміжної обмотки, Ом

$$x'_c = k_{tr}^2 \cdot Z''_{A1} + k_{tr} \cdot Z'_{A1} = 1.08^2 \cdot 788.44664 + 1.08 \cdot 288.91953 = 1231.67725 \cdot \text{Ом}$$

Ємність конденсатора, Ф

$$C' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x'_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1231.67725} = 2.58436 \cdot \text{мкФ}$$

Обираємо стандартну ємність, Ф

$$C = 2.5 \text{ мкФ}$$

Перерозрахуємо опір конденсатора, Ом

$$x_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2.5 \cdot 1 \times 10^{-6}} = 1273.23954 \cdot \text{Ом}$$

Кількість витків у додатковій обмотці

$$W_2 = k_{tr} \cdot W_1 = 1.08 \cdot 512 = 552.96$$

Кількість витків в одній котушці

$$W_B = \frac{W_2}{p \cdot q} = \frac{552.96}{1 \cdot 4} = 138.24$$

Визначемо переріз дроту додаткової обмотки, м²

$$S_A = S_{\text{эф}} = 0.1419 \cdot \text{мм}^2$$

$$S'_B = \frac{S_A}{k_{tr}} = \frac{1.419 \times 10^{-7}}{1.08} = 0.13139 \cdot \text{мм}^2$$

Визначемо діаметр дроту додаткової обмотки, м

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_B}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.31389 \times 10^{-7}}{\pi}} = 0.40901 \cdot \text{мм}$$

Вибираємо найближчий стандартний провід, м

$$d_B = 0.21 \text{ мм}$$

$$S_B = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.21 \cdot 0.001)^2}{4} = 0.03464 \cdot \text{мм}^2$$

Довжина лобової частини додаткової обмотки статора, м

$$L_{LS\delta} = 5 \text{ см} = 0.05 \cdot \text{м}$$

Середня довжина піввитка, м

$$L_{SR\delta} = L_{LS\delta} + l_\delta = 0.05 + 0.042 = 9.2 \cdot \text{см}$$

Загальна довжина провідника фази, м

$$L_{A\delta} = 2 \cdot (L_{SR\delta} \cdot W_2)$$

Активний опір обмотки статора, Ом

$$r_{A\delta} = \rho_{Cu} \cdot \frac{L_{A\delta}}{S_B \cdot a} = 2.43902 \times 10^{-8} \cdot \frac{2 \cdot 0.092 \cdot 552.96}{3.46361 \times 10^{-8} \cdot 1} = 71.6472 \cdot \text{Ом}$$

5.12 Тепловий розрахунок

Електричні втрати в обмотці статора

Загальні електричні втрати в міді обмотки статора, визначені в розділі 5:

$$P_{Cu} = 19,74 \text{ Вт}$$

Середня довжина витка:

$$l_{cpl} = 0,29 \text{ м}$$

Активна довжина магнітопроводу:

$$l_1 = 0,042 \text{ м}$$

Довжина лобової частини одного боку витка:

$$l_{l1} = 0,103 \text{ м}$$

Електричні втрати в пазовій частині обмотки статора

Реальні електричні втрати в пазовій частині визначаються за формулою:

$$p_{\text{ел1паз}} = R_{\text{Cu}} \cdot (2 \cdot l_1 / l_{\text{cpl}})$$

Підставляючи числові значення, одержимо:

$$p_{\text{ел1паз}} = 19,74 \cdot (2 \cdot 0,042 / 0,29) = 5,72 \text{ Вт}$$

Електричні втрати в лобових частинах обмотки статора

Реальні електричні втрати в лобових частинах визначаються за формулою:

$$p_{\text{ел1лоб}} = R_{\text{Cu}} \cdot (2 \cdot l_{l1} / l_{\text{cpl}})$$

Підставляючи числові значення, одержимо:

$$p_{\text{ел1лоб}} = 19,74 \cdot (2 \cdot 0,103 / 0,29) = 14,02 \text{ Вт}$$

Перевірка:

$$p_{\text{ел1паз}} + p_{\text{ел1лоб}} = 5,72 + 14,02 = 19,74 \text{ Вт}$$

Втрати в сталі осердя статора

Втрати в сталі осердя статора, визначені в розділі 5:

$$P_{\text{Fe}} = 7,43 \text{ Вт}$$

Частина втрат у сталі, що припадає на внутрішню поверхню осердя статора:

$$p_{\text{стосн}} = 0,5 \cdot P_{\text{Fe}} = 3,72 \text{ Вт}$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора

