

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електромеханіки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

_____ Вадим ЧУМАК
підпис ініціали, прізвище

“14” червня 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141, Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

на тему: Дослідження ушкоджень обмоток роторів асинхронних двигунів серії 4А

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕМ-21мн

Микитюк Орест Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., Олександр ГЕРАСКІН

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензист завідувач кафедри, д.т.н., доцент, Сергій КОВБАСА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра Електромеханіки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 141, Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітня програма Електричні машини і апарати
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

Вадим ЧУМАК
підпис ініціали, прізвище

«10» вересня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту

Микитюка Ореста Юрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи Дослідження ушкоджень обмоток роторів асинхронних двигунів серії 4А

Микитюка Ореста Юрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

керівник роботи Гераскін Олександр Анатолійович, доцент, к.т.н

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

затверджені наказом по університету від «25» 03 2024 р. №1443-с від «25» березня 2024 р.

2. Строк подання студентом роботи 11.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: асинхронні двигуни серії 4А, потужністю 7,5-315кВт, а саме: 4А112М2У3, 4А180М2У3, 4А250М2У3, 4А355М2У3, 4А355М4У3, 4А355М6У3, 4А355М8У3.

4. Зміст дипломної роботи (перелік завдань, які потрібно розробити) Огляд досліджень щодо впливу пошкоджень асинхронного двигуна на його працездатність. Математичне моделювання білячої клітки асинхронного двигуна. Аналіз термомеханічних напружень білячої клітки асинхронного двигуна.
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація з 29 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10.09.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Огляд сучасної літератури стосовно проблематики ушкоджень білячої клітки асинхронного двигуна	10.10.2023	Виконано
2	Розділ 2 Математичне моделювання обриву стрижня ротора в білячій клітці асинхронного двигуна	08.01.2024	Виконано
3	Розділ 3 Аналіз вихідних даних обрахунку струмів перевантаження у стрижнях та короткозамикаючих кілець	23.03.2024	Виконано

Студент

(підпис)

Орест МИКИТЮК

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ГЕРАСКІН

(ініціали, прізвище)

Анотація

Магістерська дисертація присвячена дослідженню впливу ушкоджених стрижнів білячої клітки на роботу асинхронного двигуна. В роботі проведено аналіз теоретичних основ та експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення впливу різних типів ушкоджень на ефективність функціонування асинхронного двигуна. Основна увага приділяється виявленню та аналізу впливу ушкодження на електромагнітні процеси у білячій клітці двигуна, такі як розподіл струмів, втрати потужності, та зміни в робочих параметрах. Результати досліджень дозволили встановити практичні методи виявлення та діагностики ушкоджень стрижнів білячої клітки, а також розробити рекомендації щодо підвищення надійності та продуктивності асинхронних двигунів у разі виникнення подібних проблем. Робота має значний потенціал для практичного застосування в промисловості та підтримує подальший розвиток технічних засобів діагностики та підтримки асинхронних електродвигунів.

Актуальність дослідження обумовлена зростаючою роллю асинхронних двигунів у сучасних технологічних процесах та промислових системах. Використання цих двигунів є надзвичайно поширеним у різних сферах виробництва, від малих побутових пристроїв до великих промислових комплексів. Однак, виникнення ушкоджень у білячій клітці може значно підірвати ефективність роботи таких систем, що призводить до великих фінансових втрат та зниження продуктивності виробництва. Тому розуміння впливу ушкоджень стрижнів білячої клітки на роботу асинхронних двигунів є критично важливим для розробки ефективних методів діагностики та управління. Дослідження в цій області не лише сприятиме забезпеченню безперебійної роботи промислових систем, але й спрямоване на підвищення загальної ефективності технологічних процесів, що має важливе значення для подальшого розвитку промисловості та забезпечення її конкурентоспроможності на світовому ринку.

Реферат

Тема даної дисертаційної роботи спрямована на дослідження механічних ушкоджень в білячій клітці ротора асинхронних двигунів, що є однією з найважливіших проблем в електротехнічній та промисловій сферах. Під час проведення даного дипломного проекту використовувалися методи математичного моделювання з метою аналізу впливу різних факторів на виникнення та розвиток механічних пошкоджень.

Асинхронні двигуни є найбільш поширеними в електротехнічній промисловості через свою надійність та високу ефективність. Проте, однією з основних проблем, яка може призвести до негативних наслідків у роботі таких двигунів, є ушкодження їх білячих кліток ротора. Це може статися внаслідок різних факторів, таких як механічні удари, вібрації, перевищення допустимих температур, недоліки в конструкції тощо.

Метою дослідження було виявлення та аналіз механічних ушкоджень, що виникають у білячій клітці ротора асинхронного двигуна під впливом різних факторів. Для досягнення цієї мети, були використані методи математичного моделювання, які дозволили здійснити комплексний аналіз процесу виникнення та розвитку ушкоджень.

Перевагою методів математичного моделювання є можливість віртуального відтворення умов, в яких виникають механічні ушкодження, що дозволяє виявити та проаналізувати найбільш критичні сценарії. Такий підхід дозволяє заздалегідь розробити ефективні заходи протидії ушкодженням та вдосконалити конструкцію ротора для забезпечення його максимальної надійності.

У результаті проведених досліджень було виявлено, що механічні ушкодження в білячій клітці ротора асинхронних двигунів можуть мати серйозний вплив на їхню працездатність та технічний стан. Розроблені методи математичного моделювання дозволяють ефективно прогнозувати та управляти процесами виникнення та розвитку ушкоджень, що є важливим

кроком у підвищенні надійності та довговічності асинхронних двигунів у промислових умовах.

ABSTRACT

The topic of this thesis is aimed at studying mechanical damage in the squirrel cage of the rotor of induction motors, which is one of the most important problems in the electrical and industrial fields. During this thesis project, mathematical modeling methods were used to analyze the influence of various factors on the occurrence and development of mechanical damage.

Induction motors are the most common in the electrical industry due to their reliability and high efficiency. However, one of the main problems that can lead to negative consequences in the operation of such motors is damage to their rotor flaps. This can occur due to various factors, such as mechanical shocks, vibrations, excessive temperatures, design flaws, etc.

The aim of the study was to identify and analyze the mechanical damage that occurs in the squirrel cage of an induction motor rotor under the influence of various factors. To achieve this goal, we used mathematical modeling methods that allowed us to carry out a comprehensive analysis of the process of damage occurrence and development.

The advantage of mathematical modeling methods is the ability to virtually reproduce the conditions under which mechanical damage occurs, which allows us to identify and analyze the most critical scenarios. This approach makes it possible to develop effective damage control measures in advance and improve the rotor design to ensure its maximum reliability.

As a result of the research, it was found that mechanical damage in the squirrel cage of the rotor of induction motors can have a serious impact on their performance and technical condition. The developed methods of mathematical modeling allow us to effectively predict and control the processes of damage occurrence and development, which is an important step in improving the reliability and durability of induction motors in industrial conditions.

ЗМІСТ

<u>Перелік скорочень</u>	10	
<u>Вступ</u>	11	
<u>Розділ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ УШКОДЖЕНЬ</u>		
<u>БІЛЯЧОЇ КЛІТКИ АСИНХРОНИХ ДВИГУНІВ</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>1.1 Складні умови експлуатації АД ...</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>1.2 Види ушкоджень білячої клітки АД</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>1.3 Причини і наслідки ушкоджень білячої клітки АД</u>	16	
<u>1.4 Способи діагностики ушкоджень білячої клітки АД</u>	19	
<u>1.5 Огляд сучасної літератури стосовно проблематики</u>		
<u>ушкоджень білячої клітки АД</u>	21	
<u>1.6 Висновки до розділу 2</u>	42	
<u>Розділ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБРИВУ</u>		
<u>СТРИЖНЯ РОТОРА В БІЛЯЧІЙ КЛІТЦІ АСИНХРОНОГО</u>		
<u>ДВИГУНА</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>2.1 Параметри двигунів та математична модель стрижнів</u>		
<u>ротора</u>	Ошибка! Закладка не определена.	
<u>2.2 Алгоритм розрахунку параметрів схеми заміщень білячої</u>		
<u>клітки АД</u>	Ошибка! Закладка не определена.	
<u>2.3 Висновки до розділу 2</u>	Ошибка! Закладка не определена.	
<u>Розділ 3 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ОБРАХУНКУ СТРУМІВ</u>		
<u>ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ У СТРИЖНЯХ ТА КОРОТКОЗАМИКАЮЧИХ</u>		
<u>КІЛЕЦЬ</u>		54
<u>3.1 Аналіз термомеханічних напружень в непошкодженій</u>		
<u>білячій клітці АД в номінальному режимі роботи</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>3.2 Вихідні дані розрахунків, струми перевантаження при</u>		
<u>обриві стрижня ротора серії двигунів 4А355</u> Ошибка! Закладка не определена.		
<u>3.3 Аналіз термомеханічних напружень в білячій клітці АД</u>		
<u>під час його прямого пуску при пошкодженні трьох стрижнів</u> Ошибка! Закладка не определена.		

3.4 Вихідні дані розрахунків, струми перевантаження при обриві коротко замикаючого кільця серії двигунів 4A3556	
3.5 Висновки до розділу 3	75
Розділ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	76
4.1 Опис ідеї проекту	76
4.2 Приблизні фінансові розрахунки проекту	Ошибка! Закладка не определена.
4.3 Висновки до розділу 4	7Ошибка! Закладка не определена.
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
Перелік посилань	83

Перелік скорочень

СКК – сегмент коротко замикаючого кільця

АД – асинхронний двигун

Вступ

Асинхронні двигуни серії 4А, що використовуються в різноманітних промислових та технічних застосуваннях, відіграють ключову роль у сучасній технологічній інфраструктурі. Проте, незважаючи на їхню важливість, ушкодження обмоток роторів є серйозною проблемою, яка може призвести до збоїв у роботі обладнання та непередбачених витрат на ремонт чи заміну.

У цьому звіті розглядається сучасний стан проблематики ушкоджень обмоток роторів асинхронних двигунів серії 4А. Розділ 1 присвячений огляду та аналізу факторів, що впливають на появу ушкоджень в білячій клітці таких двигунів. Починаючи з першого розділу, дослідження ставить за мету розкрити сучасні тенденції та основні причини виникнення проблем у цій області, що дозволить визначити потенційні шляхи покращення якості та надійності роботи асинхронних двигунів.

Збільшення рівня розуміння та усунення факторів, що спричиняють ушкодження обмоток роторів, має велике значення для підвищення технічної ефективності та економічної доцільності експлуатації асинхронних двигунів. Ця дисертація пропонує глибокий аналіз та ретельне вивчення цієї проблеми з метою вдосконалення технічних засобів її протидії та попередження виникнення ушкоджень, що можуть стати перешкодою для ефективної експлуатації промислового устаткування.

Сучасний стан проблематики ушкоджень обмоток роторів асинхронних двигунів серії 4А є особливо актуальним, оскільки ці двигуни широко використовуються у різноманітних галузях промисловості та техніки. Вони є невід'ємною частиною сучасних виробничих ліній, транспортних систем, електроприводів, насосних установок, а також в енергетичному секторі.

Ключові функції, які вони виконують, включають забезпечення руху механізмів, транспортування матеріалів, надання потужності різним пристроям і устаткуванню. Вони також використовуються для забезпечення роботи електричних систем у житловому та комерційному будівництві. У

сучасному світі асинхронні двигуни серії 4А є важливим елементом інфраструктури, який забезпечує ефективну роботу широкого спектру технічних систем. [1]

Розуміння та вирішення проблем, пов'язаних з ушкодженням обмоток роторів цих двигунів, має велике значення для забезпечення безперебійної роботи виробничих ліній, економії ресурсів та підвищення загальної ефективності виробництва.

Метою даної дипломної роботи є дослідження впливу ушкоджених стрижнів ротора та сегментів короткозамикаючих кілець (СКК) асинхронного двигуна на роботу, нагрів та струми перевантаження у сусідніх стрижнях, та СКК.

Об'єкт дослідження. Дослідження проводилось серед двигунів АД серії 4А потужністю 7.5 315 кВт, а саме: 4А112М2У3, 4А180М2У3, 4А250М2У3, 4А355М2У3, 4А355М4У3, 4А355М6У3, 4А355М8У3.

Предмет дослідження. Розподіл струмів по елементах білячої клітки.

Методи досліджень. Розрахунок за допомогою програми Multisim моделі обриву стержня роторів АД і подальший аналіз результатів.

Теоретична і практична цінність отриманих результатів. В даній роботі представлені отримані результати, що відображені у вигляді взаємозв'язку між кількістю пазів, полюсністю, потужністю та величинами струмів що проходить у сусідніх ушкоджених елементах. Практична цінність даних результатів полягає в тому що їх можна використати на етапі проектування двигуна, оскільки вони дозволяють спрогнозувати надійність білячої клітки завдяки опосередкованому визначенню значень перевантажень за струмом у сусідніх стрижнях.

Наукова новизна

1. Розроблено принципову схему для дослідження обриву стрижнів роторів та СКК АД при різних ушкодженнях.
2. Визначено перевантаження струмів для різних типів асинхронних двигунів.

3. Визначено тенденції стосовно можливих величин коефіцієнтів перевантажень струмів при зміні кількості зубців, полюсності та потужності.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що отримані у роботі, отримані у співавторстві з науковим керівником. Зокрема здобувачем розроблялися схеми асинхронних двигунів в програмі multisim. Виконувалася обробка та аналіз всіх отриманих даних

Основні результати дослідження. Залежності величин ударних струмів в сусідніх елементах від кількості зубців, полюсності та потужності двигуна.

Публікації. За темою роботи опубліковано 3 статті [17], [18], [19].

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМАТИКИ УШКОДЖЕНЬ БІЛЯЧОЇ КЛІТКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

1.1 Складні умови експлуатації АД

Експлуатація асинхронних двигунів включає в себе роботу в різноманітних умовах, які можуть бути вкрай різноманітними та складними. Деякі з цих умов включають:

Навантаження: Асинхронні двигуни використовуються для приводу різноманітного обладнання з різними рівнями навантаження. Вони можуть працювати як у легких, так і важких режимах, що може вплинути на їхню тривалість служби та стан обмоток роторів.

Середовище: Двигуни можуть експлуатуватися в різних середовищах, таких як виробничі цехи з високим рівнем пилу, хімічних речовин або вологості, що може призвести до корозії та інших форм зносу.

Температура: Температурні умови також можуть варіюватися від низьких до високих температур, залежно від місця розташування двигуна. Екстремальні температури можуть вплинути на роботу і тривалість служби компонентів двигуна.

Напруга та частота живлення: Змінність напруги та частоти живлення також може бути фактором, що впливає на роботу асинхронних двигунів, особливо при використанні в умовах низької якості електропостачання.

Навколишні умови: Відкритий або закритий простір, вологість, пил, вібрація та інші фактори навколишнього середовища можуть впливати на експлуатацію та тривалість служби асинхронних двигунів.

Режими роботи: Асинхронні двигуни можуть працювати у різних режимах, таких як постійний, інтенсивний або періодичний. Ці режими можуть вимагати різних рівнів навантаження та можуть впливати на тепловий режим роботи двигуна.

Загрози зовнішнього пошкодження: Асинхронні двигуни, що встановлені у відкритих просторах або на відкритих майданчиках, можуть бути піддані ризику пошкодження від непогодних умов, вандалізму або випадкових ударів.

Необхідність постійного моніторингу: З огляду на велику кількість можливих умов експлуатації та ризиків, пов'язаних з ними, необхідно систематично проводити моніторинг стану асинхронних двигунів. Це може включати в себе вимірювання температури, струмів, вібрації та інших параметрів, а також візуальний огляд та діагностику.

Підвищена вимога до надійності: У багатьох випадках асинхронні двигуни використовуються у критичних сферах, де недоліки або відмови можуть призвести до серйозних збитків. Тому вимоги до надійності та безперебійної роботи таких систем є вкрай високими. [2]

Враховуючи ці складні умови експлуатації, важливо проводити систематичний моніторинг, обслуговування та вчасні заходи з попередження пошкоджень, що допоможе зберегти ефективність та надійність роботи асинхронних двигунів.

Загальною метою управління експлуатацією асинхронних двигунів є забезпечення їхньої надійності, продуктивності та безпеки при будь-яких умовах експлуатації. Для досягнення цієї мети необхідно ретельне планування, систематичний моніторинг та ефективне управління технічним обслуговуванням.

1.2 Види ушкоджень білячої клітки АД

Ушкодження білячої клітки асинхронного двигуна можуть бути різноманітними та виникати з різних причин. Деякі з найпоширеніших видів ушкоджень включають:

Корозія: Експозиція до вологості або агресивних хімічних середовищ може спричинити корозію білячої клітки. Це може призвести до зниження міцності матеріалу та появи тріщин, що загрожує стабільності та ефективності роботи двигуна.

Механічні пошкодження: Удари, вібрація або неправильне монтажне обладнання можуть призвести до механічних пошкоджень білячої клітки. Це може включати тріщини, вигини або інші деформації, які можуть впливати на ефективність та безпеку роботи двигуна.

Перегрів: Надмірне нагрівання білячої клітки може виникнути через перевантаження двигуна, низьку якість повітряного потоку для охолодження або неправильну роботу системи охолодження. Це може призвести до плавлення і пошкодження ізоляції проводів та інших компонентів, що може викликати коротке замикання та інші серйозні проблеми.

Електричні пошкодження: Різка зміна напруги чи струму може спричинити перенапругу, яка може пошкодити ізоляцію обмоток білячої клітки. Це може призвести до пробойів та коротких замикань, що може викликати серйозні проблеми для роботи двигуна.

Вібрація: Постійна вібрація під час експлуатації може призвести до послаблення кріплення білячої клітки або навіть до руйнування частини. Це може спричинити ненормальні шуми, вібрацію та загальне погіршення ефективності роботи двигуна.[3]

1.3 Причини і наслідки ушкоджень білячої клітки АД

Корозія:

Причини корозії білячої клітки можуть бути різноманітними, включаючи експозицію до вологи, агресивних хімічних речовин або навіть недосконалості у конструкції, які сприяють утворенню зони, в якій корозія може початися. Наприклад, у промислових середовищах з високим рівнем вологості або присутністю агресивних хімічних речовин, таких як кислоти або солі, швидкість корозії може значно збільшуватися. Крім того, недоліки у покритті або захисних шарах на поверхні білячої клітки також можуть сприяти утворенню корозії.

Наслідки корозії можуть бути серйозними, включаючи зниження міцності матеріалу та виникнення тріщин, що може призвести до втрати стабільності та ефективності роботи двигуна. Крім того, корозія може

спричинити витікання ізоляції, коротке замикання або навіть пробоїв, що може призвести до серйозних аварій та збитків. Важливо систематично контролювати та попереджувати корозію шляхом застосування відповідних захисних покриттів та регулярного технічного обслуговування.

Механічні пошкодження:

Механічні пошкодження можуть виникати внаслідок ударів, вібрації або неправильного монтажу двигуна. Удари або вібрація можуть призвести до тріщин, вигинів або інших деформацій, особливо у важких умовах експлуатації, таких як промислові або будівельні сайти. Неправильний монтаж, недостатнє кріплення або неякісні матеріали також можуть сприяти механічним пошкодженням білячої клітки.

Наслідки механічних пошкоджень можуть бути важкими, включаючи зниження ефективності, відмову в роботі та навіть можуть призвести до аварій. Такі пошкодження можуть стати джерелом недоліків, що вимагатимуть складних та витратних ремонтних робіт. Для запобігання механічним пошкодженням важливо виконувати правильний монтаж та регулярне технічне обслуговування.

Перегрів:

Перегрів білячої клітки може статися через різні причини, включаючи перевантаження двигуна, неправильне функціонування системи охолодження, низьку якість електропостачання або неправильне вентиляційне забезпечення. Під час перегріву виникає підвищення температури білячої клітки, що може призвести до плавлення ізоляції обмоток, деформації матеріалів та загального погіршення ефективності роботи двигуна. Перегрів може бути особливо шкідливим для двигунів, які експлуатуються в інтенсивних режимах або в умовах обмеженого охолодження.

Наслідки перегріву можуть бути серйозними та призвести до витрат на ремонт, а також до значних збитків у виробництві або інших сферах застосування. Плавлення ізоляції може призвести до коротких замикань, а

отже, до аварійного відключення двигуна та припинення процесів виробництва. Перегрів також може вплинути на термін служби двигуна та вимагатиме додаткових витрат на обслуговування та заміну компонентів.

Електричні пошкодження:

Електричні пошкодження білячої клітки можуть виникати внаслідок різкого зміни напруги, струму чи частоти живлення. Причинами таких пошкоджень можуть бути перенапруги в мережі, несправності у системах регулювання напруги, а також неправильне підключення чи експлуатація двигуна. Електричні пошкодження можуть призвести до пробоїв і коротких замикань в обмотках білячої клітки, що може призвести до серйозних аварій та збитків. Для попередження електричних пошкоджень важливо встановлювати стабілізатори напруги, перевіряти параметри електромережі та виконувати правильну експлуатацію та обслуговування двигуна.

Вібрація:

Причини вібрації можуть бути різноманітними, включаючи несиметрію або погане кріплення самого двигуна, невірно підібрані або зношені опори, неправильне збирання або обслуговування. Постійна вібрація може призвести до послаблення кріплення білячої клітки або навіть до її руйнування в результаті статичного або динамічного перевантаження. Крім того, вібрація може спричинити пошкодження ізоляції, коротке замикання та інші несправності, що може призвести до неправильної роботи двигуна та аварійного відключення.

Наслідки вібрації можуть бути важкими та призвести до значних збитків, включаючи прострочені ремонти та зупинку виробництва. Постійна вібрація може призвести до прискореного зносу компонентів, збільшення шуму та вібрації в машинному обладнанні, а також до загрози безпеці персоналу. Важливо систематично контролювати та вирішувати проблеми вібрації шляхом правильного монтажу, обслуговування та регулярної перевірки стану опорної системи двигуна.

Навколишні умови:

Навколишні умови, такі як вологість, температура, пил, агресивні хімічні середовища та інші, можуть бути причиною ушкоджень білячої клітки. Вологість та пил можуть сприяти корозії та зносу компонентів, тоді як екстремальні температури можуть призвести до перегріву або замерзання систем охолодження. Агресивні хімічні середовища можуть руйнувати ущільнювальні матеріали та ізоляцію, що може призвести до проникнення вологи або замикань.

Наслідки навколишніх умов можуть варіюватися в залежності від типу умов та ступеня впливу. Вони можуть включати в себе збільшену ймовірність корозії, зниження міцності матеріалу, погіршення ефективності та тривалості служби компонентів, а також загрозу безпеці установки. Щоб запобігти ушкодженням внаслідок навколишніх умов, важливо вжити заходів з захисту та забезпечення належного технічного обслуговування двигуна. [4]

Знання та розуміння цих потенційних ушкоджень допоможе підвищити ефективність та тривалість служби асинхронного двигуна шляхом вчасного виявлення, попередження та ремонту пошкоджень.

1.4 Способи діагностики ушкодження білячої клітки АД

Першим і одним із найпоширеніших методів діагностики є візуальний огляд. Це включає огляд зовнішнього стану двигуна, пошук слідів корозії, механічних пошкоджень або ознак перегріву. Візуальний огляд може дати загальне уявлення про стан білячої клітки та допомогти визначити, чи потрібно проводити більш детальні дослідження.

Другий метод - вимірювання електричних параметрів двигуна. Це включає вимірювання опору обмоток, ізоляційного опору, струмів навантаження та інших параметрів, які можуть вказувати на проблеми з білячою кліткою. Наприклад, збільшення опору обмоток може свідчити про пошкодження ізоляції або проблеми з контактами.

Третій метод - використання діагностичних пристроїв. Сучасні технології дозволяють використовувати спеціальні пристрої для моніторингу та діагностики стану асинхронних двигунів. Ці пристрої можуть вимірювати

параметри в реальному часі, а також аналізувати дані для виявлення потенційних проблем.

У цьому розділі я навів лише кілька методів діагностики ушкоджень білячої клітки асинхронних двигунів. Важливо розуміти, що кожен метод має свої переваги та обмеження, і часто комбінація декількох методів дозволяє отримати більш точну діагностику.

Крім перерахованих методів, також варто згадати про діагностику за допомогою звукових та вібраційних сигналів. Використання акустичних датчиків або вібраційних сенсорів може допомогти виявити аномальні шуми чи вібрацію, що можуть бути зв'язані з ушкодженням білячої клітки. Аналіз цих сигналів дозволяє виявити навіть найдрібніші ознаки проблеми та вчасно реагувати на неї.

Додатково, діагностика теплового стану може бути ефективним методом виявлення ушкоджень білячої клітки. Вимірювання температури різних частин двигуна може допомогти виявити нерівномірне нагрівання, що може бути показником несправності в обмотках або ізоляції.

Необхідно також зазначити діагностику за допомогою інфрачервоних камер. Цей метод дозволяє виявляти зони підвищеного нагріву, що може свідчити про проблеми з ізоляцією або перегрівом обмоток. Використання інфрачервоних камер дозволяє проводити діагностику на великих відстанях та у важкодоступних місцях. [5]

Загальна рекомендація полягає у використанні комплексного підходу до діагностики ушкоджень білячої клітки асинхронних двигунів. Кожен з методів має свої переваги та обмеження, тому їх комбінація дозволить отримати найбільш повну та достовірну інформацію щодо стану двигуна.

1.5 Огляд сучасної літератури стосовно проблематики ушкоджень білячої клітки АД

Перед знайдення теми для магістерської дисертації було оглянуто як і національні статі так і закордонні. Увагу було більше приділено ушкодженням електродвигунів. Із цікавих тем були дисбаланс ротора як і поперечний так і поздовжній, ушкодження крильчатки охолодження, шуми та вібрації підшипників та ушкодження стержнів ротора. На останній темі було акцентовано увагу для подальшої роботи. Нижче наведені 5 статей які описують проблематику даних ушкоджень та розроблені ідеї для їх вирішення.

У першій статі наведений експериментальна збірка (установка) імітація обриву стержня білячої клітки асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Ця машина була побудована таким чином що ротор переналаджується, а також литий алюмінієвий короткозамкнений ротор який був протестований, та взяті до уваги переваги швидкої та легкої реконструкції двигуна для створення бажаної несправності статора і ротора, або їх комбінації. Також перевагою використання двигуна який має здатність реконструкції усуває необхідність безповоротно руйнувати компоненти машини, такі як фазні обмотки статора і короткозамкнені стержні ротора. Ідея про те, що універсальність цих двигунів дозволяє ефективно збирати великі обсяги даних для аналізу в різних умовах. На даному етапі роботи ступінь несправностей обмежується міжвитковим замиканням обмотки статора та стержнів обмотки статора через те, що вони охоплюють близько 40% усіх несправностей у двигунах.

Литий короткозамкнений ротор використовувався для створення бази даних характеристик здорового двигуна за струмом і напругою струму та напруги, а також спектрів швидкого перетворення Фур'є та профілі кутів розмаху маятникових коливань.

Робота складається у три етапи. Перший розділ розповідає про концепцію проектування та методологію побудови реконфігурованого асинхронного двигуна.

У другому розділі представлено експериментальну установку рис. 1.1 та результати випробувань, отримані в умовах нормальної експлуатації з використанням як литої, так і реконфігурованої короткозамкненої клітки. Цей розділ також містить результати досліджень несправностей операцій при пошкодженнях обмотки статора.

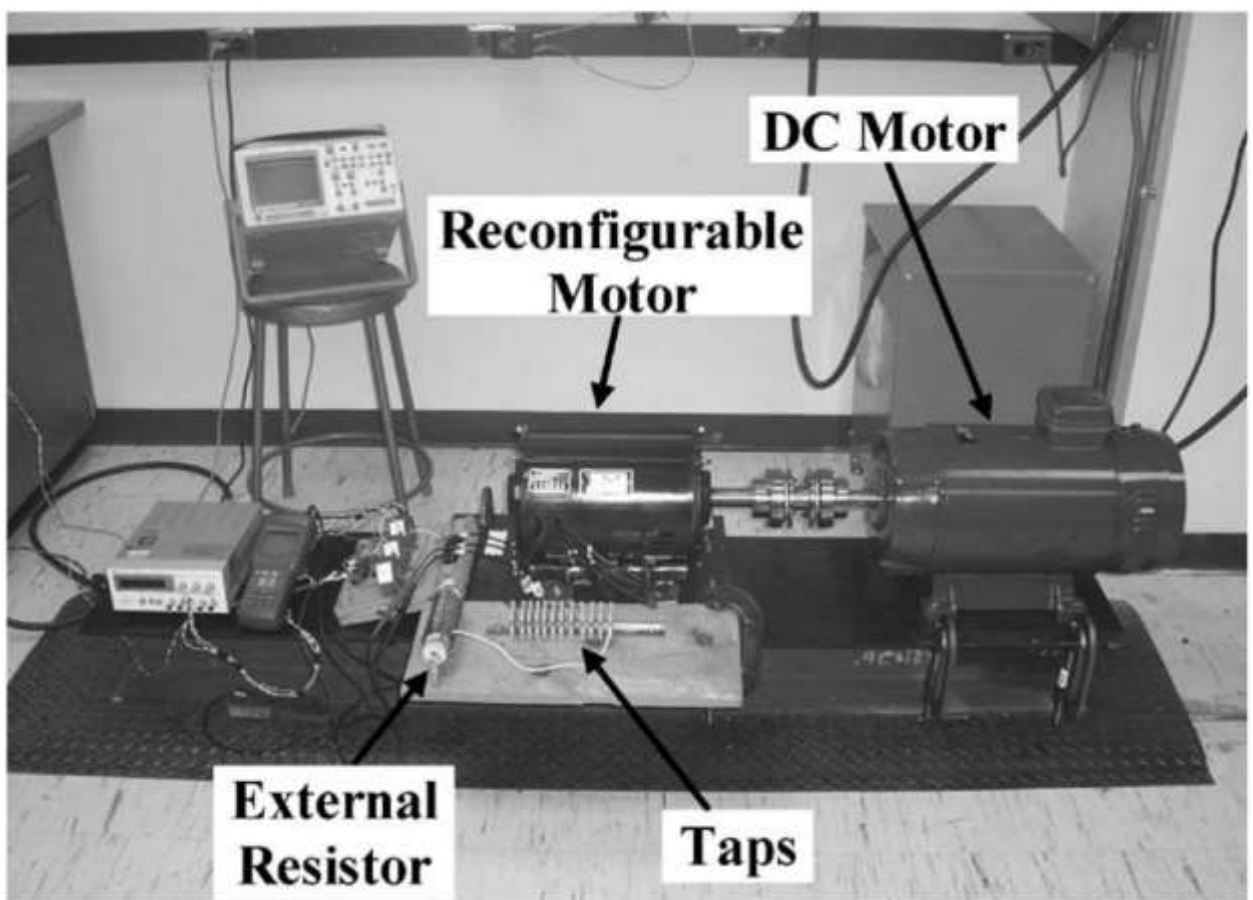


Рисунок 1.1 - Експериментальна установка [6]

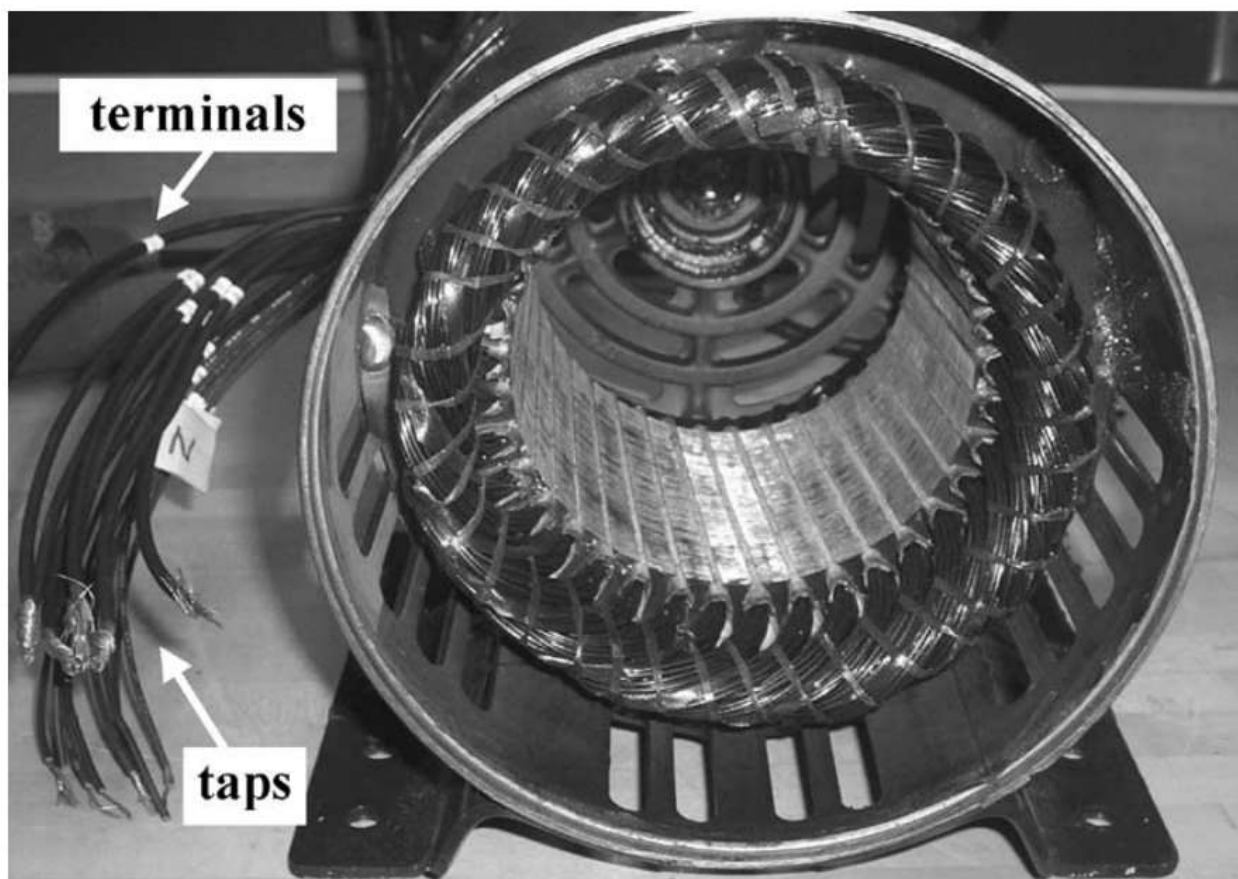


Рисунок 1.2 - Перекіс статора з котушками обмотки та відводами [6]

Сердечник статора складається з 36 пазів, тобто в цій машині є шість пазів на полюс (для шестиполосного двигуна) і два пази на полюс на фазу. Поперечний переріз двигуна зображений на рис. 1.2. Для мінімізації ефекту зубчастого моменту, що виникає через просторових гармонік, що виникають через геометричну конфігурацію магнітопроводу та ефектів розташування обмоток, осердя статора було перекошене на один крок пазів на 30° . Перекошений статор разом з котушками обмотки показано на рис. 1.2. При цьому фазні обмотки фазні обмотки статора двошарові, з'єднані внахлест короткозамкненими котушками, кожна з яких має крок 150° . Причиною перекоосу статора, а не ротора було полегшити демонтаж стержнів клітки ротора, для емуляції несправності ротора.

Експериментальні результати, отримані при виткових замиканнях статора, показують, що реконфігурований двигун успішно імітує виткові замикання статора, що додатково підтверджується двома методами

діагностики: явищем маятникових коливань і концепцією компонента від'ємної послідовності.

Повний набір результатів випробувань, включаючи здоровий сердечник ротора з використанням ротора, виготовленого методом лиття під тиском та емуляції несправності зламаного стрижня ротора з використанням реконфігурованого ротора. Було виявлено, що на основі аналізу бічних смуг спектра струму спектра струму та аналізу кута розмаху маятникових коливань магнітного поля встановлено, що електричні поверхневі контакти між стрижнями і торцевими кільцями в реконфігурованій клітці та електричні короткі замикання між стрижнями і матеріалом ламінації є проблемою, що призводить до виникнення проблеми, яка призводить до появи індикації обриву стрижнів там, де таких обривів немає. Таким чином, ці автори рекомендують, що нинішню концепцію конструкції ротора з можливістю реконфігурації для емуляції обриву стрижнів не можна вважати успішною. [6]

Друга стаття демонструє метод виявлення зламаних стрижнів ротора в асинхронному двигуні.

Після введення спрощеної динамічної моделі асинхронного двигуна з обірваними стрижнями короткозамкненого ротора в системі відліку поля, що дозволяє спостерігати його внутрішні стани, запропоновано алгоритм виявлення несправностей. Використано дві різні моделі оцінювання двигуна та визначено різницю між їхніми кутами потокозчеплення ротора. Певна частотна складова в цьому сигналі з'являється лише у випадку обриву стрижнів ротора. Таким чином, запропонований алгоритм є достатньо толерантним до зміни навантаження та температури машини, щоб вказати на серйозність несправності. Метод було перевірено на різних робочих точках за допомогою моделювання, а також експериментально. Виявлення несправностей є надійним навіть у випадках, коли традиційні методи дають неоднозначні результати.

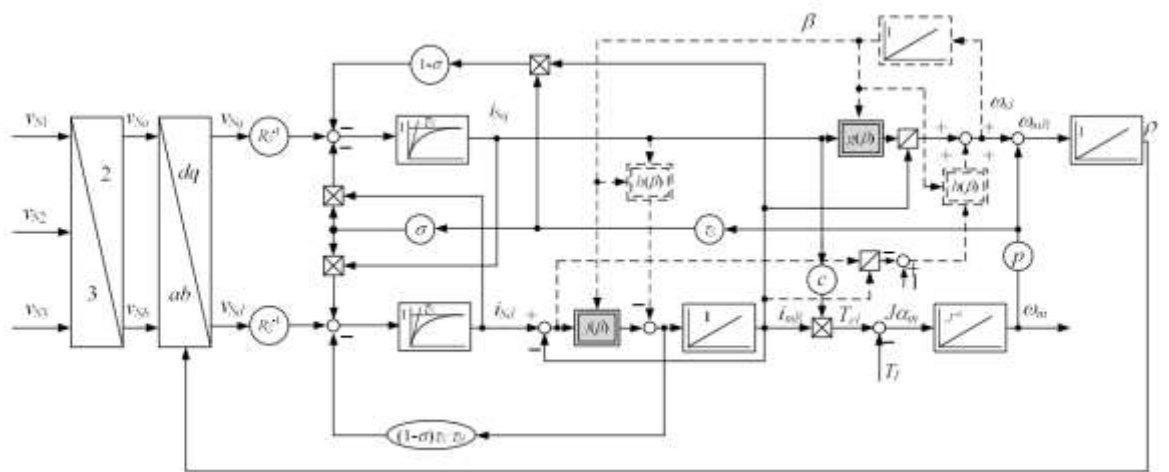


Рисунок 1.3 - Спрощена структурна схема асинхронного двигуна з обірваними стрижнями ротора в системі відліку поля ротора; у випадку здорового ротора пунктирні лінії та блоки опущені, а блоки сірого кольору набувають значення C_{temp}/τ_R [7]

Незважаючи на те, що спрощена модель індукційного двигуна (рис.1.3) надає інший погляд на роботу двигуна під час відмов та/або коливань навантаження, вона не забезпечує прямого способу виявлення відмов роторного підшипника. Однак існує модель, за допомогою якої можна отримати правильну частоту ковзання ω_{sl} та намагнічуючий струм I_{mR} без точних знань параметрів ротора. Модель оцінки ів ґрунтується на вимірах напруги та струму статора (див. рис. 1.4, нижня частина). Замість відомого проблематичного відкритого інтегратора, який присутній в рівняннях статора, застосовується його закритий варіант. Однак його можна замінити також першим порядком запізнення. Ця модель в основному використовується для бездатчикової оцінки намагнічуючого струму ротора I_{mR} . У нашому випадку потрібний лише кут роторного потоку ρ ; отже, чинник L_R/L_m^2 , який присутній в рівняннях I_{mR} , не має значення, що робить модель незалежною від будь-яких параметрів ротора. За допомогою цієї моделі можна отримати правильні значення намагнічуючого струму та кутових частот ковзання (останній шляхом диференціювання різниці між кутом роторного потоку ρ та кутом ротора ϵ_m) як для здорового, так і для

несправного двигуна, з чи без коливань навантаження, припускаючи відомі параметри статора в моделі *iv*.