Коефіцієнт нерівномірності теплового потоку:

$$K = 0,2$$

Внутрішній діаметр статора:

$$D = 0,02 \text{ м}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні:

$$\alpha_1 = 108 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$$

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині машини визначається за формулою:

$$\Delta p_{\text{овл 1}} = K \cdot (p_{\text{ел1паз}} + p_{\text{стосн}}) / (\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1)$$

Підставляючи числові значення, одержимо:

$$\Delta p_{\text{овл 1}} = 0,2 \cdot (5,72 + 3,72) / (\pi \cdot 0,02 \cdot 0,042 \cdot 108) = 6,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин обмотки

Довжина вильоту лобових частин:

$$l_{\text{вил}} = 0,103 \text{ м}$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин визначається за формулою:

$$\Delta t_{\text{повл}} = K \cdot \rho_{\text{ел}} l_{\text{лоб}} / (2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{вил}} \cdot \alpha_1)$$

Підставляючи числові значення, одержимо:

$$\Delta t_{\text{повл}} = 0,2 \cdot 14,02 / (2 \cdot \pi \cdot 0,02 \cdot 0,103 \cdot 108) = 2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Таблиця 5.2 – Порівняння результатів теплового розрахунку, отриманих у розділах 4 та 5

Параметр	Розділ 4 (класичний розрахунок)	Розділ 5 (розрахунок за даними Mathcad)	Відхилення
Втрати в міді обмотки статора, Вт	20,1	19,74	−1,8 %
Втрати в сталі осердя статора, Вт	7,6	7,43	−2,2 %
Втрати в пазовій частині обмотки, Вт	5,9	5,72	−3,1 %
Втрати в лобових частинах обмотки, Вт	14,2	14,02	−1,3 %
Перевищення температури внутрішньої поверхні статора, °C	6,9	6,6	−4,3 %
Перевищення температури лобових частин обмотки, °C	2,1	2,0	−4,8 %

6. СТАРТАП-ПРОЕКТ

Сучасні вимоги до енергоефективності електричних машин зумовлюють необхідність детального аналізу магнітних втрат у магнітопроводах статора та ротора, які істотно впливають на ККД, тепловий режим та надійність роботи електродвигуна.

Значна частина втрат у електричних машинах припадає на втрати в електротехнічній сталі, величина яких визначається не лише магнітними властивостями матеріалу, але й технологією виготовлення магнітопроводу, зокрема способом з'єднання листів сталі в пакет.

У серійних конструкціях широко застосовується штампування з використанням просічок, що забезпечує механічну міцність пакета, проте супроводжується порушенням міжлистової ізоляції та створенням умов для виникнення додаткових вихрових струмів. Це призводить до зростання питомих втрат і підвищеного нагріву магнітопроводу.

У зв'язку з цим актуальним є проведення експериментального дослідження втрат у сталі, спрямованого на порівняння:

- магнітних втрат у магнітопроводах статора і ротора;
- впливу кількості та щільності просічок на рівень питомих втрат;
- поведінки магнітних втрат при зростанні магнітної індукції;
- ефективності використання базової марки електротехнічної сталі 50W800 у реальних умовах роботи.

Проведення такого дослідження дозволяє кількісно оцінити вплив технологічних факторів на енергетичні показники електричної машини та створює основу для обґрунтування доцільності переходу до альтернативних технологічних рішень, зокрема:

- відмови від з'єднання листів методом просічок;
- застосування склеювання або лакування пакетів;

- заміни марки електротехнічної сталі на матеріал з меншими питомими втратами.

Таким чином, дане експериментальне дослідження є ключовим етапом стартап-проєкту, спрямованого на зниження магнітних втрат, покращення теплового режиму та підвищення енергоефективності електричної машини без радикальної зміни її конструкції.

6.1 Методика проведення експериментального дослідження

З метою оцінки впливу технології з'єднання листів електротехнічної сталі на рівень магнітних втрат у магнітопроводі було проведено експериментальне дослідження магнітних властивостей пакетів статора та ротора.

Дослідження виконувалося для двох елементів електричної машини — статора та ротора, які відрізняються геометричними параметрами та кількістю з'єднувальних просічок у пакеті листів. Така відмінність дозволяє оцінити вплив щільності та кількості просічок на магнітні втрати.

6.2 Суть експерименту

Експеримент полягав у намагнічуванні магнітопроводу змінною напругою з подальшим вимірюванням електричних та енергетичних параметрів при різних рівнях магнітної індукції. На обмотку, розміщену на досліджуваному магнітопроводі, подавалася змінна напруга з поступовим її збільшенням. На кожному етапі вимірювалися: напруга живлення, струм намагнічування, повна та активна потужності.

6.3 Обробка результатів вимірювань

На основі виміряних значень напруги та відомих геометричних розмірів магнітопроводу визначалася магнітна індукція в сталі. Активні втрати в сталі визначалися як різниця між виміряною споживаною активною

потужністю та втратами в міді обмотки.

Для коректного порівняння результатів втрати в сталі приводилися до одиниці маси магнітопроводу, що дозволило отримати питомі втрати.

6.4 Мета дослідження

Проведений експеримент дозволяє отримати експериментальні залежності питомих втрат від магнітної індукції, порівняти втрати в магнітопроводах із різною кількістю просічок та обґрунтувати доцільність використання альтернативних технологій з'єднання листів електротехнічної сталі в рамках стартап-проєкту.

Результати експериментальних вимірювань та подальших розрахунків для статора та ротора наведені у відповідних таблицях. Аналіз наведених даних дозволяє встановити закономірність зростання питомих втрат зі збільшенням магнітної індукції та кількості просічок у магнітопроводі.

6.5 Статор

Розрахунок геометричних розмірів ярма статора



Рис. 6.1 Зовнішній вигляд статора

$W = 240$, кількість витків намотаних на магнітопровід статор.
 $r = 18$ Ом, активний опір обмотки намотаної на шинопровід.

Геометричні розміри

$l = 60,6$ мм, довжина пакета статора.
 $a_c = 11,8$ мм, ширина зубця статора.
 $k_z = 0,97$, коефіцієнт заповнення пакету сталі.
 $D = 47,9$ мм, зовнішній діаметр магнітопроводу статора.
 $d = 24$ мм, внутрішній діаметр статора (діаметр розточки під вал)
 $d_{cp} = 35,95$ мм, середній діаметр магнітопроводу ярма.

Розрахункові величини

$S_{Fe} = 6,936 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, ефективна площа поперечного перерізу ярма сталі статора.
 $l_{cp} = 0,113$ м, середня довжина магнітної лінії в осерді ярма статора.
 $V = 7,838 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, об'єм сталі магнітопроводу ярма статора.
 $m_{сталі} = 0,596$ кг, маса магнітопроводу статора
 $B \approx U / 36,95$, розрахункова величин індукції магнітопроводу ярма статора.

Таблиця експериментальних даних 6.1

U, В	38,2	42,1	47,7	53,3	58	62,4	67,3	80,8
I, А	0,108	0,157	0,255	0,478	0,72	0,98	1,27	1,76
S, ВА	4,12	6,36	12,16	25,48	41,76	61,15	85,47	142,2
$I^2 r$	0,21	0,41	1,17	4,11	9,33	17,28	29	55,76
P, Вт	3,91	5,95	10,99	21,37	32,43	43,87	56,47	86,44
B, Тл	1,034	1,13	1,29	1,44	1,57	1,69	1,82	2,18
Рпит, Вт/кг	6,56	9,98	18,43	35,8	54,4	73,6	94,75	145

Відповідно до довідкових характеристик сталі 50W800, рівень питомих втрат порядку $R_{пит} \approx 8$ Вт/кг відповідає області індукцій близько $B \approx 1,5$ Тл за умов збереження міжлистової ізоляції. Водночас за результатами

експерименту для статора при $B \approx 1,5$ Тл отримано $P_{\text{пит}} \approx 44\text{--}45$ Вт/кг. Таким чином, фактичні втрати у магнітопроводі статора є суттєво вищими за довідкові, що пояснюється додатковими вихровими втратами, спричиненими технологією з'єднання листів методом просічок (6 насічок), яка локально порушує міжлистову ізоляцію.