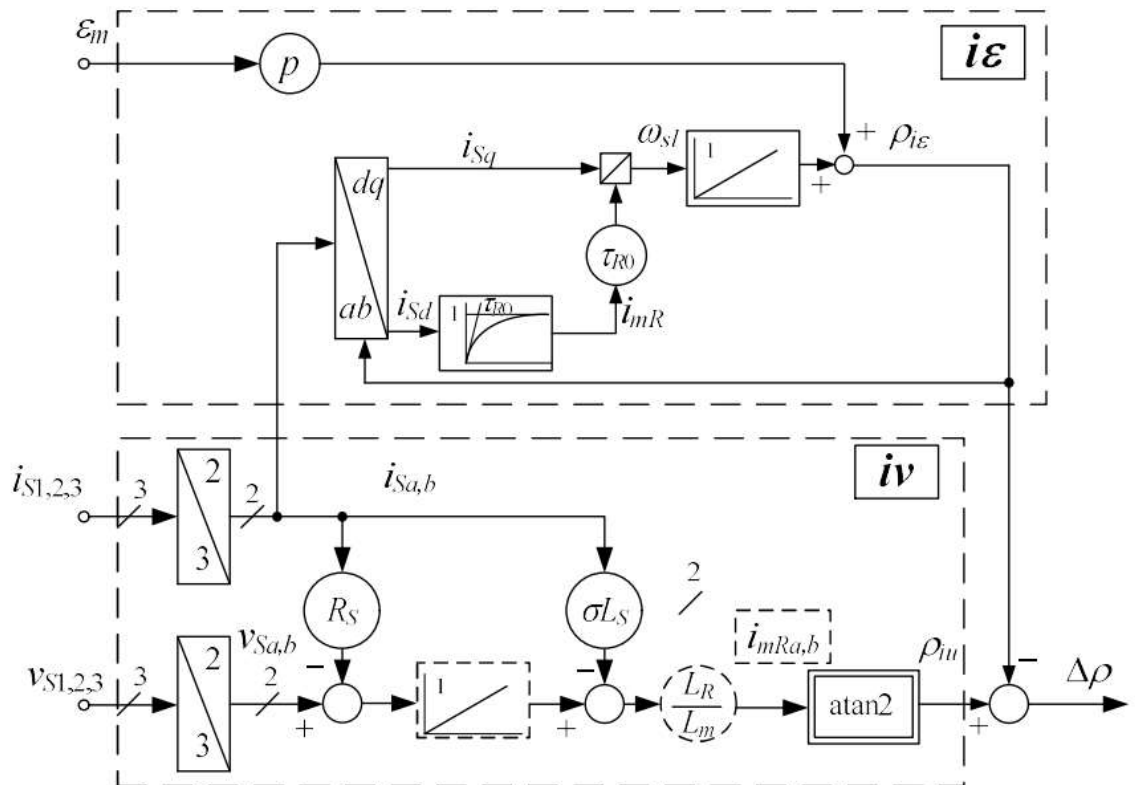


Рисунок 1.4 – Струмovo-напругова (*iv*) модель АД з параметрами статора та струмово-кутова (*ie*) модель з початковим τ_{R0} неушкодженого двигуна [7]

У наступній статті ми пропонуємо схему он-лайн моніторингу для виявлення зламанних стрижнів ротора на асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором ІФОС. асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором. Змінна частота обертання приводу ускладнює використання класичних методів спектрального аналізу. Запропонована схема моніторингу на основі моделі не покладається на спектральні методи; натомість вона відстежує ретельно відібраний стан асинхронного двигуна за допомогою он-лайн спостерігача. Ключовим моментом у виявленні несправностей є виявлення несправностей є розробка спрощеної динамічної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зі зламанними стрижнями ротора, а також вибір, на основі методів диференціально-

геометричної теорії диференціально-геометричної теорії, стану асинхронного двигуна для моніторингу. Чисельне моделювання дуже різних двигунів підтверджує правильність модель і схему моніторингу.

Пошкоджені роторні стрижні спричиняють порушення магнітного поля в індукційних машинах. Ці неоднорідні компоненти магнітного поля впливають на крутний момент машини та кінцеві величини статора, і тому їх можна виявити за допомогою систем моніторингу. До цього часу для виявлення пошкоджених роторних паличок було запропоновано різні методи. Найвідомішим підходом є метод аналізу сигнатур струму двигуна (MCSA) без використання моделі. Цей метод перевіряє у частотній області бічні складові навколо основної складової статорних струмів. Головним недоліком методу MCSA є те, що він ґрунтується на інтерпретації частотних складових спектру струму статора, які впливають багато факторів, включаючи електричне живлення, статичні та динамічні умови навантаження. Ці умови можуть призвести до помилок у завданні виявлення несправностей. З іншого боку, практичною перевагою MCSA є те, що потрібно виміряти лише струми статора. Були запропоновані методи нечіткої логіки та нейронних мереж, щоб вирішити проблему невизначеності частотних складових, пов'язаних із навантаженням. Метод MCSA був основним підходом для виявлення пошкоджених роторних стрижнів на індукційних двигунах, що працюють у відкритому циклі; проте, техніки спектрального аналізу, застосовні при змінній швидкості.

Серед різних підходів до модельно-заснованого виявлення несправностей великий інтерес викликають геометричні методи. Геометрична теорія має різні переваги, оскільки вона дає більш загальну формулювання проблеми виявлення несправностей. Проте до цього часу геометричні техніки не застосовувалися для вирішення проблеми виявлення пошкоджених роторних стержнях в індукційних двигунах. Запропоноване рішення не ґрунтується на техніках аналізу спектру, але вмістом відслідковує вихідний сигнал генератора, який конструюється відповідно до проекту

функції виявлення несправностей. Решта статті організована наступним чином: Розділ II презентує спрощену модель індукційного двигуна з пошкодженими роторними стрижнями. Розділ III представляє техніку виявлення несправностей. Розділ IV презентує дизайн схеми моніторингу. Та, розділ V містить деякі висновки.

Для застосування модельно-заснованих технік виявлення несправностей необхідно мати моделі з двома важливими характеристиками: простіше для обробки і достатньо детальні для захоплення ефектів несправностей, що нас цікавлять. З цими характеристиками на увазі ми розробляємо модель менш деталізовану, з особливістю, що ефект пошкоджених роторних стержнів враховується шляхом додавання лише одного додаткового стану до класичної моделі індукційного двигуна, таким чином, досягається простота обробки.

Запропонована модель базується на припущенні, що накладення додаткового набору роторних струмів на ті, що зазвичай знаходяться в здоровому двигуні, може симулювати ефект пошкоджених роторних стержнів. Основні припущення узагальнюються наступним чином, див. Рисунок 1.5

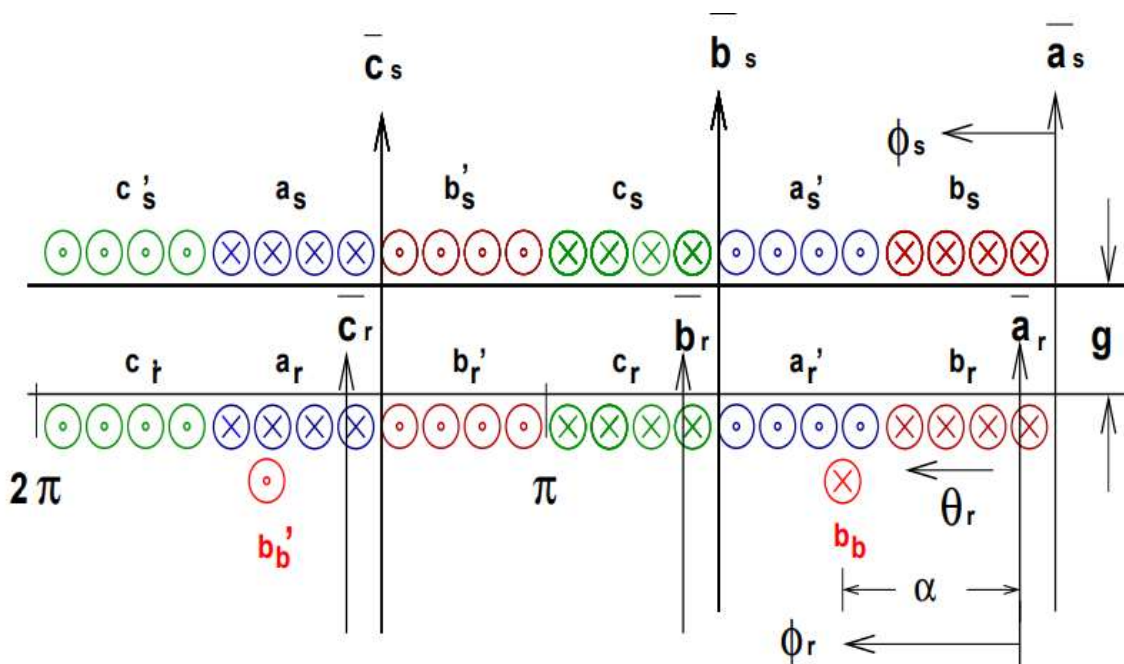


Рисунок 1.5 - Розроблена схема поперечного перерізу [8]

Загальна процедура виявлення, ізоляції та адаптації (FDIA) несправностей в динамічних системах за допомогою аналітичної зайвості складається з наступних трьох кроків:

(a) Генерація функцій, які несуть інформацію про несправності, так звані резидуали;

(b) Прийняття рішення про виникнення несправності та локалізація несправності, так звана ізоляція;

(c) Адаптація несправного процесу до нормальної роботи.

У цій статті основна увага зосереджена на першому кроці.

Резидуали - це величини, які виражають різницю між фактичними виходами об'єкта та тими, які очікувалися на основі застосованих входів і математичної моделі. Ці резидуали отримуються шляхом використання динамічних залежностей між виходами сенсорів та входами приводів. Важливою характеристикою для резидуалів є їхня стійкість відносно впливу помічних несправностей, інакше помічні несправності затемнять роботу резидуалів, діючи як джерело помилкових сповіщень, ускладнюючи другий крок процедури FDIA.

Стаття наводить спрощену модель для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором асинхронного, яка враховує ефект обриву стрижнів ротора. Спираючись на методи диференціальної геометрії, запропоноване рішення на основі моделі для виявлення зламаних стрижнів ротора в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором з приводом від ІГОС. Та чітко показано, що умови моменту навантаження не призведуть до помилок у виявленні, оскільки на детектор несправностей не впливає момент навантаження. Чисельне моделювання дуже різних асинхронних двигунів підтверджують достовірність моделі та ефективність схеми моніторингу.

Також було представлено новий метод діагностики несправностей обриву стрижня ротора та міжвиткових коротких замикань в асинхронних

машинах (АД). Метод ґрунтується на аналізі трифазних змінних струмів статора АД з використанням реконструйованих перетворень фазового простору. На основі трифазних змінних струмів створюються сигнатури кожного типу пошкодження. Отримані сигнатури пошкоджень для нових так званих "видимих сигналів" класифікуються з використанням Моделей Гаусової суміші та байєсівського класифікатора максимальної правдоподібності.

Стаття показує що за минулі десятиліття діагностика несправностей базувалася на аналізі спектральної сигнатури струму статора за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Інші методи включають аналіз вібрації, акустичного шуму, профілю крутного моменту, температури та магнітного поля. Але останнім часом з'явилися нові методи, засновані на підходах штучного інтелекту з використанням таких понять, як нечітка логіка, генетичні алгоритми та нейронні мережі і інші методи.

У статті представлено метод, що базується на аналізі змінного трифазного струму статора для визначення обриву осердя ротора та міжвиткового короткого замикання статора. Дослідження показує, що змінний трифазний струм є потужною характеристикою для класифікації несправностей двигуна.

Цей змінний сигнал витягується з експериментально отриманих сигналів струму статора і використовується в поєднанні з методом ШІ, заснованим на Гаусовій суміші. Він поєднується з методом ШІ на основі змішування і реконструйованого фазового простору для виявлення несправностей двигуна. У цьому методі створюються сигнатури для кожного типу несправності на основі згинаючої трифазних струмів статора. Створення сигнатури для кожного типу несправності на основі згинаючої вхідних трифазних струмів статора. Слід згенерувати вхідний набір трифазних струмів статора, які називаються "невидимими сигналами", і порівняти його з усіма наступними сигнатурами. Вхідні трифазні струми статора, які називаються "невидимими сигналами", порівнюються з усіма

сигнатурами, що представляють кожен тип пошкодження, отриманими з попередньо створеної бази даних.

Він порівнюється з усіма сигнатурами, що представляють кожен тип несправності, отриманими з бази даних. Обчислюється умовна ймовірність між цією новою сигнатурою і кожною раніше вивченою сигнатурою. Умовна ймовірність розраховується між цією новою сигнатурою і раніше вивченими сигнатурами для кожного типу несправності. Таким чином, класифікатор ідентифікує раніше вивчені сигнатури з найбільшою ймовірністю.

Несправності класифікуються. Дослідження показало високу точність класифікації, використовуючи лише пів секунди сигналу трифазного струму. Сигнал струму трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором потужністю 5к.с., напругою 460В, 60Гц, з шістьма полюсами займає приблизно третину часу циклу ковзання при нормальному навантаженні. Це показано і підтверджено експериментальними результатами. Знову ж таки, метод фокусується на двох типах несправностей двигуна. Зокрема, перший тип – це від'єднання осердя ротора, а другий тип - міжвиткове коротке замикання в обмотці статора.

Крім того, представлений метод не тільки класифікує АД як справний або несправний, але й визначає ступінь тяжкості несправності шляхом визначення кількості зламаних стрижнів ротора або відсотка витків обмоток статора. Несправності шляхом визначення кількості зламаних стрижнів ротора або кількості (або відсотка) короткозамкнених витків в обмотках статора. Це є потужним засобом моніторингу серйозності несправностей двигуна, який може передбачити час настання повної відмови двигуна і, таким чином, може допомогти запобігти несподіваних зупинок промислових процесів.

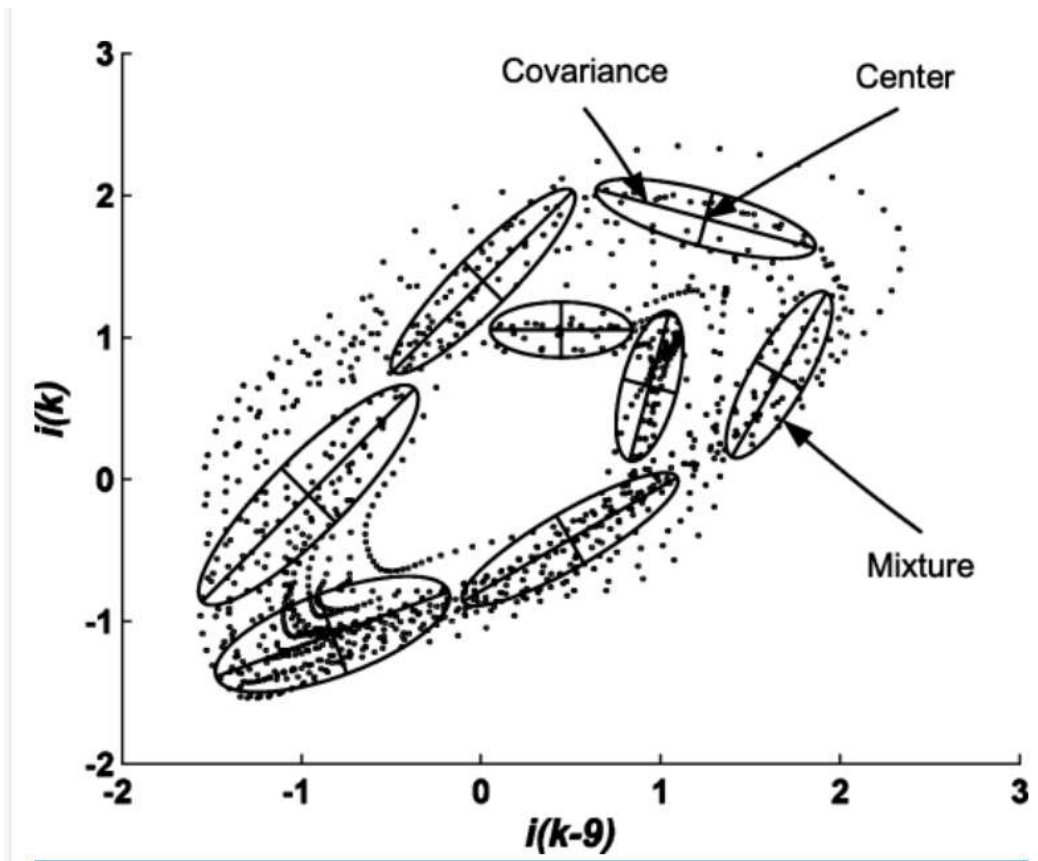


Рисунок 1.6 - Моделі Гауссової суміші трифазної змінного струму статора несправної з вісьмома сумішами, розмірністю, та запізнюванням у часі [9]



Рисунок 1.7 - Лабораторне випробування асинхронного двигуна потужністю 5 к.с. та збір даних [9]

Ця стаття пропонує метод діагностики несправностей для індукційних моторів на основі трьохфазних струмів статора для виявлення пошкоджених роторних паличок та міжвиткових коротких замикань в обмотках статора. Використано ГММ для генерації підписів несправностей, а байєсівський максимально-ймовірнісний класифікатор визначає клас несправності за отриманими підписами. Точність методу свідчить про його потенцій як ефективного інструменту для діагностики несправностей індукційних моторів, включаючи визначення важкості несправності та уникнення непередбачених зупинок виробничих процесів.

Інфрачервона термографія широко використовується протягом десятиліть, наприклад, у сфері обслуговування електрообладнання. Інфрачервона термографія вже кілька десятиліть широко використовується в таких галузях, як технічне обслуговування електрообладнання. Інфрачервона термографія використовується в електромеханічних системах. Застосування інфрачервоної термографії в електромеханічному обладнанні обмежується

виявленню несправностей у стаціонарних машинах, таких як силові трансформатори. Однак її застосування для прогнозування стану електричних машин, що обертаються, та обслуговування електричних машин, що обертаються, досі було обмежене. Однак, коли йдеться про прогнозування стану електричних машин, що обертаються, та обслуговування електричних машин, що обертаються, її застосування значно обмеженіше. Воно більш обмежене. Проте, потенціал цього інструменту почасти завдяки низькій вартості інфрачервоної технології це, принаймні, дуже цікава можливість доповнити діагностику обертових електричних машин. Принаймні, інші відомі методи, такі як аналіз струму і доповнити діагностику іншими відомими методами, наприклад, аналізом даних про струм і вібрацію. Таким чином. Інфрачервона термографія нещодавно продемонструвала потенціал для виявлення несправностей двигуна. Виявлення несправностей двигуна, таких як неспіввісність, погане охолодження, пошкодження підшипників і погані з'єднання. Інфрачервона термографія показала свій потенціал для виявлення таких несправностей двигуна, як перекіс, погане охолодження, пошкодження підшипників і погані з'єднання. У цій статті представлено кілька промислових прикладів, які допомагають проілюструвати ефективність кілька промислових прикладів, які допомагають проілюструвати ефективність цього методу для виявлення несправностей двигуна. У цій роботі представлено кілька промислових прикладів, які допомагають проілюструвати ефективність цього методу для виявлення різних несправностей в асинхронних двигунах. Дані, отримані за допомогою цього методу. Дані, отримані за допомогою цього методу, дали змогу виявити несправності різної природи (електричні, механічні, теплові та інші). Електричні, механічні, теплові та екологічні) можуть бути ідентифіковані. Навколишнє середовище) можуть бути ідентифіковані. Ці дані можуть бути використані для діагностики та діагностики. Ці дані були дуже корисні для доповнення діагностики за допомогою інших приладів.