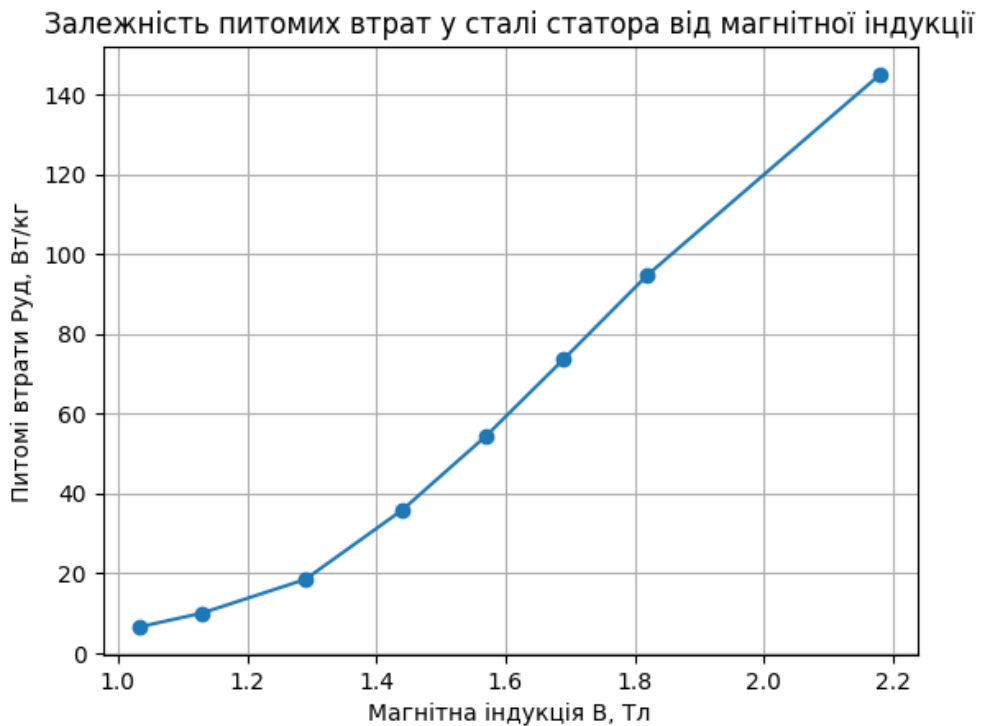


Рис. 6.2. Графік залежності питомих втрат у сталі статора

6.6 Ротор

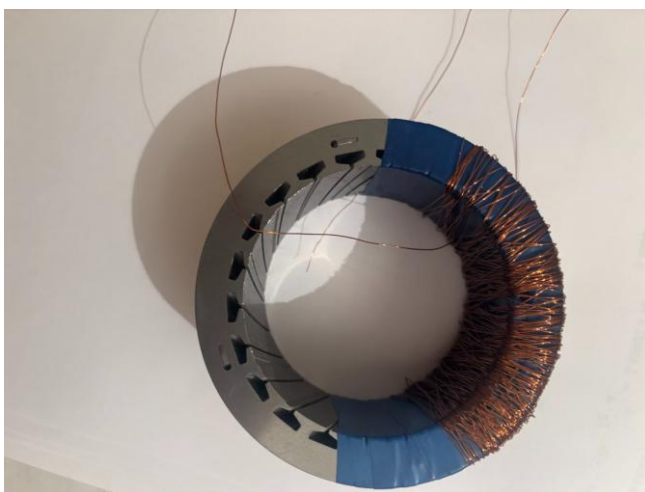


Рис. 6.3 Зовнішній вигляд ротора

Розрахунок розмірі ротора

$W = 217$, кількість витків намагнічувальної обмотки.

$r = 10,5$ Ом, активний опір обмотки.

Геометричні розміри магнітотривоу ротора

$D = 92$ мм — зовнішній діаметр ротора

$d = 76$ мм — внутрішній діаметр ротора

$d_{cp} = 84$ мм — середній діаметр ярма магнітотривоу ротора

Розрахункові параметри

$l_{cp} = \pi \cdot d_{cp} = 0,264$ м, середня довжина магнітної лінії в осерді ротора

$S_{Fe} = 3,259 \cdot 10^{-4}$ м², ефективна площа поперечного перерізу ярма сталі ротора.

$V = S_{Fe} \cdot l_{cp} = 8,6 \cdot 10^{-5}$ м³, об'єм сталі магнітотривоу ярма ротора.

$m_{сталі} = 0,6556$ кг, маса магнітотривоу ротора

$B = U / 15,7$, розрахункова величин індукції магнітотривоу ярма ротора.

Таблиця експериментальних даних 6.2

U, В	10,5	18,3	23	25,1	27	28,9	30,7
I, А	0,106	0,219	0,415	0,573	0,756	0,958	1,147
S, ВА	1,11	4	9,55	14,38	20,41	27,69	35,21
$I^2 r$	0,118	0,5	1,81	3,45	6	9,64	13,81
P, Вт	0,992	3,5	7,74	10,93	14,41	18,05	21,4
B, Тл	0,67	1,16	1,46	1,6	1,72	1,84	1,95
R _{пит} , Вт/кг	1,52	5,36	11,84	16,72	22,05	27,83	32,74

Таблиця експериментальних даних 6.2 продовження

U, В	33,1	36,9	45	49,9	54	56
I, А	1,357	1,656	2,16	2,38	2,52	3,16
S, ВА	44,92	61,1	97,2	118,76	136,1	176,96
I^2R	19,33	28,79	48,99	57,48	66,68	104,85
P, Вт	25,59	32,31	48,21	59,28	69,42	82,11
B, Тл	2,1	2,35	2,87	3,18	3,44	3,57
Рпит, Вт/кг	39,15	49,4	73,76	90,7	106,2	110

Відповідно до довідкових характеристик електротехнічної сталі марки 50W800, рівень питомих втрат порядку 8 Вт/кг відповідає області магнітних індукцій близько 1,5 Тл за умови збереження міжлистової ізоляції та відсутності додаткових технологічних пошкоджень.

Водночас за результатами експериментального дослідження для ротора при магнітній індукції, близькій до 1,5 Тл, отримано значно вищі значення питомих втрат. Так, за табличними даними при індукції 1,46 Тл питомі втрати становлять 11,84 Вт/кг, а при індукції 1,60 Тл — 16,72 Вт/кг. Середнє значення питомих втрат при індукції близько 1,5 Тл становить приблизно 14–15 Вт/кг.

Таким чином, фактичні втрати у сталі магнітопроводу ротора перевищують довідкові значення для сталі 50W800, однак є суттєво меншими порівняно зі статором. Це пояснюється меншою кількістю з'єднувальних просічок у пакеті ротора (4 просічки), що призводить до меншого порушення міжлистової ізоляції та, відповідно, до зменшення додаткових вихрових втрат у сталі.

Залежність питомих втрат у сталі ротора від магнітної індукції

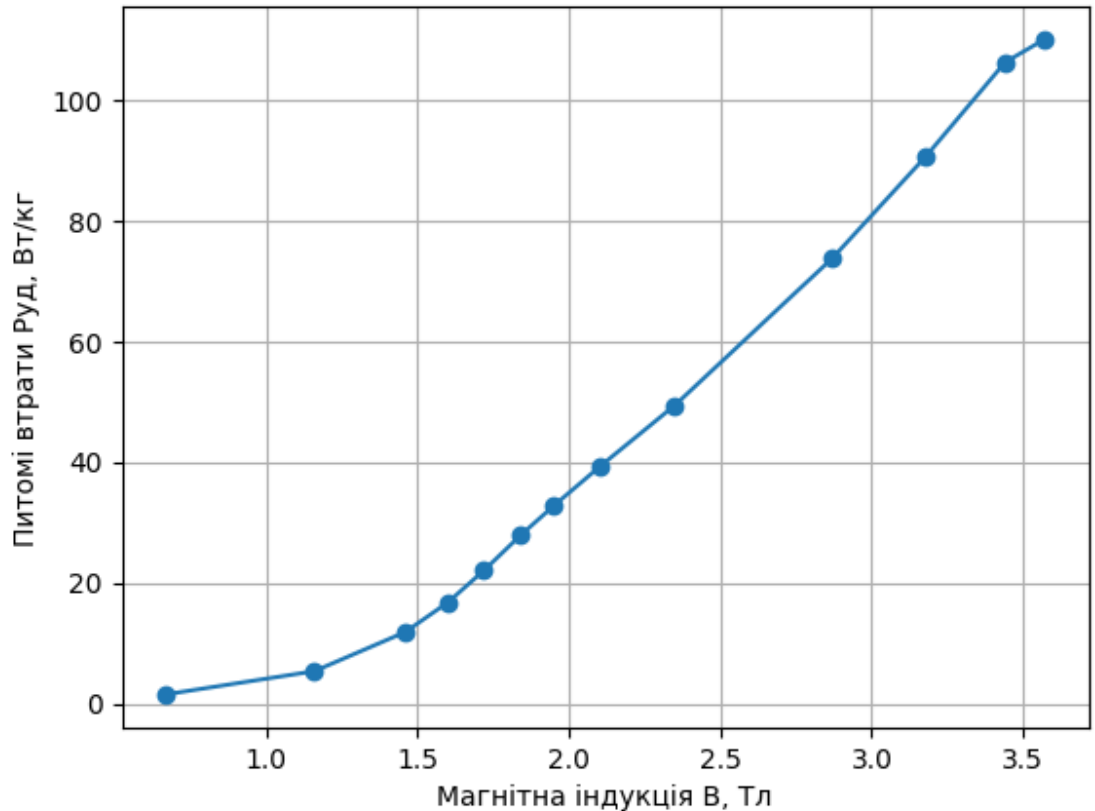


Рис. 6.3. Графік залежності питомих втрат у сталі ротора

Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень для статора та ротора показав чітку залежність рівня питомих втрат у сталі від кількості з'єднувальних просічок у пакеті магнітопроводу. За однакової марки електротехнічної сталі та близьких значень магнітної індукції більша кількість просічок призводить до суттєвого зростання втрат.