Інфрачервона термографія є добре відомою технікою в електротехнічній галузі. Протягом десятиліть вона була дуже корисним інструментом для регулярних інспекцій електричних установок та розподільних ліній; наприклад, інфрачервоні камери використовувалися для виявлення дефектів в електричних щитах, кабелях, розподільних апаратах або лічильниках. В області моніторингу стану електричних машин інфрачервона термографія виявилася вибраною опцією для виявлення випадкових несправностей у силових трансформаторах, що працюють на підстанціях, електростанціях та промислових об'єктах. Інтелектуальні методи діагностики несправностей на основі обробки зображень були запропоновані в літературі, засновані на аналізі інфрачервоних зображень трансформаторів. Інфрачервона термографія часто використовується в стандартних оффлайн-тестах для виявлення вад в ізоляції міжпластинних обмоток. Проте, застосування цієї техніки часто обмежується виявленням дефектів з'єднань, зазвичай зовнішніх до машини. Незважаючи на це, інфрачервона термографія є цікавою опцією, оскільки більшість несправностей моторів зазвичай супроводжуються підвищенням температури, яке можна виявити за допомогою аналізу інфрачервоних даних. Крім того, сучасні інфрачервоні пристрої доступні за доступними цінами та мають передові функції, такі як висока роздільна здатність зображення або можливість отримання зображень під час транзитних режимів, що надає цій техніці великий потенціал як джерело інформації для моніторингу стану обертових електричних машин.

Інфрачервоний термографічний метод дозволяє візуалізувати поверхневі температури об'єкта з високою роздільною здатністю та без контакту з об'єктом, тобто не потребує жодних дотиків з об'єктом. Фізична основа методу полягає у перетворенні вимірювань інфрачервоної радіації (зафіксованих за допомогою інфрачервоного детектора) в вимірювання температури. Це відбувається шляхом вимірювання радіації, випромінюваної поверхнею об'єкта у інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра, та подальшого перекладання цих вимірювань в електричні сигнали.

Інфрачервоні детектори є основою систем інфрачервоної термографії, які класифікуються на різні категорії (теплові та напівпровідникові) залежно від використаного детектора. Інфрачервона камера, як правило, складається з оптичних компонентів (об'єктива, дзеркал і т. д.), детекторних елементів, системи охолодження та відповідних електронних пристроїв. Інфрачервоні камери значно еволюціонували протягом останніх десятиліть, від початкових версій на основі скануючих дзеркал до сучасних моделей на базі фокусованих площинних масивів (FPA). Інтересний огляд роботи різних інфрачервоних сенсорів, а також доступної технології в цій галузі можна знайти в літературі.

Як зазначено в деяких дослідженнях, існують певні фактори, які впливають при застосуванні інфрачервоної термографії. Ці фактори можна класифікувати на процедурні (які стосуються термографа), технічні (емісія перевіреного обладнання, зміна навантаження, відстань до об'єкта інспекції, технічні характеристики інфрачервоної камери) та середовищі (температура повітря, вологість, вітер або інша конвекція, сонячне випромінювання і т. д.). Усі ці фактори повинні бути враховані при проведенні інспекції, навіть якщо температури можуть бути виміряні точно. Цікавий аналіз впливу кожного конкретного фактора з практичної точки зору можна знайти в літературі.

Згідно з джерелом, існують дві можливі інфрачервоні вимірювання в залежності від джерела енергії: прямі та непрямі. Прямі вимірювання отримуються при вимірюванні радіації з основного джерела енергії, тоді як непрямі вимірювання проводяться в сусідніх або близьких точках, де тепло передається через провідність, радіацію або конвекцію. Деякі автори визначають прямі вимірювання як ті, де між інфрачервоною камерою та джерелом енергії є мало або жодної теплової ізоляції, тоді як непрямі вимірювання - це ті, де між обома елементами існує значна теплова ізоляція. На загальний погляд, динамічне обладнання або компоненти, такі як двигуни, підшипники, редуктори тощо, аналізуються за допомогою непрямих інфрачервоних вимірювань, оскільки несправності виникають всередині

обладнання. Тому необхідно оцінювати ці елементи, враховуючи як конструктивні, так і середовищі та експлуатаційні аспекти, щоб визначити некоректні температури або тенденції переносу тепла, які інформуватимуть про наявність несправностей що розвиваються.

Деякі автори визначають прямі показання як такі, де теплова ізоляція між інфрачервоною камерою та джерелом енергії ізоляції між інфрачервоною камерою та джерелом енергії, в той час як непрямі - це ті, де між обома елементами є значна теплоізоляція між обома елементами є значною. Рис. ілюструє відмінності між прямим (рис. 1.8 (а)) та непрямим (рис. 1.8 (б)) інфрачервоною термографією.

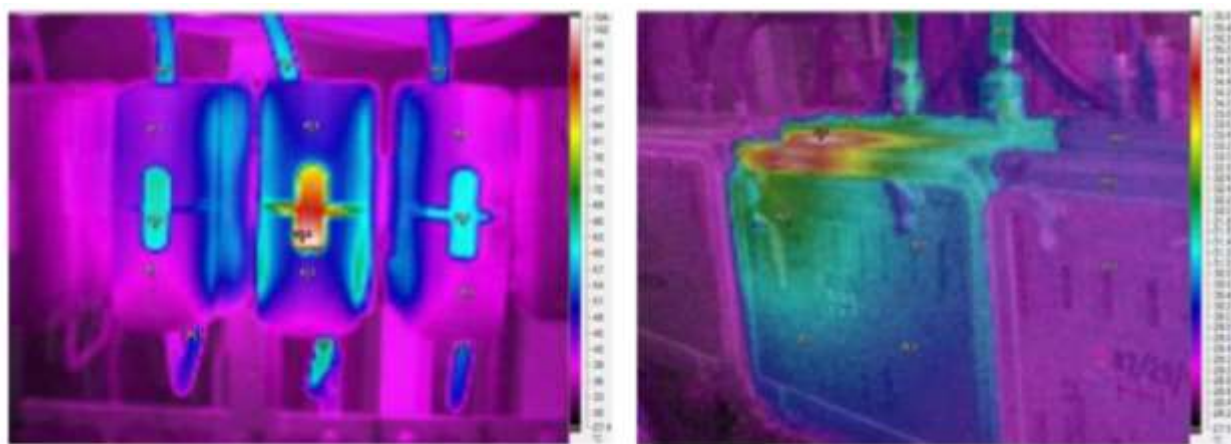


Рисунок 1.8 - Прямі (а) та непрямі (б) інфрачервоні показники [10]

У цьому розділі детально описані найрепрезентативніші випадки; вони допомагають проілюструвати потенціал інфрачервоної термографії для виявлення різних типів несправностей і аномалій. Всі вимірювання проводилися за допомогою однієї і тієї ж інфрачервоної камери (модель Fluke Ti-100) і зі збереженням подібних відстаней до аналізованої машини під час послідовних ревізій. Двигуни, що включені у цю роботу, працювали на постійній швидкості та перебували в рейтингових умовах під час інспекцій. Температура в приміщенні реєструвалася при кожному вимірюванні, щоб виміряні значення можна було належним чином нормалізувати.

Було проведено обстеження на основі інфрачервоної інспекції групи двигунів, що працюють на нафтохімічному заводі. У двадцяти з цих машин

інфрачервона термографія показувала наявність аномальних значень температури або неправильних термічних зразків, які свідчили про наявність різноманітних видів аномалій і несправностей. Ці аномалії мали різне походження, а саме; дванадцять були віднесені до механічних проблем (недостатня змащеність підшипників, пошкоджені підшипники, недостатня затяжка ременів і перевантаження в експлуатації), шість були пов'язані з електричними причинами (дефективні з'єднання, проблеми з обмотками і пошкодження ротора), п'ять мали теплове походження (заблоковані охолоджуючі канали), а одна була пов'язана з екологічними чинниками (забруднення мастилом).

Цей низьковольтний двигун, який приводив насос для змащення підшипника, виявив перегрів через перешкоду в охолоджуючих каналах. Після очищення каналів температура рами різко знизилася з 70°C до 30-40°C. Інфрачервона термографія дозволила виявити причину проблеми.

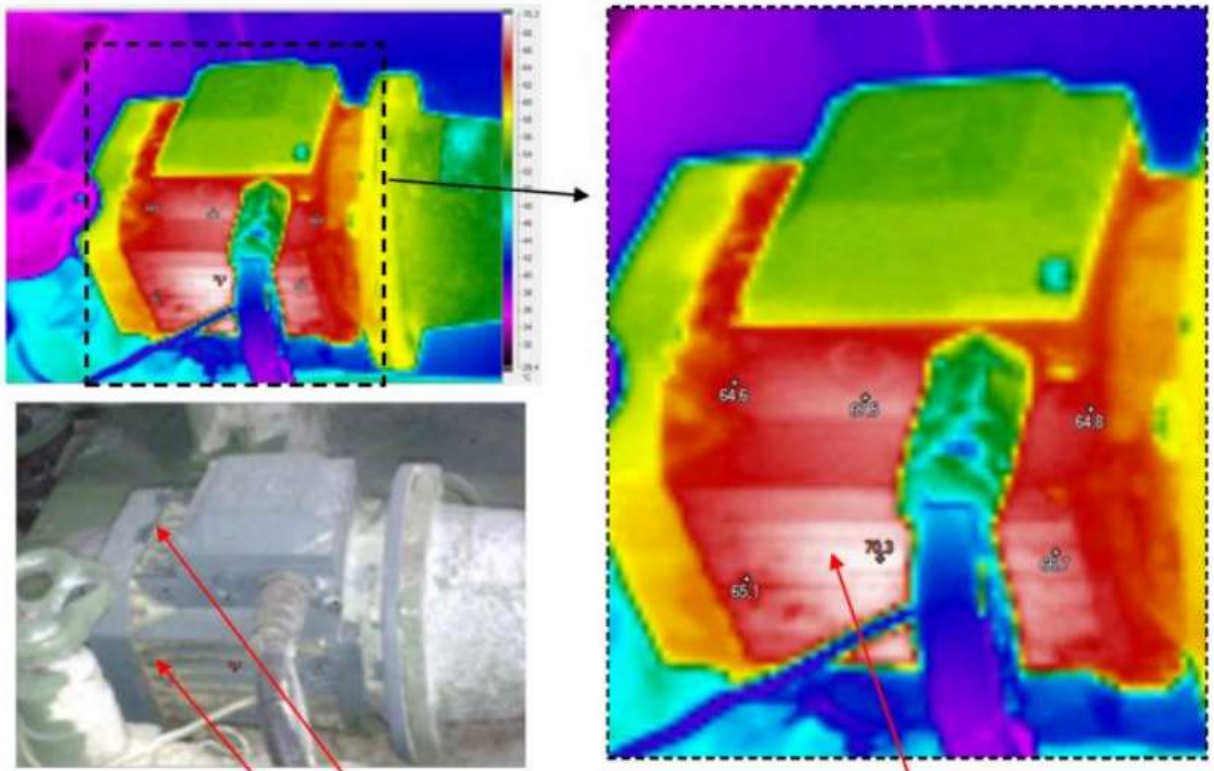


Рисунок 1.9 - Двигун до очищення охолоджуючих каналів [10]

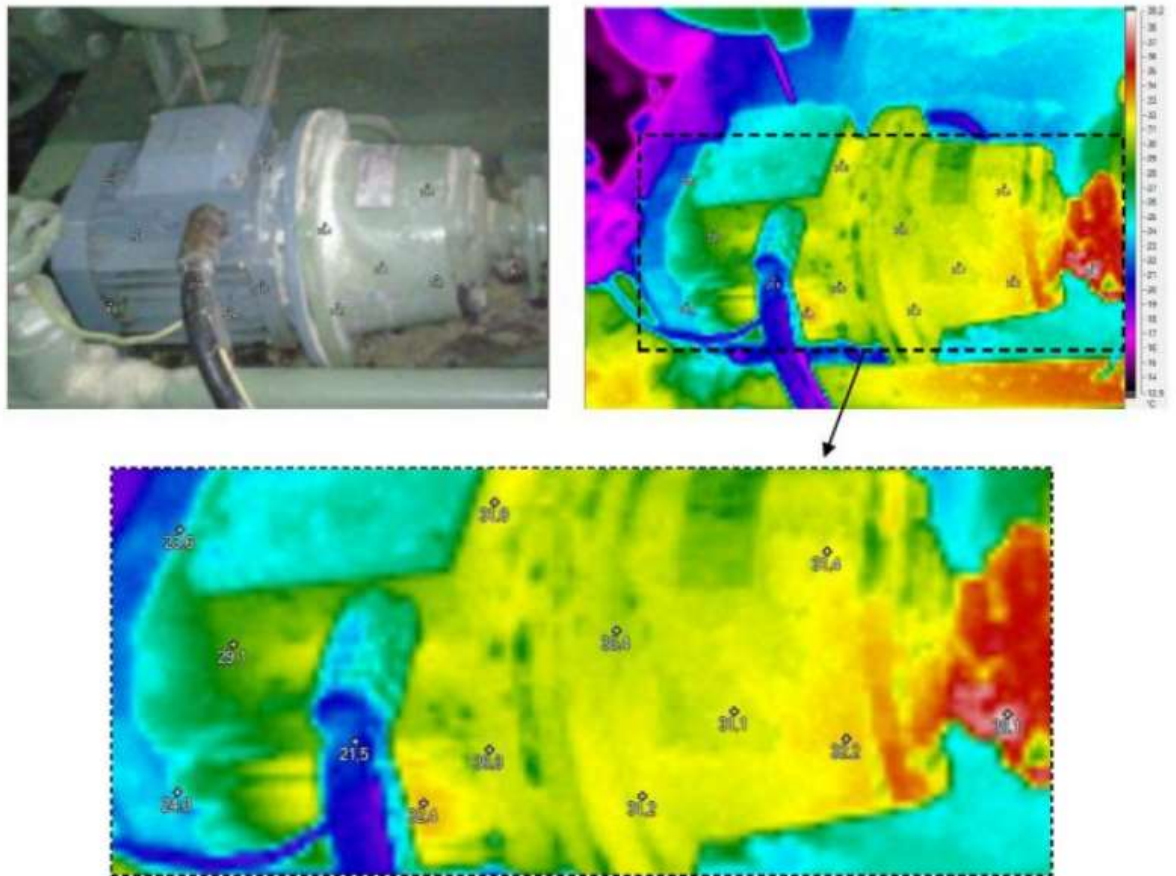


Рисунок 1.10 - Двигун після очищення [10]

Двигун 5: Двигун вентилятора охолоджувальної вежі (асиметрія обмотки) [10]

У цьому випадку розглядався двигун, який приводив вентилятор охолоджувальної вежі. Інфрачервона інспекція цього двигуна (рис. 1.10) показала значне нагрівання рами двигуна (85,2 °C на поверхні і, ймовірно, понад 100 °C всередині двигуна). Під час інспекції не було виявлено аномалій охолодження. На першому етапі підшипники були змащені та відремонтовані на ремонтному цеху, але зниження температури не спостерігалось.

Потім була проведена інспекція коробки з'єднань двигуна, і було виявлено лише незначну різницю температури між з'єднаннями. Опір обмотки кожної фази був виміряний омметром, і результати були дуже цікаві (див. Таблицю IV, в якій подані результати вимірювань): була виявлена значна асиметрія обмотки між фазами, що призвело до значення Max Delta R практично 9%. Це може свідчити про внутрішні високоомні з'єднання, поламані витки або внутрішні короткі замикання. Це може бути потенційною

причиною аномального випромінювання тепла. Нарешті, було запропоновано переобмотку двигуна.

Отже, перевагою техніки в цьому випадку є те, що вона повідомила про наявність аномалії в обмотці статора і запропонувала подальші дії з обслуговування. Зауважте, що ці аномалії не завжди легко виявляються іншими техніками (наприклад, аналізом струму), тому інформація, надана інфрачервоною термографією, може бути дуже цікавою для запобігання можливих катастрофічних наслідків.

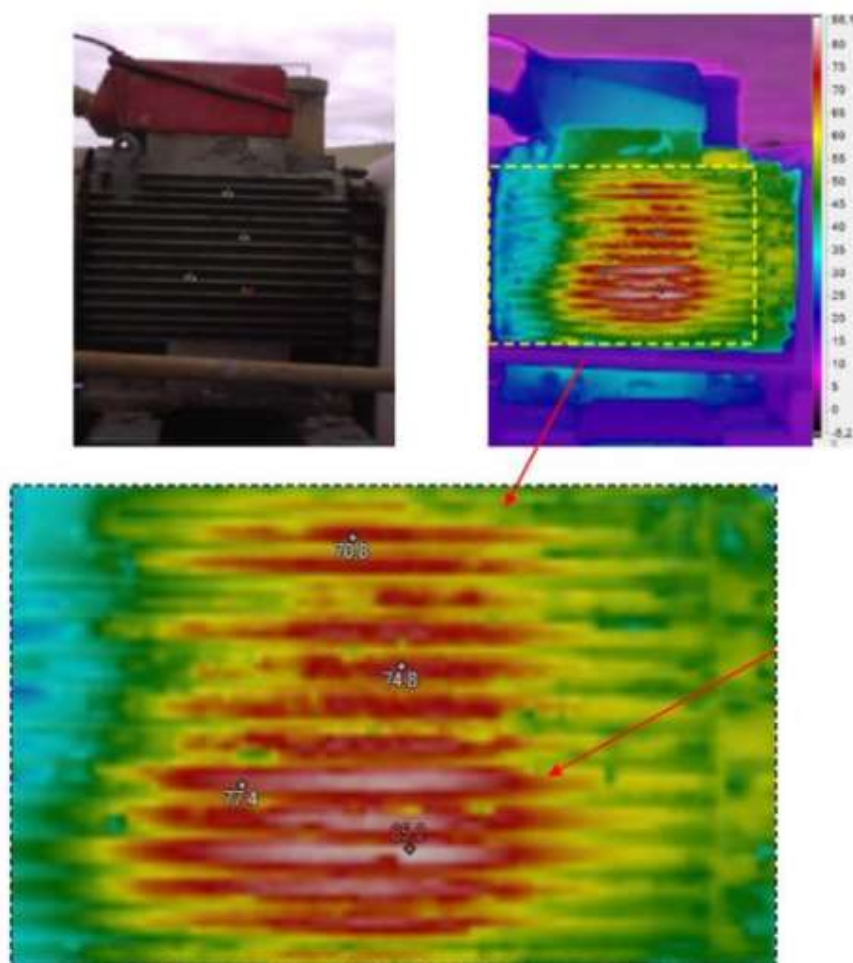


Рисунок 1.11 - Інфрачервоне обстеження двигуна, асиметрія обмоток[10]

Інфрачервона термографія є добре відомою технікою в галузі електротехніки. Проте її промислове використання в області моніторингу стану асинхронних двигунів ще є досить обмеженим. Це не відповідає надзвичайному потенціалу цієї техніки, яка може надати дуже корисну

інформацію про наявність різних несправностей в машинах; це може бути дуже корисно або для визначення стану двигуна, коли немає іншого методу діагностики, або для доповнення діагнозу, наданого іншими техніками (аналіз струмів/вібрацій).

У цій роботі були представлені деякі промислові випадки, взяті з більш загального дослідження, яке було проведено на асинхронних двигунах, що працюють на нафтохімічному заводі. Інфрачервоні інспекції цих двигунів дозволили виявити різні типи відмов у перевірених моторах, які мали досить різні причини. Результати та обговорення, подані тут, показують, що ця техніка здатна виявляти такі несправності, як відмови змашення підшипників, проблеми у системі передачі, дефекти з'єднань, проблеми з системою охолодження, а також навіть дати підказки про наявність проблем з обмоткою статора. Варто зазначити, що у більшості аналізованих випадків вивчення альтернативних величин, таких як вібрації або струми, не дало змоги виявити наявність аномалій у машині, що минулого часу призводило до катастрофічних наслідків. Усі ці результати підтверджують потенціал цієї техніки і важливість її включення в програми передбачувального обслуговування асинхронних двигунів.

Важливо відзначити, що кожна техніка (аналіз струмів, вібрацій тощо) може викликати помилкові тривоги через різноманітні причини, і інфрачервона термографія не є винятком. У цьому контексті перегрів мотора може бути спричинений причинами, що не пов'язані з несправністю, такими як перевантаження в експлуатації. Однак навіть за таких умов попередні роботи повідомляли про появу різних теплових зразків, які можна використовувати для розрізнення між відмовами мотора та іншими аномаліями, які не пов'язані з мотором. У цьому відношенні експертність термографа у точному інтерпретуванні теплових зображень грає вирішальну роль; для уникнення залежності від користувача розробляються експертні системи на основі технік штучного інтелекту, які дозволяють автоматично

інтерпретувати інфрачервоні зображення та діагностикою стану, розрізняючи несправності та інші ефекти.