Для статора, який має 6 просічок, питомі втрати при індукції близько 1,5 Тл становлять приблизно 44–45 Вт/кг, тоді як для ротора з меншою кількістю просічок (4 просічки) при тих самих умовах питомі втрати не перевищують 14–15 Вт/кг. Це свідчить про істотний вплив кількості точок механічного з'єднання листів на рівень додаткових вихрових втрат у сталі.

Таким чином, експериментально підтверджено, що зменшення кількості просічок у пакеті магнітопроводу дозволяє знизити питомі втрати та покращити енергетичні показники електричної машини. У випадку, якщо

зміна типу з'єднання листів на даному етапі неможлива, доцільним є хоча б **мінімізація кількості точок з'єднання**, що вже забезпечує помітне зменшення втрат у сталі.

На основі аналізу експериментальних та розрахункових даних, наведених у таблицях для магнітопроводів статора та ротора, встановлено суттєвий вплив технології з'єднання листів електротехнічної сталі на рівень магнітних втрат.

Порівняльний аналіз показує, що при застосуванні **просічок для з'єднання пакетів листів** відбувається **зростання питомих втрат у сталі** навіть за однакових або близьких значень магнітної індукції. Це пояснюється порушенням ізоляційного шару між листами та утворенням **замкнених контурів для вихрових струмів**, що особливо інтенсивно проявляється в зонах просічок.

Аналіз таблиць для ротора і статора свідчить, що **чим більша кількість просічок у магнітопроводі, тим вищими є втрати**. Так, у елементах з більшою концентрацією просічок спостерігається:

- швидше зростання питомих втрат $P_{уд}$ зі збільшенням магнітної індукції;
- зміщення робочої точки в область підвищених втрат;
- зниження енергоефективності магнітопроводу.

Особливо показовим є порівняння даних для ротора та статора, де різна кількість і щільність просічок призводить до відмінностей у значеннях питомих втрат при однакових рівнях індукції. У випадках, де кількість просічок більша, підтабличні значення питомих втрат є суттєво вищими, що підтверджує негативний вплив даного способу з'єднання.

Таким чином, застосування просічок як способу з'єднання листів магнітопроводу є **технологічно небажаним**, особливо для електричних

машин, що працюють у тривалому режимі або з підвищеною магнітною індукцією.

У рамках стартап-проєкту доцільно відмовитися від з'єднання пакетів листів методом просічок та перейти до **альтернативних технологій фіксації**, зокрема:

- склеювання електротехнічної сталі;
- використання ізоляційних лаків та компаундів;
- комбінованих методів без механічного пошкодження листів.

Запропонований підхід дозволяє **зменшити вихрові струми, знизити втрати в сталі, підвищити ККД електричної машини та зменшити теплове навантаження**, що безпосередньо підвищує конкурентоспроможність виробу та інноваційну цінність стартап-проєкту.

6.7 Обґрунтування заміни марки електротехнічної сталі в магнітопроводі

У базовій конструкції магнітопроводів статора та ротора використовується електротехнічна сталь марки **50W800**, яка є типовою для серійних електричних машин загального призначення. Основною перевагою даної сталі є її доступність та простота обробки, однак при роботі в області підвищених магнітних індукцій вона характеризується **значними питомими втратами**, що призводить до додаткового теплового навантаження магнітопроводу.

Результати експериментального дослідження, наведені у таблицях для статора та ротора, показують, що при зростанні магнітної індукції питомі втрати в сталі зростають непропорційно швидко. Особливо це проявляється в конструкціях із **з'єднанням листів методом просічок**, де локальне порушення ізоляції між листами сприяє виникненню додаткових вихрових струмів.

Таблиця 6.3

Показник	50W250	50W800
Щільність, кг/дм ³	7.60	7.80
Максимальні питомі втрати при 1,5 Т, 50 Hz (Вт/кг)	2.30	8
Мін. магнітна індукція (при визначенні, Тл)	1.64	1.71
Коефіцієнт набору, %	97	98
Кількість додаткових механічних обробок	2 (менша)	10 (більша)

Що означають ці дані

1. **Питомі втрати (Вт/кг)** — це головний параметр, що впливає на нагрів, енергоефективність і ККД.

У сталі **50W800** питомі втрати значно вищі, ніж у **50W250** при тих самих умовах магнітного навантаження.

2. **Магнітна індукція (Тл)** вказує на здатність сталі намагнічуватися.
3. **Коефіцієнт набору** — важливий при формуванні пакета листів:

Більший коефіцієнт у 50W800 частково компенсує втрати, але надмірні механічні операції і просічки збільшують фактичні втрати в машині.

Порівняльний аналіз експериментальних даних для статора і ротора, які мають **різну кількість просічок**, підтверджує, що за більшої щільності просічок спостерігаються вищі значення питомих втрат при однакових

рівнях магнітної індукції. Це вказує на те, що застосування сталі з підвищеними втратами у поєднанні з механічним з'єднанням листів є **енергетично неефективним рішенням**.

У зв'язку з цим у рамках стартап-проєкту пропонується **заміна електротехнічної сталі марки 50W800 на сталь з покращеними магнітними характеристиками — 50W250**. Дана марка сталі характеризується значно меншими питомими втратами при робочих значеннях магнітної індукції, що дозволяє:

- зменшити втрати в сталі магнітопроводу;
- знизити нагрів статора та ротора;
- підвищити ККД електричної машини;
- забезпечити стабільнішу роботу в тривалому режимі навантаження.

У поєднанні з відмовою від з'єднання пакетів листів методом просічок та переходом до альтернативних способів фіксації (склеювання, лакування) запропоноване рішення формує **технологічну основу стартап-проєкту**, спрямованого на підвищення енергоефективності та надійності електричних машин без зміни їх базової конструктивної схеми.

Стартап-проєкт передбачає модернізацію магнітопроводів статора та ротора шляхом заміни електротехнічної сталі 50W800 на 50W250 та відмови від з'єднання листів методом просічок. Запропоноване рішення, підтверджене експериментальними дослідженнями, дозволяє зменшити магнітні втрати, знизити теплове навантаження та підвищити енергоефективність електричної машини без суттєвого ускладнення конструкції.

Висновок стартап-проєкту

На основі проведених експериментальних досліджень магнітопроводів статора та ротора, а також аналізу отриманих табличних даних встановлено,

що технологія з'єднання листів магнітопроводу та марка електротехнічної сталі мають вирішальний вплив на рівень магнітних втрат.

Результати дослідів показали, що застосування **просічок** для з'єднання **листів** призводить до локального порушення ізоляційного шару між пластинами, утворення додаткових замкнених контурів вихрових струмів та, як наслідок, до **зростання питомих втрат і підвищеного нагріву магнітопроводу**. При цьому встановлено, що зі збільшенням кількості просічок втрати в сталі зростають, що підтверджується різницею результатів для статора і ротора.

Додатково встановлено, що використання електротехнічної сталі марки **50W800** у поєднанні з просічками є енергетично неефективним рішенням для електричних машин, орієнтованих на тривалий режим роботи та підвищені вимоги до ККД.

У зв'язку з цим у рамках стартап-проєкту пропонується **комплексна модернізація магнітопроводу**, яка включає:

- **відмову від з'єднання листів методом просічок;**
- **перехід до з'єднання пакетів шляхом склеювання або лакування, що не порушує міжлистову ізоляцію;**
- **заміна електротехнічної сталі марки 50W800 на 50W250 з меншими питомими втратами.**

Запропоноване рішення дозволяє:

- зменшити вихрові струми в магнітопроводі;
- знизити теплові втрати та робочу температуру машини;
- підвищити енергоефективність і ККД;
- покращити надійність і ресурс електричної машини без суттєвого ускладнення конструкції.

Таким чином, стартап-проект спрямований на **технологічне вдосконалення існуючої конструкції електричної машини** шляхом оптимізації матеріалу та способу формування магнітопроводу, що підтверджено результатами експериментальних досліджень.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю, призначеного для використання у вентиляційних установках. Актуальність роботи обумовлена широким застосуванням асинхронних двигунів з однофазним живленням у вентиляційних системах та необхідністю підвищення їх енергоефективності, надійності й точності інженерних розрахунків на етапі проєктування.

У ході роботи проведено аналіз конструкції та принципу дії асинхронного двигуна із зовнішнім ротором, обґрунтовано вибір даного типу двигуна як приводу відцентрового вентилятора низького тиску. Розглянуто особливості формування обертового магнітного поля у однофазному двигуні з постійно підключеною ємністю та показано переваги такого рішення порівняно з іншими типами однофазних асинхронних двигунів.

Сформовано та реалізовано розрахункову методику однофазного асинхронного двигуна з постійно підключеною ємністю у середовищі Mathcad, що дозволяє на основі заданих вихідних конструктивних та електричних параметрів виконувати електромагнітний, механічний та енергетичний розрахунок електродвигуна. Реалізований алгоритм забезпечує послідовність і наочність розрахунків, а також зменшує ймовірність інженерних помилок порівняно з ручними обчисленнями.

Виконано розрахунок базового варіанта двигуна та проведено перевірку коректності результатів шляхом порівняння з аналітичною методикою. Отримані результати показали добру узгодженість між аналітичними та комп'ютерними розрахунками, що підтверджує правильність і практичну придатність розробленої розрахункової методики.