1.6 Висновки до розділу 1

У результаті огляду проблематики та сучасної літератури стосовно проблематики ушкоджень білячої клітки асинхронного двигуна було виявлено, що важкі умови перевірки стержнів без зупинки двигуна та обладнання, такі як висока швидкість обертання, створюють складності для виявлення ушкоджень. У зв'язку з цим, інфрачервона томографія та аналіз струмів кожного стержня виявляються перспективними методами діагностики. Інфрачервона томографія надає можливість неінвазивного визначення температурних розподілів та виявлення незримих дефектів у стержнях, тоді як аналіз струмів дозволяє виявляти зміни в струмах, що можуть бути зв'язані з ушкодженнями. Ці методи виявляються корисними для дослідження та моніторингу стану асинхронних двигунів у реальному часі, що допомагає забезпечити безперебійну та ефективну роботу обладнання.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБРИВУ СТЕРЖНЯ РОТОРА В БІЛЯЧІЙ КЛІТЦІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1 Параметри двигунів та математична модель стержнів ротора

Дослідження проводилися серед двох груп двигунів, а саме:

- група двигунів за кількістю пар полюсів. Це наявні двигуни 112, 180, 250, 355M2 у яких однакова кількість пар полюсів що видно по діаграмах[1-4](синусоїдальний розподіл) має дві вершини плюсового потенціалу та дві від'ємного. Різниця у таких двигунів лише у кількості пазів, тому де більше пазів то і діаграма більш згладжена.

- іншою групою є за номіналом потужності. Основним номіналом є 355 кВт, відмінність полягає у різниці пар полюсів кожного наступного двигуна. А саме: M2, M4, M6, M8. Діаграми будуть відрізнятися, але цим дослідом в першу чергу досліджуємо як вплине обрив білячої клітки при різній полюсності двигуна, але при однаковій потужності.

При розрахунку використовувалися наступні параметри:

- Тип двигуна;
- Ковзання $S_{ном}$, %;
- Пусковий момент $I_{пуск}$, у.о;
- Довжина стержня L_1 , мм;
- Площа стержня $S_{ст}$, мм²;
- Опір стержня $R_{ст}$, Ом;
- Розміри поперечного перерізу стержня мм;
- Діаметр по середній лінії к.з. кільця $D_{скк}$, мм;
- Число пазів ротора Z_2 ;
- Довжина, площа та опір СКК $L_{скк}$, мм; $S_{скк}$, мм; $R_{скк}$, мОм;
- Густина струму в роторі $I_{2ст}$;
- Струм в роторі $I_{2ном}$;

- ЕРС $E_{2(\text{амп})}$;
- Потужність $P_{2\text{ном}}$;
- Полосність p ;
- Густина струму в статорі J_1 А/мм²;
- Густина матеріалів, та питома електропровідність (мідь алюміній);

Всі дані було зведені в таблицю, Рисунок 1. [11]

Ротори	Тип двигуна Ковзання	Пусковий струм			Довжина стержня			Площа стержня		Опір стержня		Dі1, мм	δ, мм	bk, мм
		Сном, %	іпуск, в.о	L1, мм	Lст2, мм	Lст2, м	Sст, мм2	Sст, м2	Rст, Ом	Rст, мОм				
	4A112M2Y3	2,5	7,5	125	125	0,125	120,3	0,00012	2,91E-05	29,1	110,0	0,6	27,0	
	4A180M2Y3	1,8	7,5	145	145	0,145	208,22	0,000208	1,95E-05	19,5	171,0	1,0	36,4	
	4A250M2Y3	1,4	7,5	230	230	0,23	167,61	0,000168	3,84E-05	38,4	232,0	1,2	40,0	
базова машин	4A355M2Y3	2	7	360	365	0,365	302,49	0,000302	3,38E-05	33,8	310,0	1,5	50,0	
	4A355M4Y3	1	7	470	475	0,475	276,45	0,000276	4,81E-05	48,1	380,0	1,0	50,0	
	4A355M6Y3	1,3	7	370	375	0,375	177,19	0,000177	5,93E-05	59,3	425,0	0,9	60,0	
	4A355M8Y3	1,3	6,5	375	380	0,38	198,26	0,000198	5,37E-05	53,7	440,0	0,9	60,0	
Література		Кравчик З	Кравчик З		Кравчик б		Кравчик б		мтд		Кравчик б			

Діаметр по середній		Число паз	Довжина СКК		Площа СКК		Опір СКК		Густина ст		Струм в роторі		ЕРС		Потужність
Dск, мм	Dск, м		z2	Lск, мм	Lск, м	Sск, мм2	Sск, м2	Rск, Ом	Rск, мОм	J2ст (ампл I2ном (діюче), А	E2 (ампл), В	E2 (ампл), мВ	P2ном, нВт		
81,8	0,0818	22	11,7	0,011675	567	0,000567	5,77E-07	0,58	3,5	421,05	1,73E-02	17,3	7,5		
132,6	0,1326	78	14,9	0,014870	1019,2	0,001019	4,09E-07	0,41	3,4	707,948	1,95E-02	19,5	30		
189,6	0,1896	40	14,9	0,014884	1348	0,001348	3,09E-07	0,31	3,2	536,352	2,91E-02	29,1	90		
257	0,257	38	21,2	0,021236	2250	0,00225	2,64E-07	0,26	2,5	756,225	3,61E-02	36,1	315		
328	0,328	50	20,6	0,020598	1400	0,0014	4,12E-07	0,41	2,5	691,125	4,70E-02	47,0	315		
363,2	0,3632	82	13,9	0,013908	1200	0,0012	3,25E-07	0,32	2,85	504,9915	4,23E-02	42,3	200		
378,2	0,3782	86	13,8	0,013809	1200	0,0012	3,22E-07	0,32	3	594,78	4,51E-02	45,1	160		
					Кравчик б	мтд		Кравчик б	мтд	Копилов (мтд	мтд		Кравчик 2		

Рисунок 2.1 - Зведені дані всіх двигунів для обрахунку і таблиці

Для аналізу вихідних даних почнемо з двигуна типу: 4A112M2Y3.



Рисунок 2.2 – Двигун 4А112М2У3 потужністю 7.5 кВт, із двома парами полюсів та кількістю пазів $z=22$ [12]

Характеристик з яких в наступному проводиться розрахунок основних даних для розрахунку це: потужність, яка становить 7.5 кВт. Наступна важлива величина це опір стержня та короткозамкненого кільця, це важливо тим, що самий розрахунок базується на величинах опорів і струмів білячої клітки асинхронного двигуна. Тому $R_{ст} = 29,1$ мОм, та $R_{СКК} = 0,58$ мОм відповідно. Розраховуються опори за формулами:

$$R_{ст} = \rho \frac{l_{ст}}{S_{ст}}, \quad R_{СКК} = \rho \frac{l_{СКК}}{S_{СКК}}$$

Формула 2.1 - Число пазів ротора можна знайти в літературі, [6] що для даного двигуна становить $z_2 = 22$ шт. Та величина E_2 (амплітудне) для розрахунку ерс в даному часі для кожного стержня, розраховується за формулою:

$$E_{n ст} = E_2 \cdot \sin\left(\frac{2p \cdot \pi \cdot n}{z_2}\right),$$

Формула 2.2 - Всі дані необхідно обрахувати для кожного стержня окремо, і створити проміжну табличку

Таблиця 2.1 - Дані двигуна 4A112M2У3 для побудови схеми ОР в Multisim і подальшого розрахунку

z2	En	Un
1	0,009349	0,00946
2	0,015732	0,00638
3	0,017126	0,00139
4	0,013088	-0,00404
5	0,004898	-0,00819
6	-0,00485	-0,00974
7	-0,01305	-0,00821
8	-0,01712	-0,00407

І так 22 разів для даного двигуна, і після чого будується принципова схема двигуна зображена на рисунку (2.2).

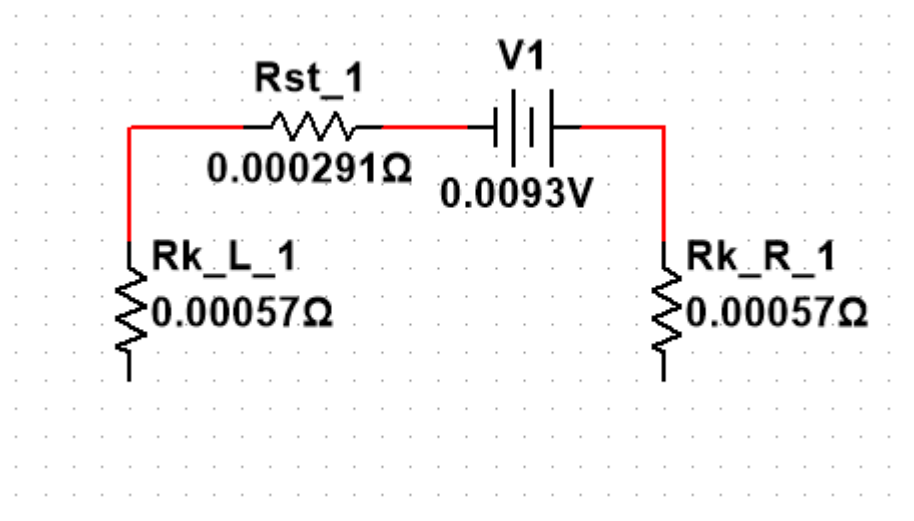


Рисунок 2.3 – Фрагмент принципової схеми ОР асинхронного двигуна побудована в програмі Multisim

2.2 Алгоритм розрахунку параметрів схем заміщень білячої клітки

АД

Із даних що зведені в таблиці (рисунок), та підставляючи дані у принципову схему яка зображена на рисунку() ми складемо принципову

схему ротора АД. Що в подальшому, для побудови цілого двигуна, а саме повної кількості стержнів для певного типу двигуна має мати вигляд:

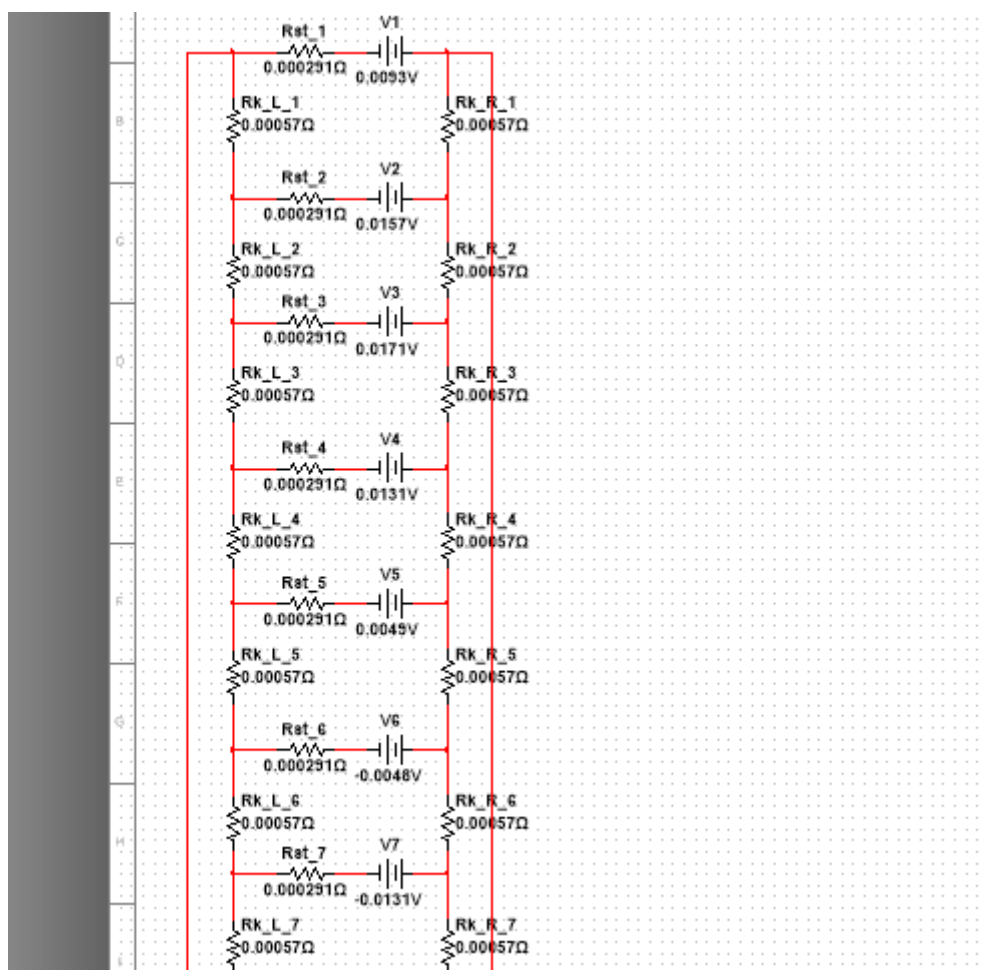


Рисунок 2.4 – Частина побудованої схеми двигуна 4A112M2У3.

Пояснення схеми: R_{st_1} – опір стержня під номером 1 із таблиці 1. $R_{k_L_1}$ та $R_{k_R_1}$ опори короткозамкненого кільця що розраховувалися за формулою 2.1 та величина V_1 це величина ерс що розраховувалася для кожного стержня окремо за формулою 2.2 та занесена у таблицю 2.1.

Перший обрахунок проводиться без ушкодження двигуна, щоб зафіксувати величини які виникають при роботі двигуна у штатному режимі, що зводяться до таблиці, що показано на рисунку 2.13. Наступна запуск проводиться із ушкодженими трьома стержнями (вибитими) для цього змінюється налаштування самого елемента схеми, змінюючи його параметр з 0.000291 на 5Том. Зображено на рисунках 5-6.

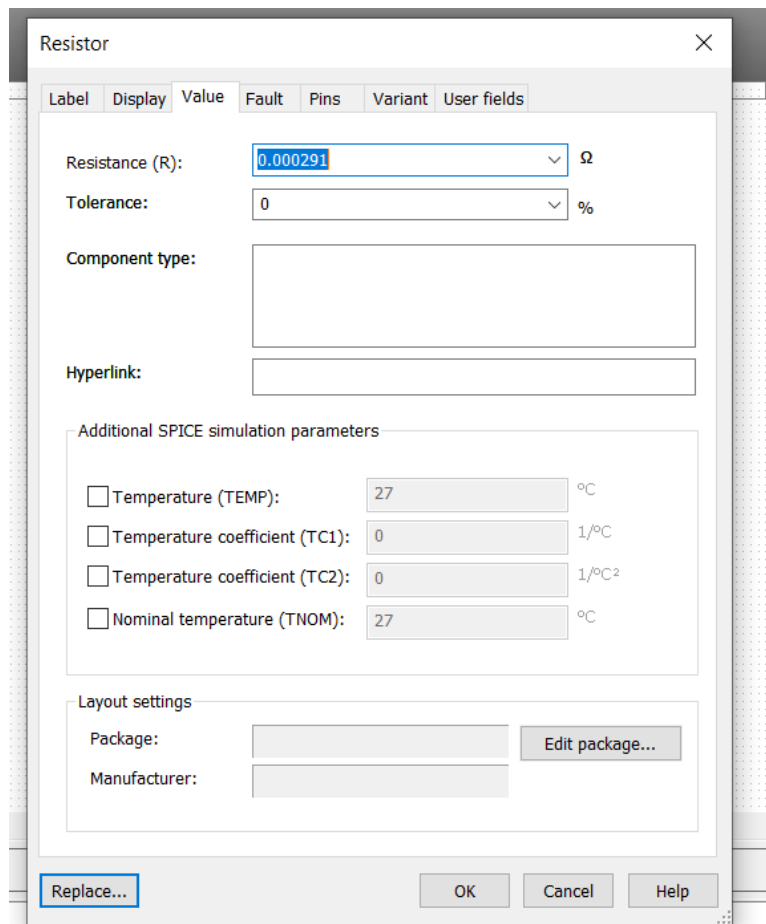


Рисунок 2.5 - Вікно зміни параметру елемента двигуна до зміни його характеристики.

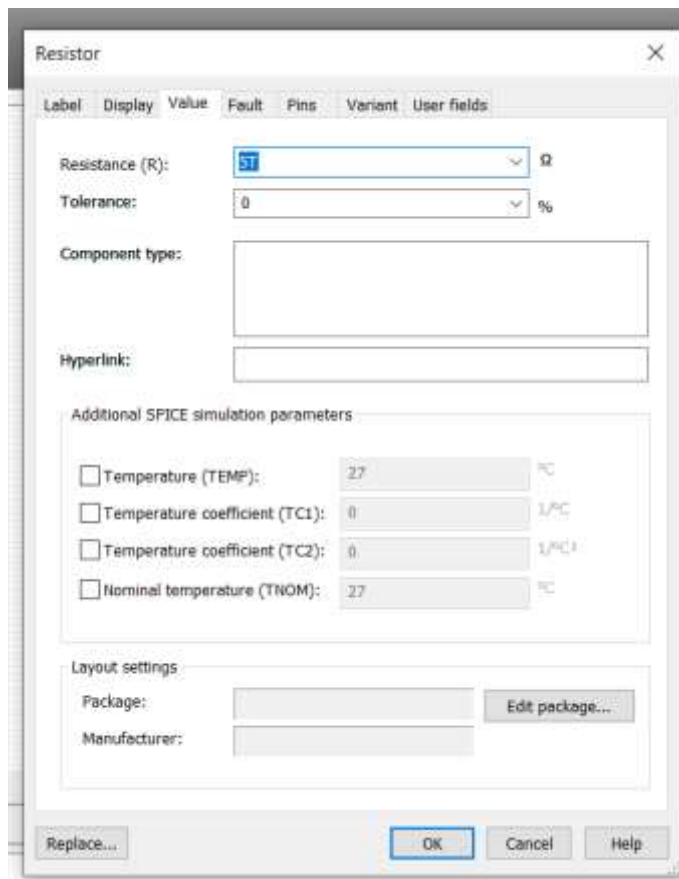


Рисунок 2.6 - Вікно зміни параметру елемента двигуна після зміни його характеристики.

Після зміни всіх необхідних елементів ми знову можемо запусити обрахунок вибравши ті необхідні елементи які саме хочемо бачити дані. Наприклад для обрахунку струмів стержнів при ушкодженій роботі. Відкривши вікно: Analyses and Simulation, вибираємо та натискаємо кнопку Run Рисунки 8-9.

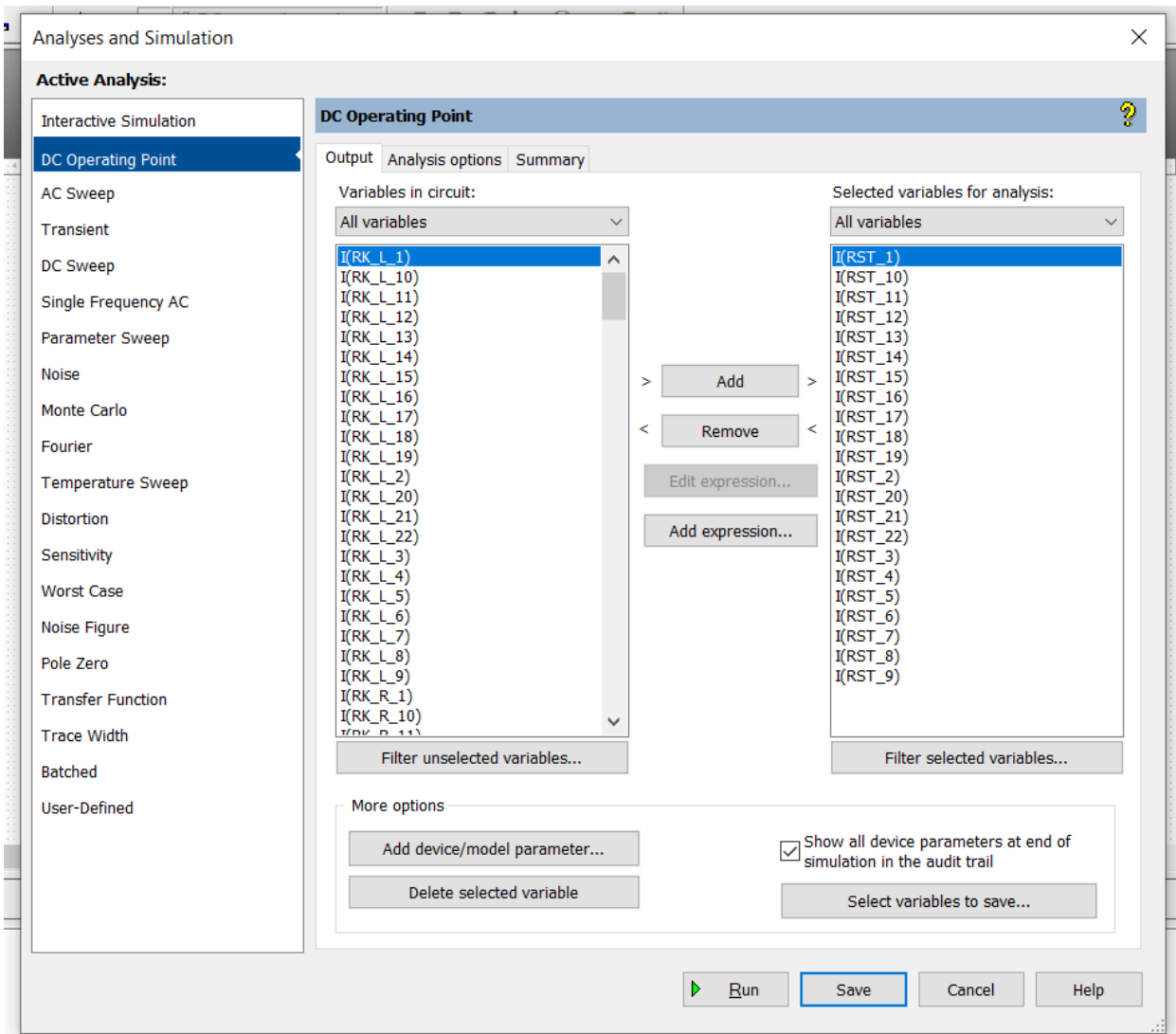


Рисунок 2.7 - Вікно вибору елементів

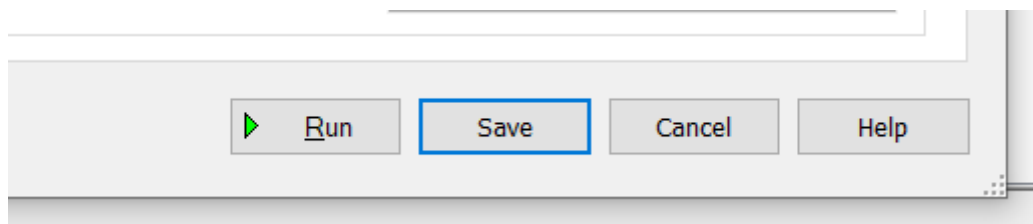


Рисунок 2.8 - Кнопка запуску обчислення миттєвих струмів у стрижнях ротора

Після чого програма видає вікно з усіма даними, які вибрані були попередньо у вікні рис 10.

Grapher View

File Edit View Graph Trace Cursor Legend Tools Help

DC Operating Point

112m2_dmg DC Operating Point Analysis

	Variable	Operating point value
1	I(RST_10)	-2.38585
2	I(RST_11)	-52.58982 m
3	I(RST_12)	2.41829
4	I(RST_13)	4.05358
5	I(RST_14)	4.38677
6	I(RST_15)	3.34855
7	I(RST_16)	1.33900
8	I(RST_17)	-1.26689
9	I(RST_18)	-3.33759
10	I(RST_19)	-4.39405
11	I(RST_1)	2.41848
12	I(RST_20)	-4.10763
13	I(RST_21)	-2.38715
	I(RST_22)	52.77885 m

Selected Diagram: DC Operating Point Analysis

Рисунок 2.9 - Вікно результатів обчислення

DC Op

	Variable	Operating
1	I(RST_1)	2.41848
2	I(RST_2)	4.05489
3	I(RST_3)	4.39432
4	I(RST_4)	3.39191
5	I(RST_5)	1.24441
6	I(RST_6)	-1.18272
7	I(RST_7)	-3.43218
8	I(RST_8)	-4.35069

Рисунок 2.10 - Вікно результатів після упорядкування

Дані величини струмів для двигуна.... Після чого видно що на рис 10 дані ідуть не по порядку, тому щоб виставити від 1 до кінця, необхідно натиснути Variable рис 11, та натиснути кнопку для перенесення в таблиці в ексель. Рисунок 2.11.



Рисунок 2.11 - Іконка вибору створення таблиці в Excel

Відкривається вкесель з даними що обраховані в програмі. Рисунок 2.12.

	A	B	C
1	Variable	Operating point value	
2	I(RST_1)	2,41848	
3	I(RST_2)	4,05489	
4	I(RST_3)	4,39432	
5	I(RST_4)	3,39191	
6	I(RST_5)	1,24441	
7	I(RST_6)	-1,18272	
8	I(RST_7)	2,42210	

Рисунок 2.12 - Вікно програми Excel.

Із цих даних будується графік розподілу струмів, що має вигляд:

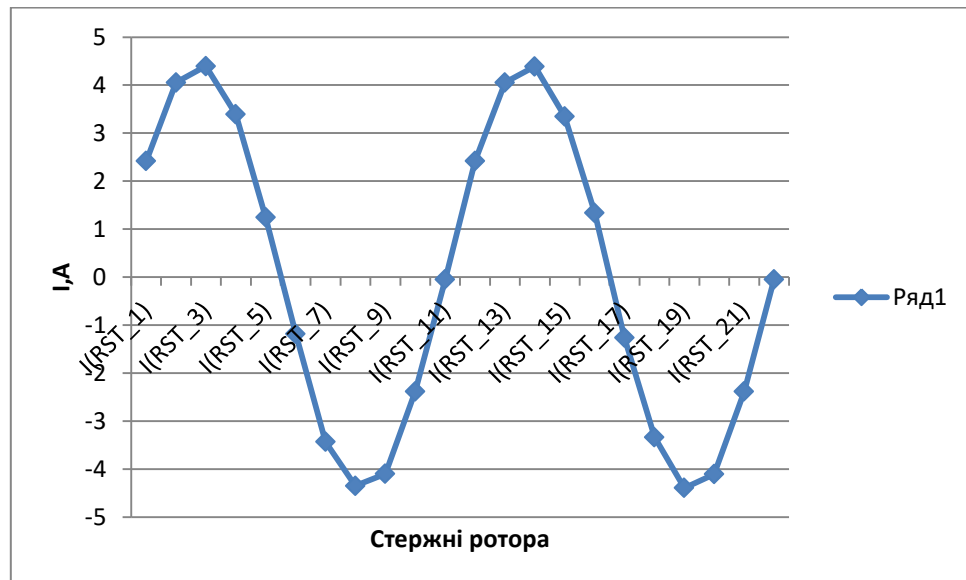


Рисунок 2.13 - Графік розподілу ерс по стрижням для двигуна 4A112M2У3.

Із графіка видно що є 2 пікові вершини синусоїди, що свідчить що двигун має 2 пари полюсів. А те що синусоїда рівна і плавно відтворює синусоїду означає що двигун немає ушкоджень при роботі у стрижнях.

Для вибору місця ушкодження стержнів обрано саме місце пікового значення на графіку, для цього розрахунку було обрано стрижні під номерами : 18,19,20. Так як пікове значення, то там знаходиться найбільші струми і потенційно вони можуть перегоріти.

2.3 Висновки до розділу 2

У даній роботі було проведено математичне моделювання обриву стрижня ротора в білячій клітці асинхронного двигуна з використанням різноманітних параметрів, включаючи тип двигуна, ковзання, пусковий момент, геометричні характеристики стержня та кільця кратного зміщення, густина струму в роторі та статорі, а також електромагнітні параметри.

За допомогою складеної таблиці Excel та програми Multisim була створена детальна модель ротора, що дозволило провести розрахунки та аналіз різних сценаріїв обриву стержня. Результати моделювання показали, що обрив стрижня може призводити до збільшення струму в сусідніх стрижнях, що є важливим аспектом для оцінки стану та прогнозування відмов в асинхронних двигунах.

Такий підхід до математичного моделювання дозволяє ефективно досліджувати можливі сценарії руйнування ротора та розробляти стратегії попередження небезпеки виникнення аварійних ситуацій. Крім того, використання програмного забезпечення Multisim сприяє побудові детальних принципових схем та вивченню характеристик електромагнітного поля у різних точках системи.

Отже, отримані результати можуть бути корисними для практичного застосування в сфері електротехніки та машинобудування, сприяючи підвищенню надійності та безпеки роботи асинхронних двигунів.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ УШКОДЖЕНЬ ОБМОТОК РОТОРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ СЕРІЇ 4А НА ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЇХ ЗА СТРУМОМ

3.1 Вихідні дані розрахунків, струми перенавантаження при обриві стрижня ротора двигунів серії 4А

Якщо повторити це ще раз при ушкоджених стрижнях можна отримати графік, де сусідні стрижні ушкоджених матимуть сильне перенавантаження струму, що спричинятиме ланцюгову реакцію ушкоджень інших стрижнів. Для кращої візуалізації два графіка поєднані в один, а саме при неушкодженіму двигуні, та з ушкодженими стрижнями, що зображено на рис 3.1.

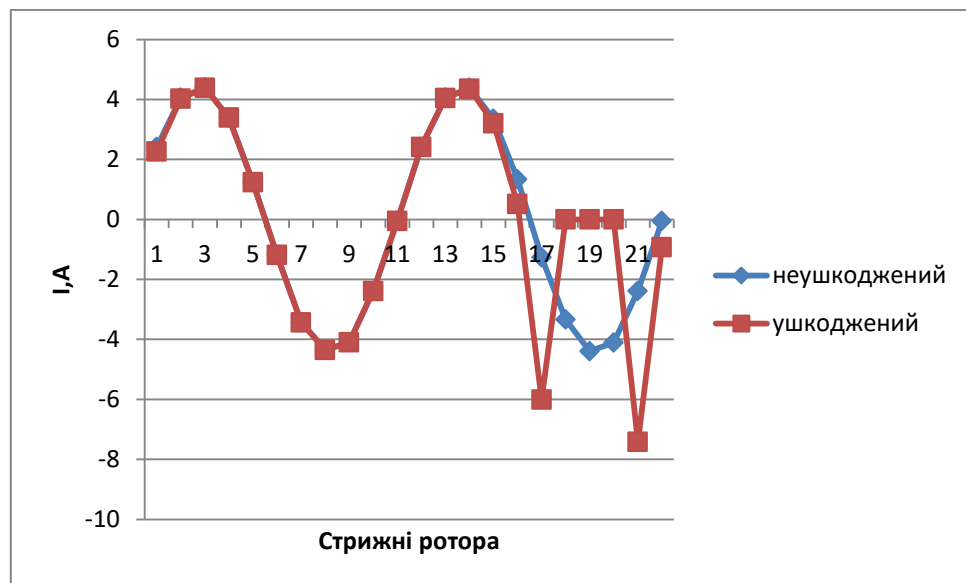


Рисунок 3.1 - Графік розподілу струмів двигуна 4А112М2У3 з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

З графіку, що на рисунку 3.1 видно що перенавантаження значно перевищує пікове при нормальній роботі. Стрижні у двигуні всього 22 шт, вибито із них 3, а саме 18-20. Як видно струм по них не проходить тому і в цьому місці графік дорівнює нулю. А в сусідніх, де було ушкодження, струми різко зростають що створює перенавантаження, та і лавиноподібні ушкодження наступних.

Аналогічні дані обраховуються для наступних двигунів першої групи, але різними будуть двигуни, з висотою вісі обертання але з однаковою кількістю пар полюсів.

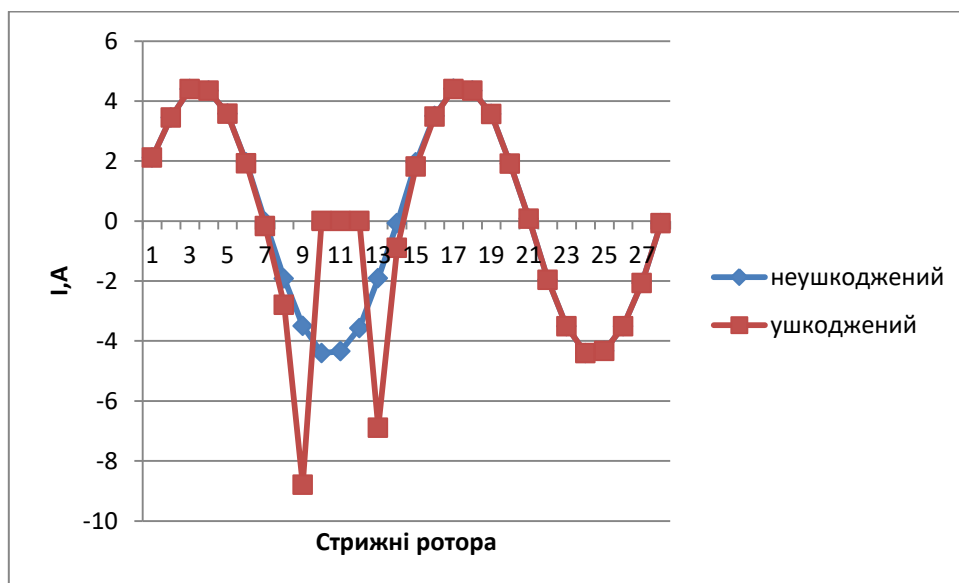


Рисунок 3.2 - Графік розподілу струмів двигуна 4А180М2УЗ з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкодженими.

З графіку, що на рисунку 3.2 видно що перенавантаження значно перевищує пікове при нормальній роботі. Стрижні у двигуні всього 28 шт, вибито із них 3, а саме 10-12. Як видно струм по них не проходить тому і в цьому місці графік дорівнює нулю. А в сусідніх, де було ушкодження, струми різко зростають що створює перенавантаження, та і лавиноподібні ушкодження наступних.

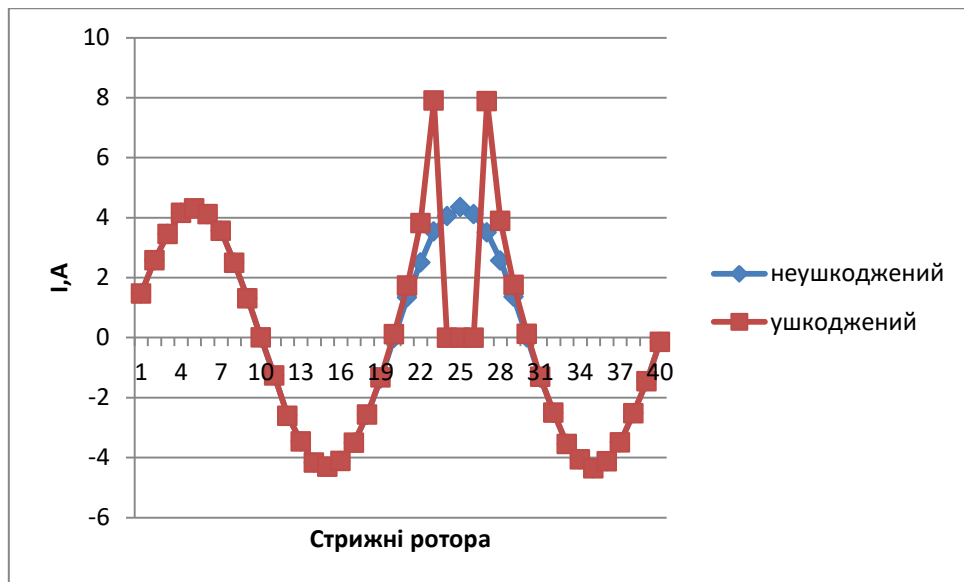


Рисунок 3.3 - Графік розподілу струмів двигуна 4A250M2УЗ з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

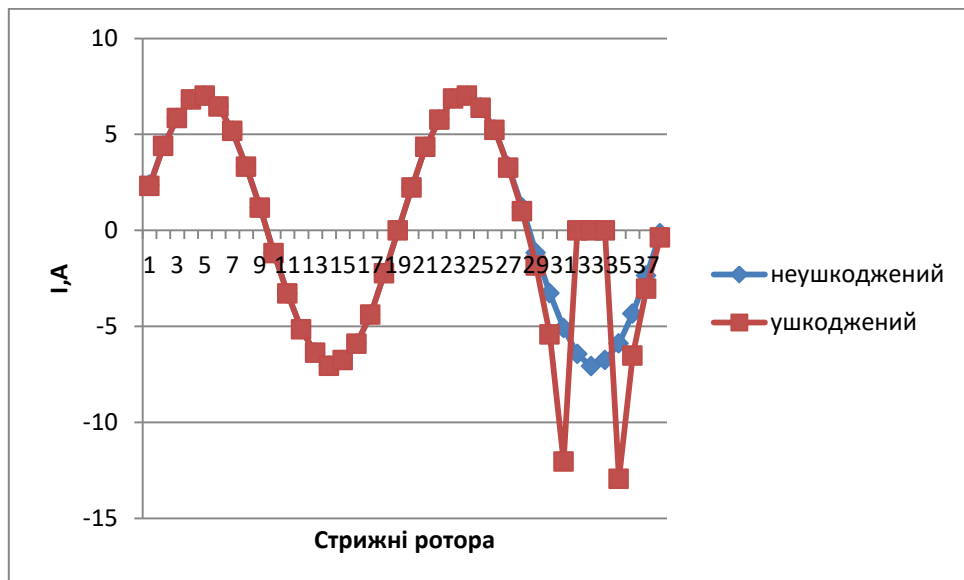


Рисунок 3.4 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M2УЗ з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

	112m2	180m2	250m2	355m2
$I_{пк\ неушк}$	4,39432	4,40523	4,35171	7,07728
$I_{пк\ ушк}$	7,41994	8,7947	7,90905	12,94148
$k_{пер}$	1,68853	1,99642	1,817458	1,82859

Таблиця 3.1 - Зведені навантаження стрижнів двигуна 4A355M2УЗ при не ушкодженнях та ушкодженнях по модулю, та коефіцієнт перенавантаження струму.

Із таблиці 3.1 $I_{пк}$ – найвище (пікове) значення струму із графіків що зображені на рисунках 3.1-4 і надалі із синусоїди розподілу струмів у

стрижнях ротора при миттєвому значенні. Приставка неушк. та ушк. відповідно для двох розрахунків при номінальній роботі та при ушкоджених стрижнях.

$k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження струму в стрижні ротора.

Розраховується як відношення максимального пікового миттєвого значення при цілих стрижнях ротора та максимального пікового миттєвого значення при ушкоджених, та взяті по модулю. Надалі використовуватиму це позначення.

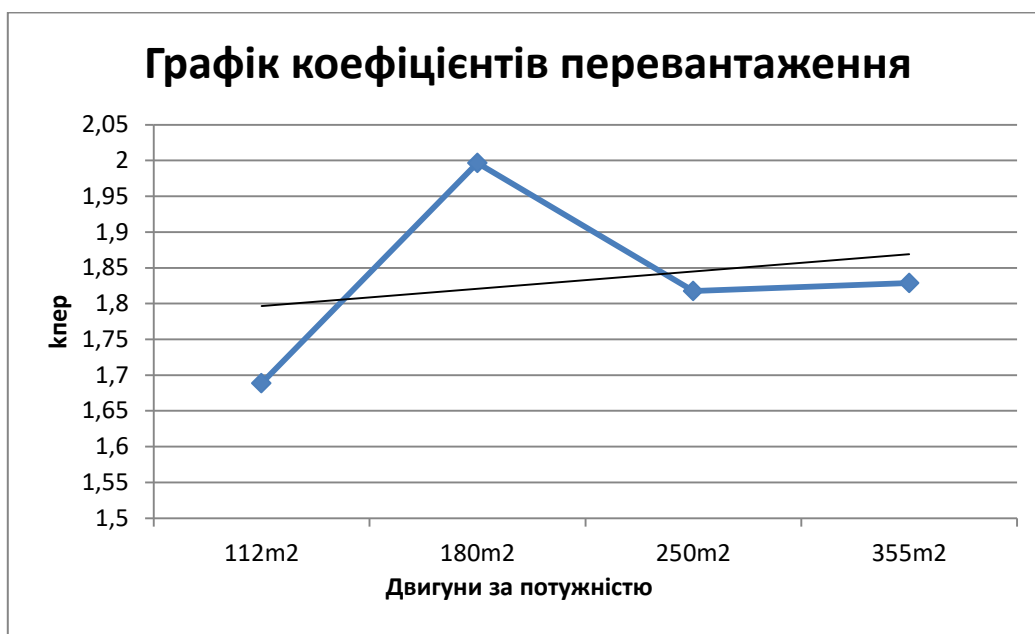


Рисунок 3.5 - Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перенавантаження.