Окрему увагу приділено аналізу впливу марки електротехнічної сталі магнітопроводу статора на втрати в сталі, тепловий режим і коефіцієнт корисної дії двигуна. Показано, що застосування сталі з покращеними магнітними властивостями дозволяє знизити втрати, зменшити нагрів осердя статора та підвищити енергоефективність електродвигуна без зміни його основних габаритів.

У межах виконання стартап-проєкту додатково проведено перевірку втрат у магнітопроводі статора з урахуванням технології виготовлення пакета осердя. Встановлено, що застосування конструктивно недоцільної кількості просічок при збиранні пакета призводить до зростання додаткових втрат у сталі та підвищеного нагріву двигуна. За результатами аналізу рекомендовано зменшення кількості просічок як мінімально необхідного заходу зниження втрат. У більш ефективному варіанті доцільним є заміна механічного кріплення листів статора на технологію склеювання, що забезпечує зменшення вихрових втрат, покращення теплового режиму та підвищення ресурсу ізоляції. Додатково рекомендовано застосування електротехнічної сталі з меншими питомими втратами, що у поєднанні зі зміною способу кріплення пакета дозволяє суттєво підвищити енергоефективність і надійність електродвигуна.

Отримані в роботі результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні та модернізації однофазних асинхронних двигунів з постійно підключеною ємністю для вентиляційних і побутових установок, а також у навчальному процесі при викладанні дисциплін, пов'язаних з електричними машинами, електромеханічними розрахунками та інженерним проєктуванням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лопухіна О. М. Електричні машини змінного струму : підручник для закладів вищої освіти. — Київ : Вища школа, 2010. — 512 с.
2. Герасько О. М. Розрахунок та проєктування асинхронних електродвигунів : навчальний посібник. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. — 286 с.
3. Копилов І. П. Електричні машини : підручник. — Москва : Юрайт, 2018. — 640 с.
4. Кузнецов В. А., Федоров В. Н. Однофазні та двофазні асинхронні електродвигуни. — Харків : НТУ «ХПІ», 2012. — 224 с.
5. Болдырев А. Н. Теорія електромеханічних перетворювачів енергії. — Київ : Наукова думка, 2009. — 368 с.
6. Пивоваров С. С. Проєктування вентиляційних установок та електроприводів : навчальний посібник. — Київ : Ліра-К, 2016. — 304 с..
7. Mathcad User Documentation. Mathcad Prime User Guide. — PTC Inc., 2022. — 450 p.
8. Довідкові матеріали та технічна документація на електродвигун BL-B250B-2C-D02-01. — Виробник, 2023.
9. Коваленко, М. А., Реуцький, М. О., Коваленко, І. Я., Базаров, О. О., & Тітов, Є. О. (2025). Використання джерела безперебійного живлення для зниження експлуатаційних витрат автономного електрогенератора. Відновлювана енергетика, (1(80)), 29-37. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).29-37](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).29-37) (Scopus).
10. Kovalenko, M., Kovalenko, I., Tkachuk, I., Reutskyi, M., Harford, A., & Zhuk, S. (2024). Construction of the mathematical model of magnetic transmission for an autonomous wind power plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(5 (128)), 22–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302008> (Scopus).
11. Коваленко, М., Реуцький, М., Коваленко, І., Тітов, Є., & Базаров, О. (2025). Експериментальне дослідження автономної магнітної передачі. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (13)), 44–49. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.09> (Фахові видання).
12. Крячок О.С., Реуцький М.О., Сушко Д.А., До питання розрахунку характеристик спеціальних пристроїв з магнітною системою на основі постійних магнітів, Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.-Харків: «ХПІ», 2021, №2(8). С.77-82.[doi:10.20998/2413-4295.2021.02/11](https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02/11)
13. Г.В. Лазарєв, Я.В. Рибка, М.О. Реуцький, О.С. Крячок, А.А. Шиманська, Підвищення максимального моменту спеціальних електродвигунів постійного струму з постійними магнітами. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях", Харків: НТУ «ХПІ» випуск 2(16), 2023, С.26-32.[doi:10.20988/2413-4295.2033.02.04](https://doi.org/10.20988/2413-4295.2033.02.04)
14. Чумак, В., Реуцький, М., Гайденок, Ю., Ігнатюк, Ю., & Стулишенко, А. (2025). ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДВИГУНІВ З ОБМЕЖЕНИМ

КУТОМ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.
Відновлювана енергетика ,№ 3(82), 2025, 19-26. Науково-прикладний
журнал з відновлювальної енергетики [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).19-26](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).19-26)

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

(графічний матеріал використаний при захисті дипломного проекту)