Побудований із таблиці 3.1.

$k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження струму в стрижні ротора.

Розраховується як відношення максимального пікового миттєвого значення при цілих стрижнях ротора та максимального пікового миттєвого значення при ушкоджених, та взяті по модулю. Надалі використовуватиму це позначення.

Із даних двигунів які поділені за потужністю, але однаковою кількістю пар полюсів, видно, що при збільшенні кількості пазів, струм

перенавантаження буде зменшуватися. а також магнітне відхилення буде не значним, так як струм для однієї фази ділиться на більшу кількість стрижнів.

З рисунку видно що в середньому відношення коефіцієнту до різних типів двигунів є сталим, що становить приблизно 1.8 рази. Тобто з механічної точки зору струм у сусідніх стержнях буде збільшений у 1.8 разів. А також тепловиділення зросло в 3.24 рази.

Важливим аспектом є те, що графіки залежать від миттєвих значень струмів, тому є коливання у значеннях. Тому для цього використовується лініє тренда що зображено на рисунку 3.5 (чорна лінія), яка показує що при збільшені потужності збільшується струм коефіцієнту перенавантаження. Адже струм збільшується а кількість пар полюсів залишається незмінною.

3.2 Вихідні дані розрахунків, струми перенавантаження при обриві стрижня ротора серії двигунів 4A355

Та другий обрахунок присвячений двигунам серії 4A355, з відмінністю лише по кількості пар полюсів

Наведено наступні розрахункові дані що і для перших обрахунків, вся послідовність дій однакова.

Двигуни ідуть у порядку зростання числа пар полюсів, а саме M2, M4, M6, M8.

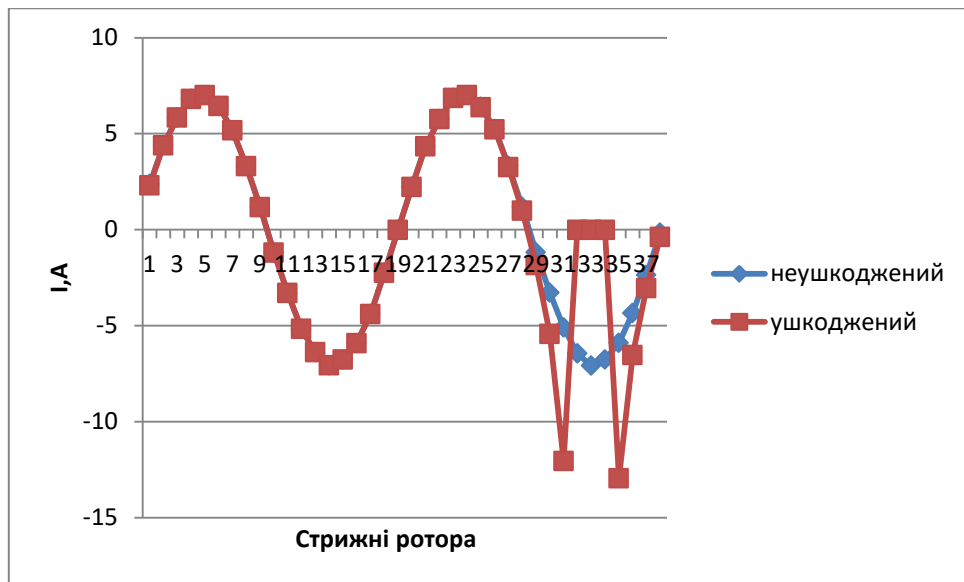


Рисунок 3.6 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М2УЗ з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

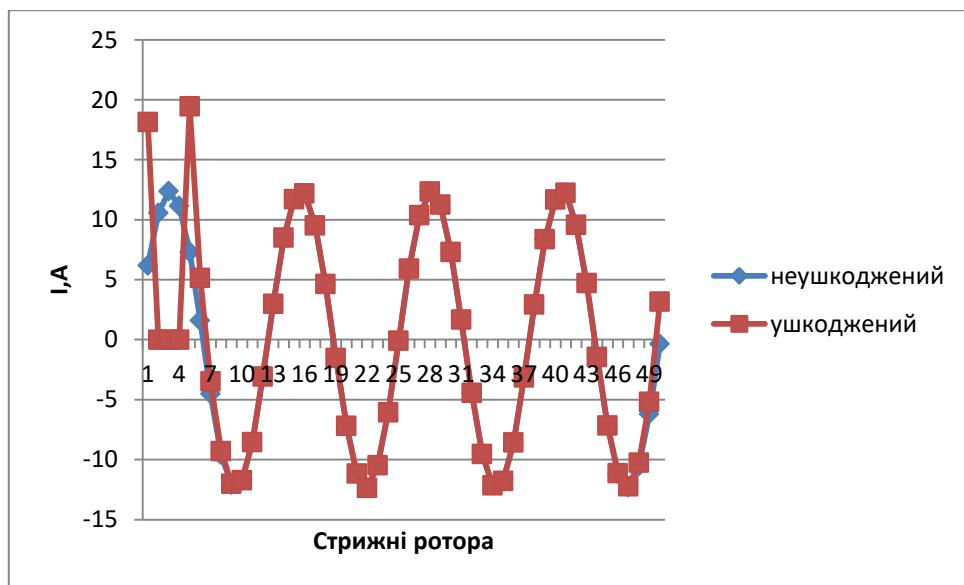


Рисунок 3.7 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М4УЗ з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

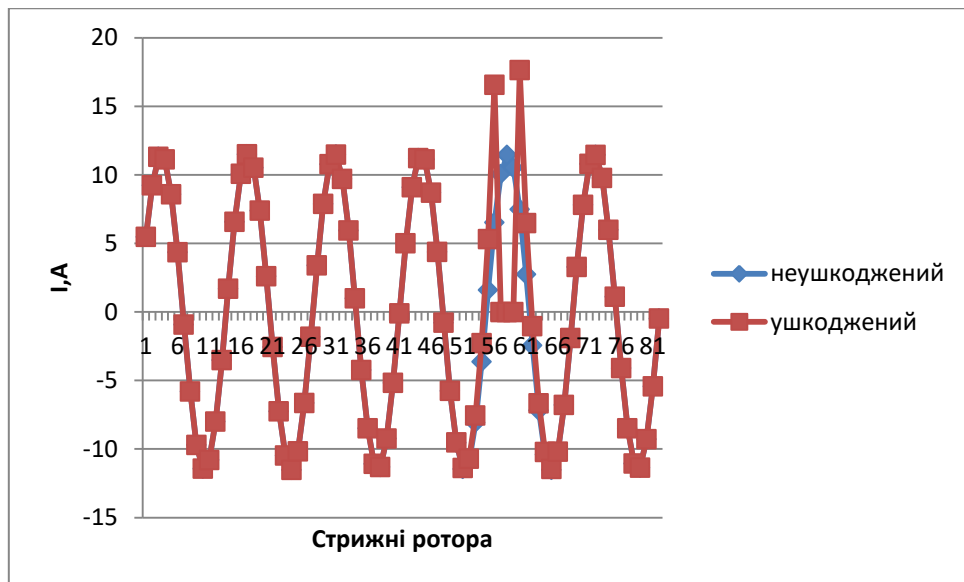


Рисунок 3.8 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М6У3 з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

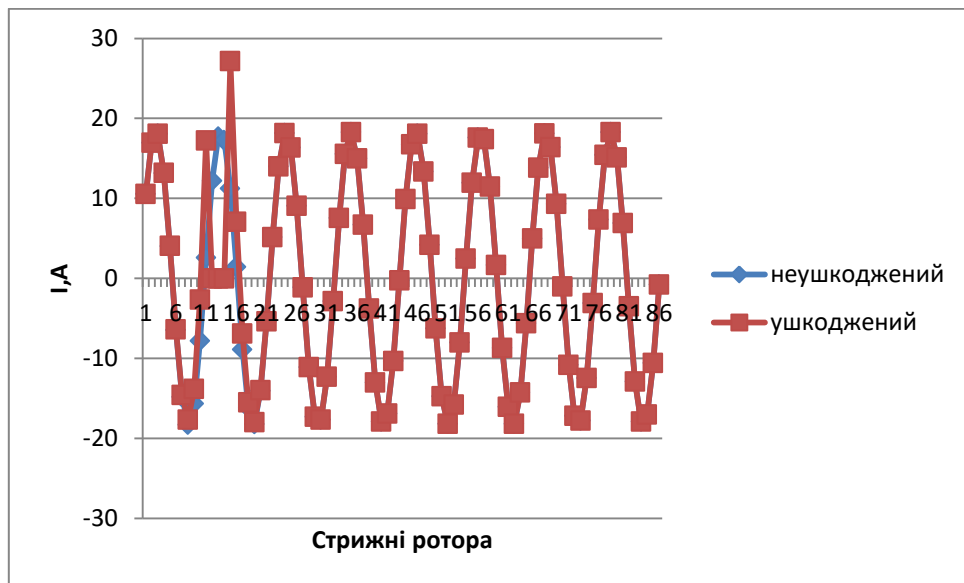


Рисунок 3.9 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М8У3 з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

	m2	m4	m6	m8
$I_{пк\text{ неушк}}$	7,07728	12,37014	11,5225	18,2992
$I_{пк\text{ ушк}}$	12,94148	19,44433	17,64997	27,16637
$k_{пер}$	1,82859	1,571876	1,53179	1,48457

Таблиця 3.2 - Зведені пікові значення струмів двигунів із віссю обертання 355 мм та коефіцієнт перевантаження.

Перше, що видно із графіків розподілів струмів до ушкодження і після із класу двигунів 355, те що із збільшенням числа пар полюсів збільшується кількість пікових значень синусоїди.

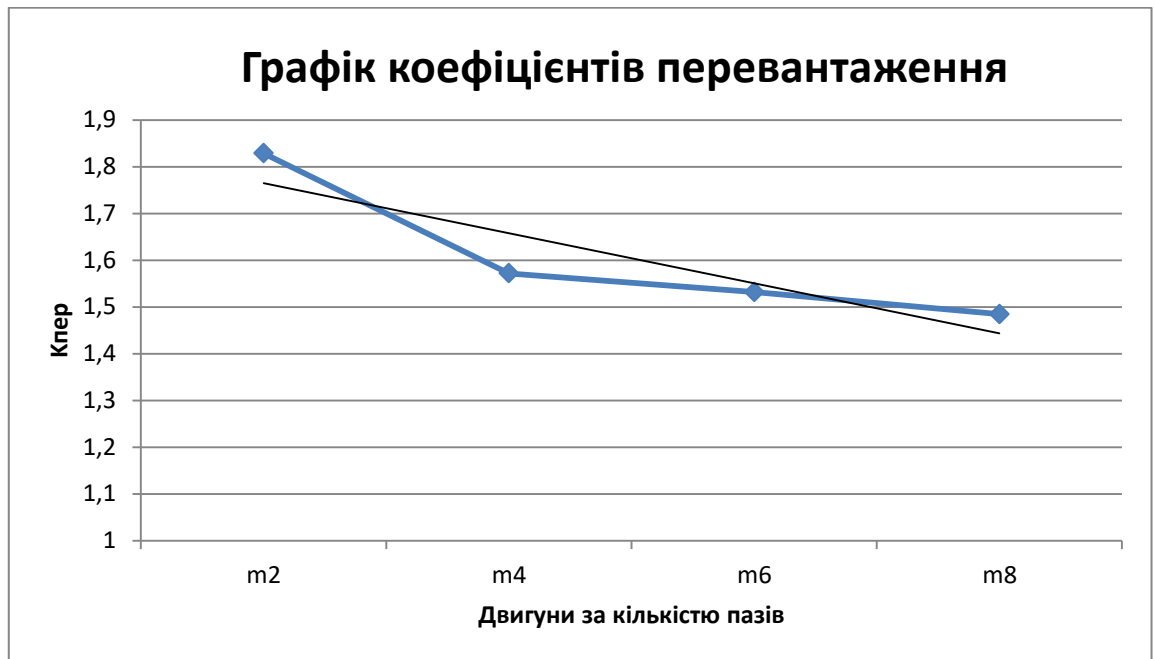


Рисунок 3.10 – Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перевантаження в залежності від кількості стержнів для різних АД. Побудований із таблиці 3.2.

З останнього графіку чітко видно що струмовий розподіл між кількістю числа пазів і полюсністю(струм).

Висновок: чим менше пазів і число полюсів, то буде більший струм при обриві. Та більший коефіцієнт перевантаження, через відношення потужності двигуна до кількості пазів та стрижнів. Чим більше стрижнів ротора на одиницю потужності тим менший коефіцієнт перевантаження при обриві чи ушкоджені.

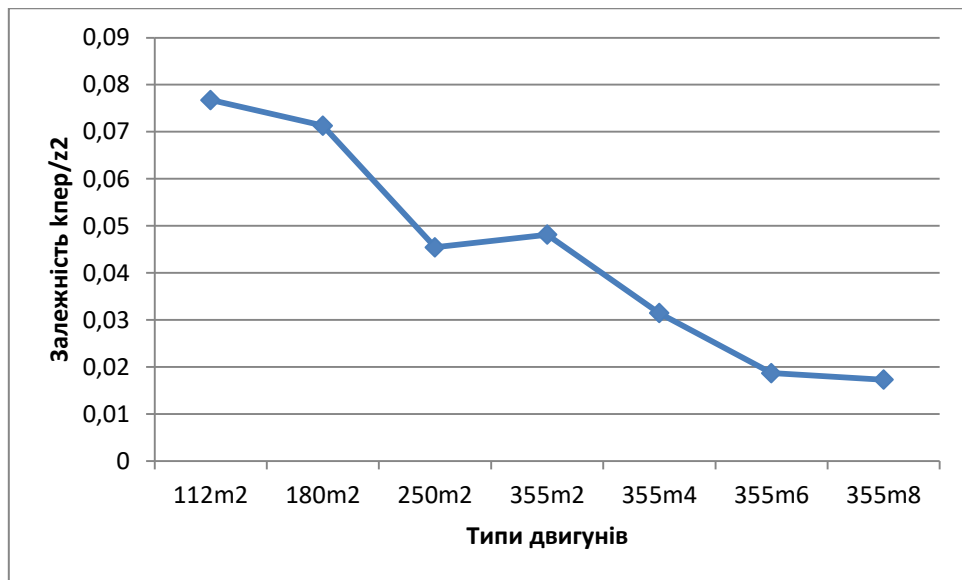


Рисунок 3.11 – Графік залежності кількості пазів даних двигунів до коефіцієнту перевантаження у стрижнях ротора

З графіку видно що при збільшенні потужності двигуна виникає необхідність збільшити кількість стрижнів на полюс двигуна, що б зменшити пускові струми. Тому коли виникає аварійна ситуація то двигуни із більшою кількістю пазів простіше переносять ушкодження стержнів ніж з меншою кількістю пазів. І магнітні перевантаження які генерує збільшений струм у певному полюсі викликає дисбаланс магнітного потоку що спричинить вібрації та коливання що негативно впливатиме в першу чергу на підшипники двигуна.

3.3 Вихідні дані розрахунків, струми перенавантаження при обриві коротко замикаючого кільця серії двигунів із двома парами полюсів (M2)

Також другий етап це дослідження обриву скк, а саме двох процесів що відбуваються в кільці з обривом та сусіднім кільцем.

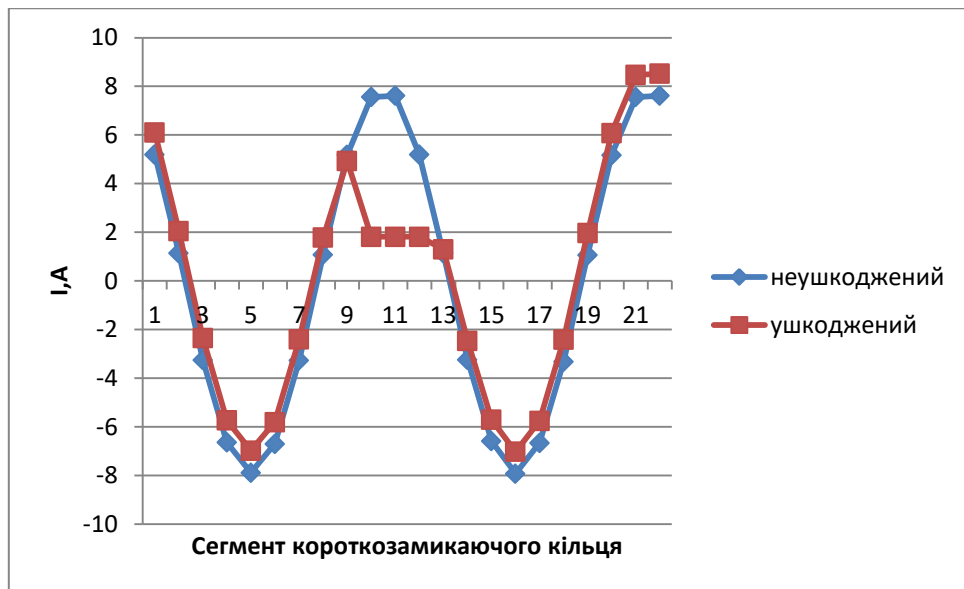


Рисунок 3.12 – Графік розподілу струмів двигуна 4A112M2У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

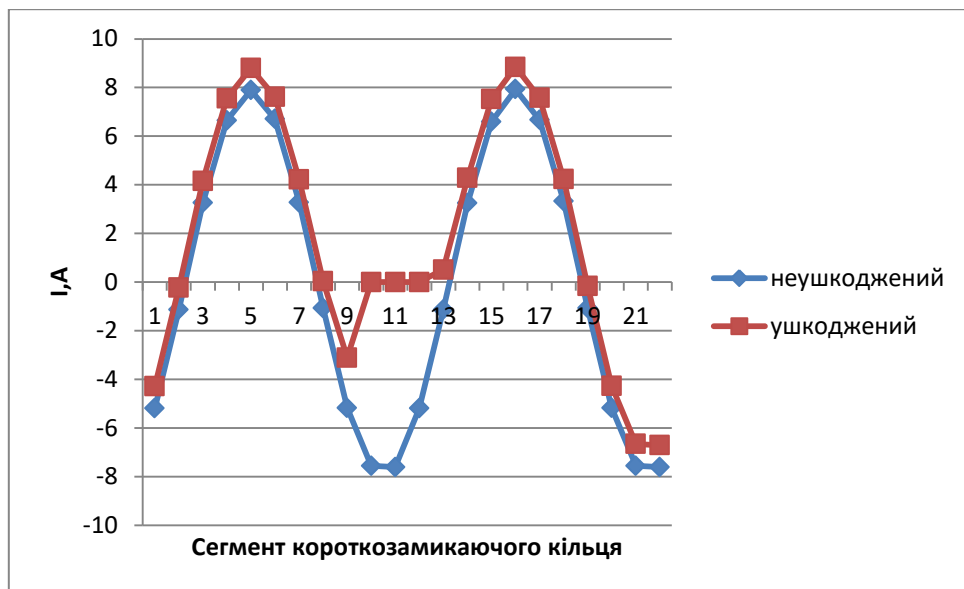


Рисунок 3.13 – Графік розподілу струмів двигуна 4A112M2У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

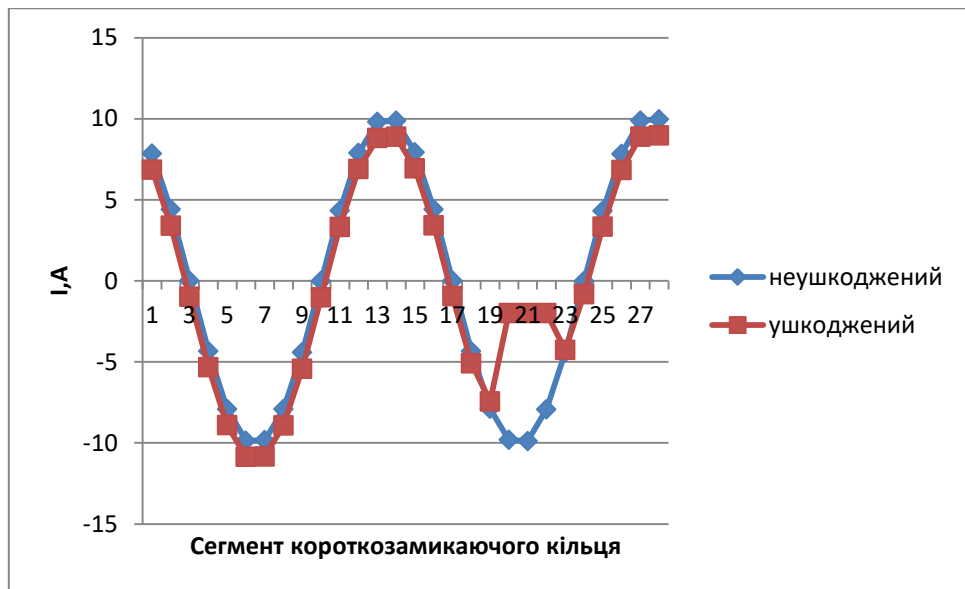


Рисунок 3.14 – Графік розподілу струмів двигуна 4A180M2У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

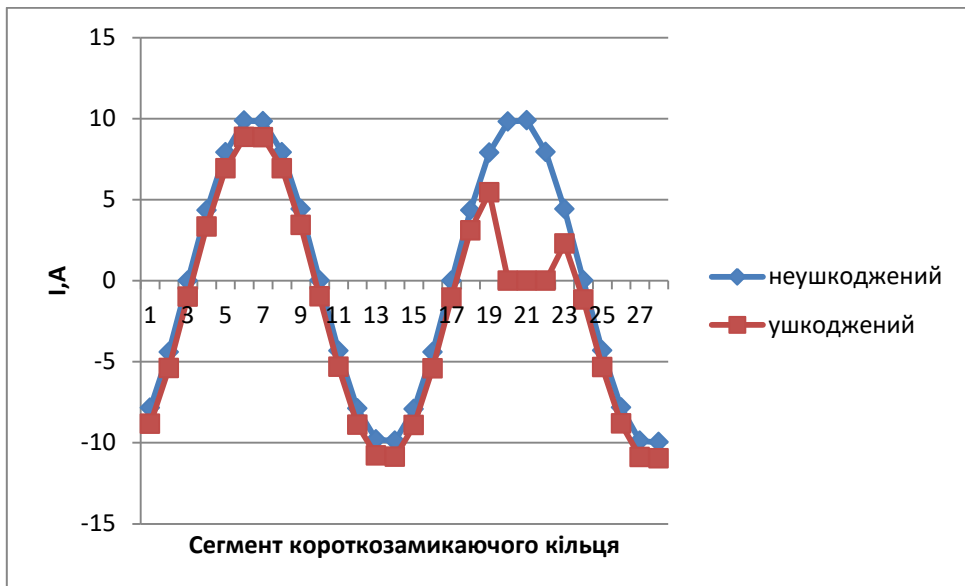


Рисунок 3.15 – Графік розподілу струмів двигуна 4A180M2У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

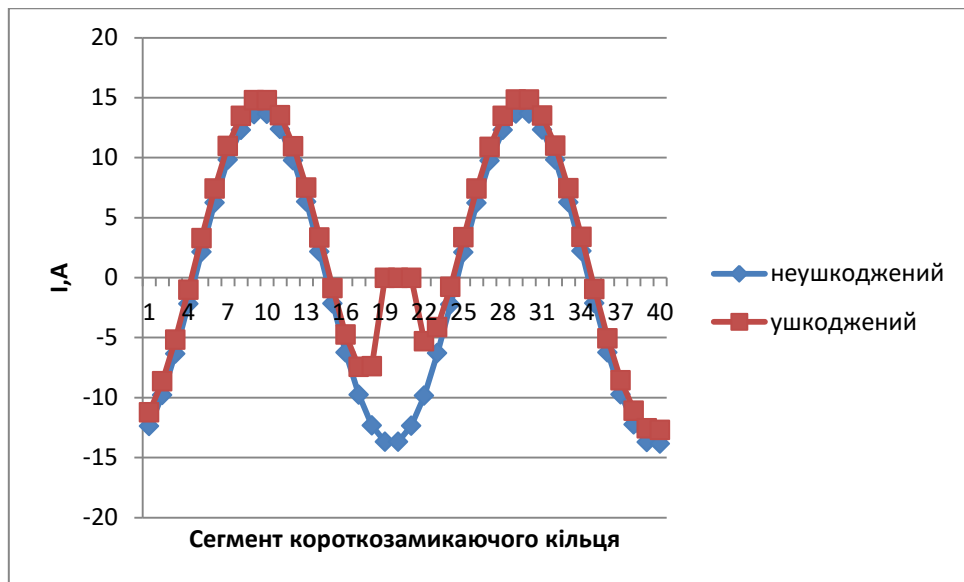


Рисунок 3.16 – Графік розподілу струмів двигуна 4A250M2У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

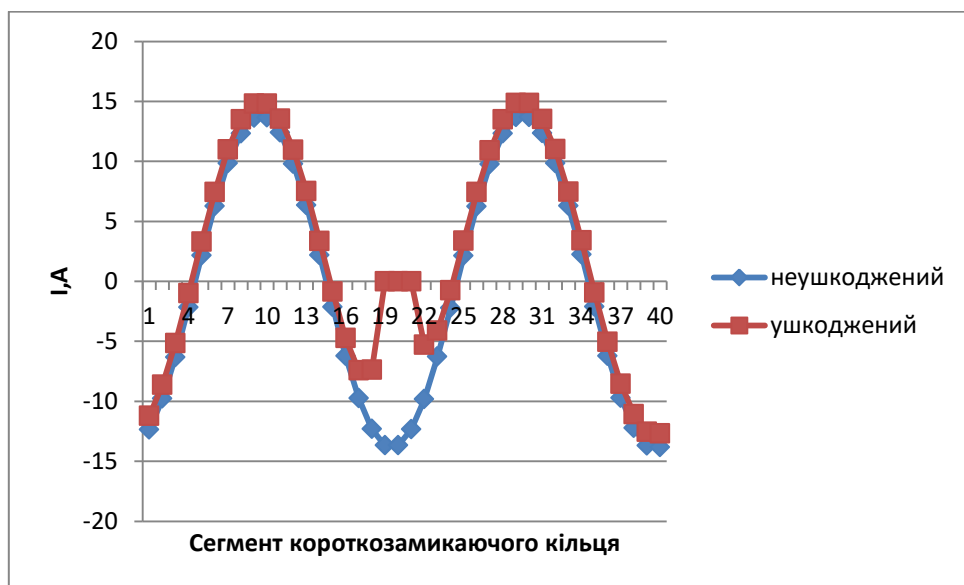


Рисунок 3.17 – Графік розподілу струмів двигуна 4A250M2У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

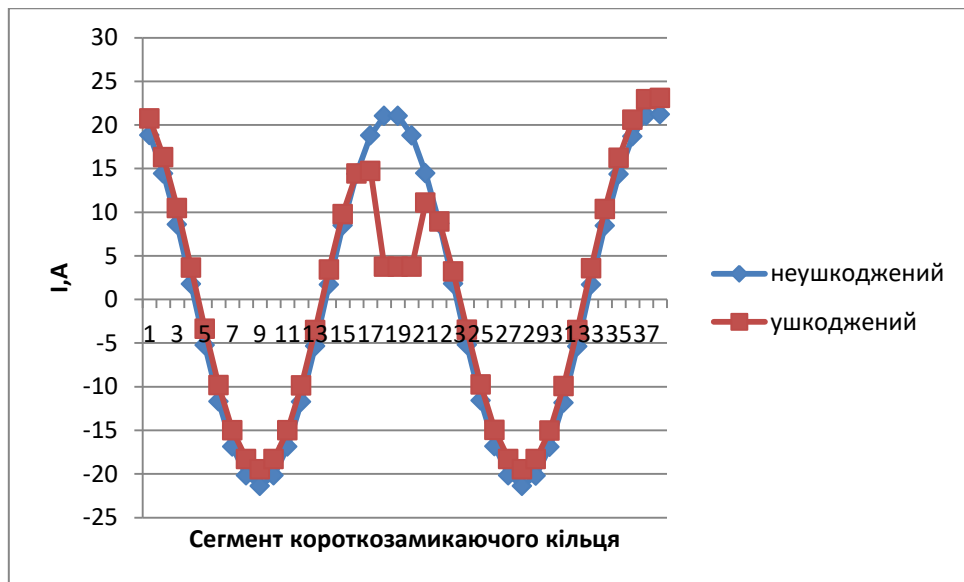


Рисунок 3.18 – Графік розподілу струмів двигуна 4A355M2У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

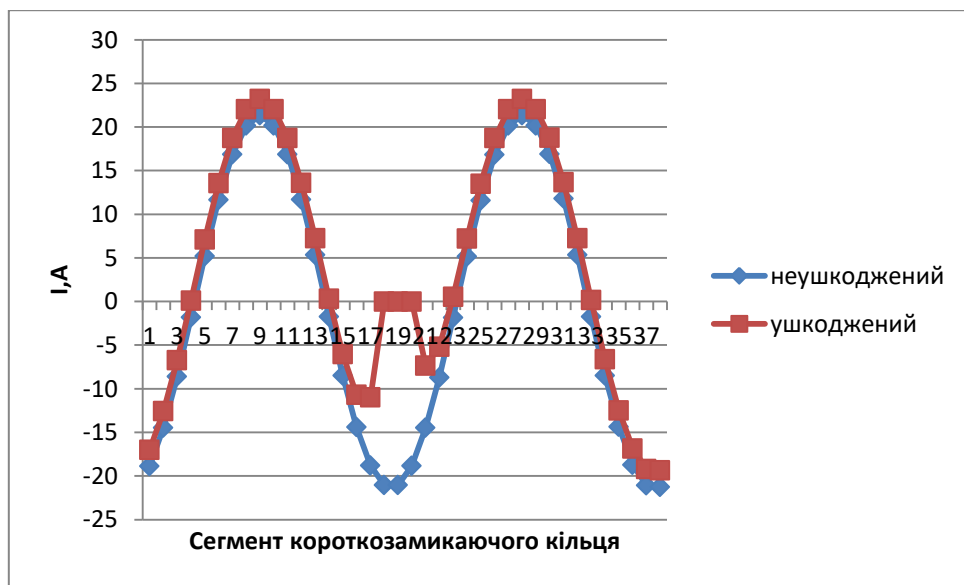


Рисунок 3.19 – Графік розподілу струмів двигуна 4A355M2У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

	112m2	112m2	180m2	180m2	250m2	250m2	355m2	355m2
$I_{пк \text{ неушк}}$	7,9313	7,9313	9,9674	9,9674	13,84159	13,8416	21,34586	21,34586
$I_{пк \text{ ушк}}$	8,52204	8,84249	10,8502	10,9592	15,0032	14,84457	23,11715	23,22772
$k_{пер}$	1,07448	1,114885	1,08857	1,0995	1,083922	1,07246	1,08298	1,08816

Таблиця 3.3 – Зведені навантаження стрижнів двигуна 4A355M2У3 при неушкоджені та ушкоджені взяті по модулю, та коефіцієнт перенавантаження струму.

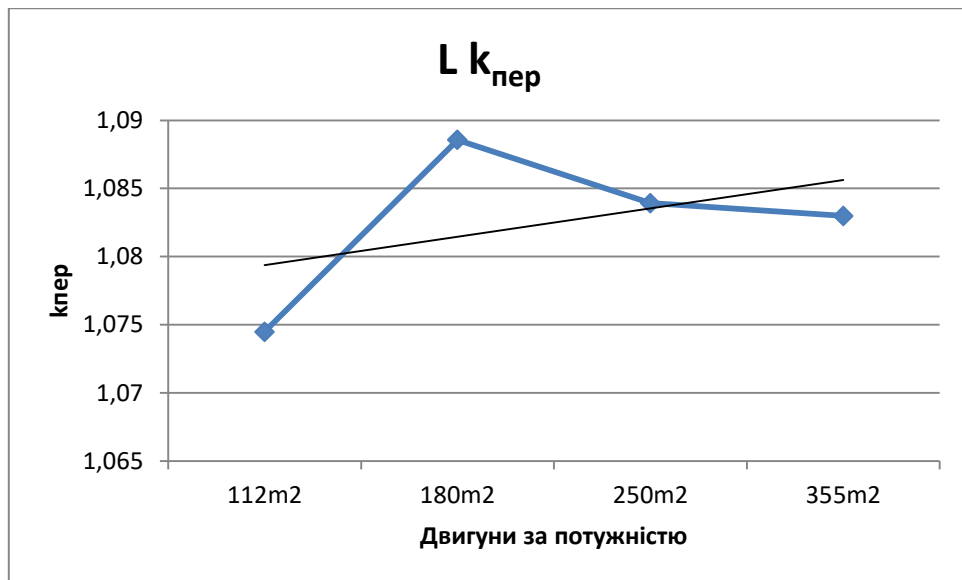


Рисунок 3.20 – Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перенавантаження.

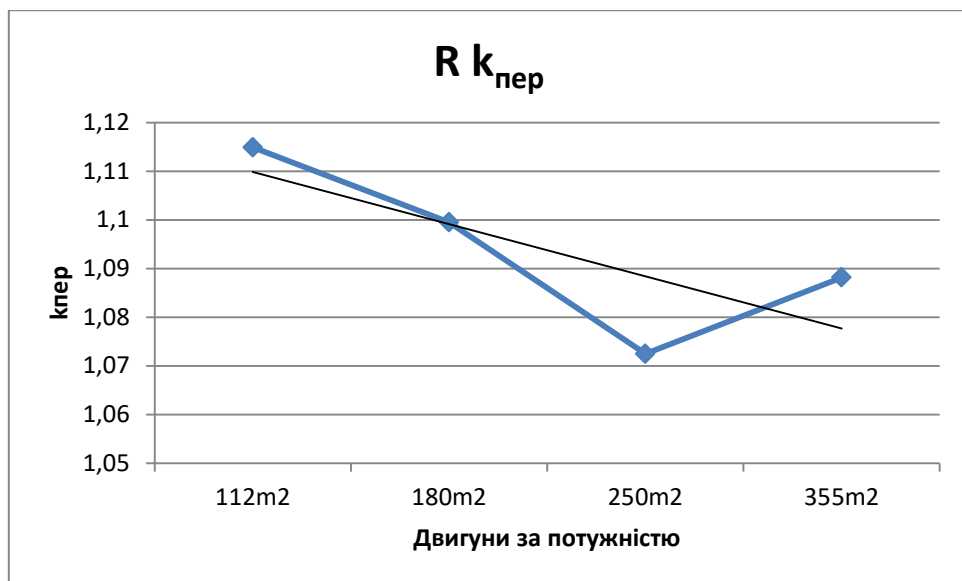


Рисунок 3.21 – Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перенавантаження.

Із двох останніх графіків видно що при обриві правого кільця струми падають із збільшенням потужності, а у лівому зростають.

3.4 Вихідні дані розрахунків, струми перенавантаження при обриві коротко замикаючого кільця серії двигунів 4A355

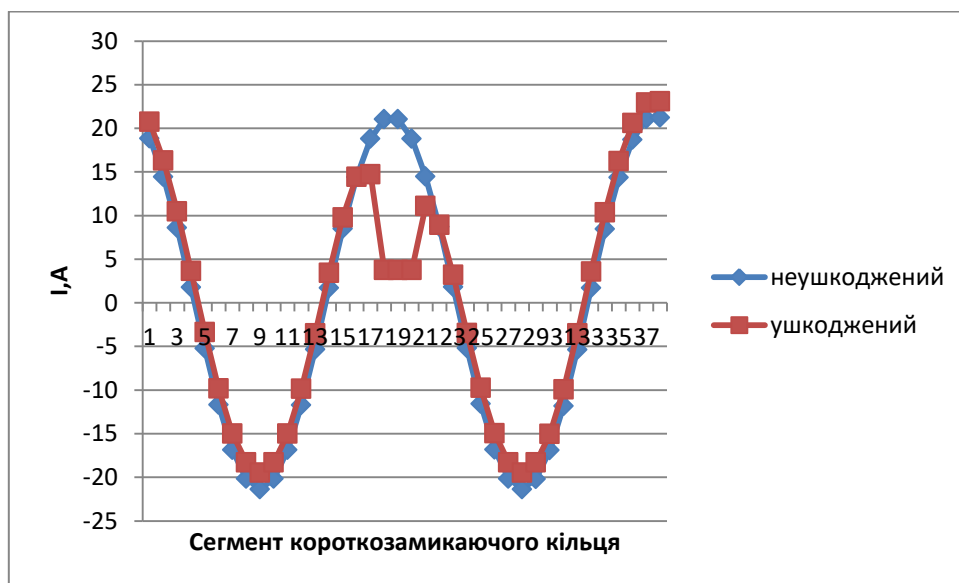


Рисунок 3.22 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M2У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

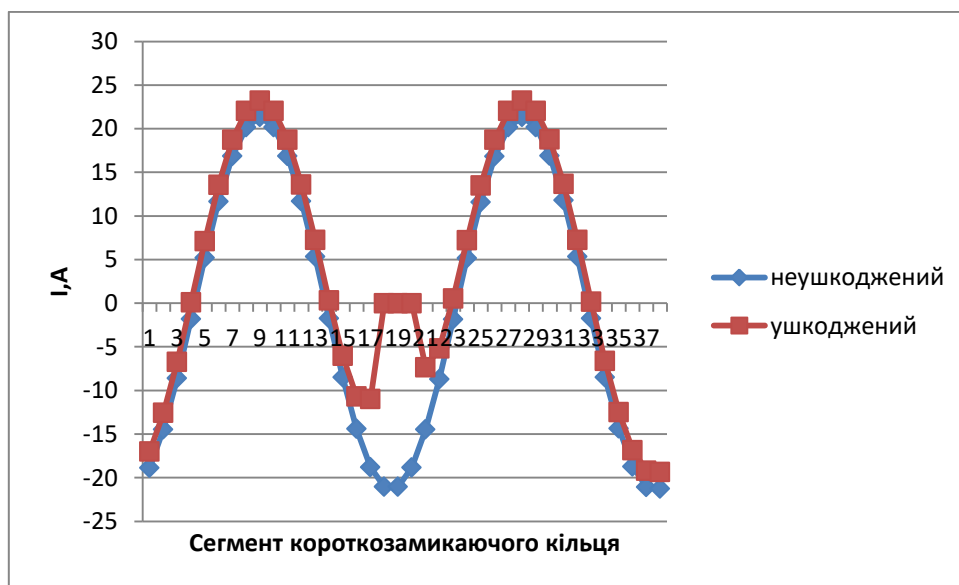


Рисунок 3.23 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M2У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

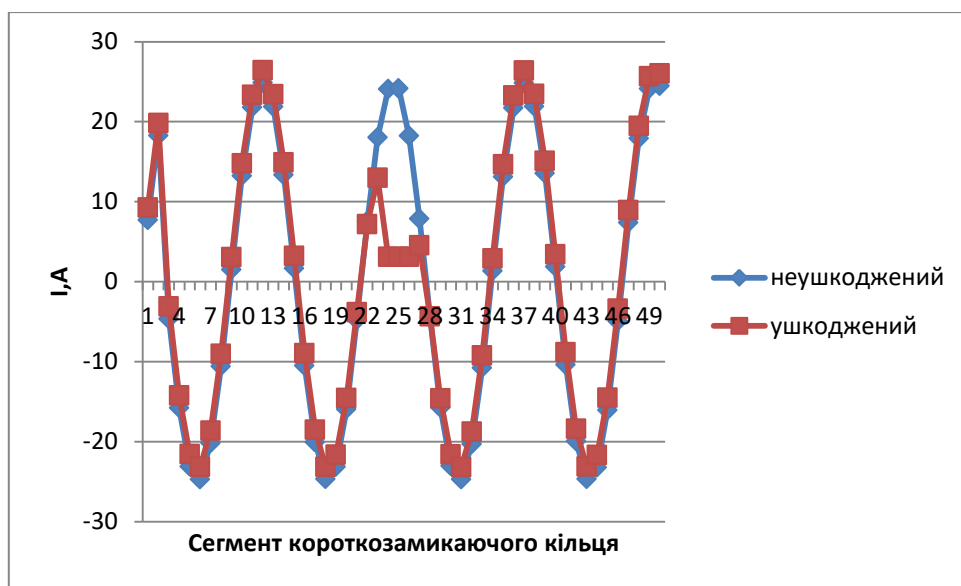


Рисунок 3.24 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M4У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

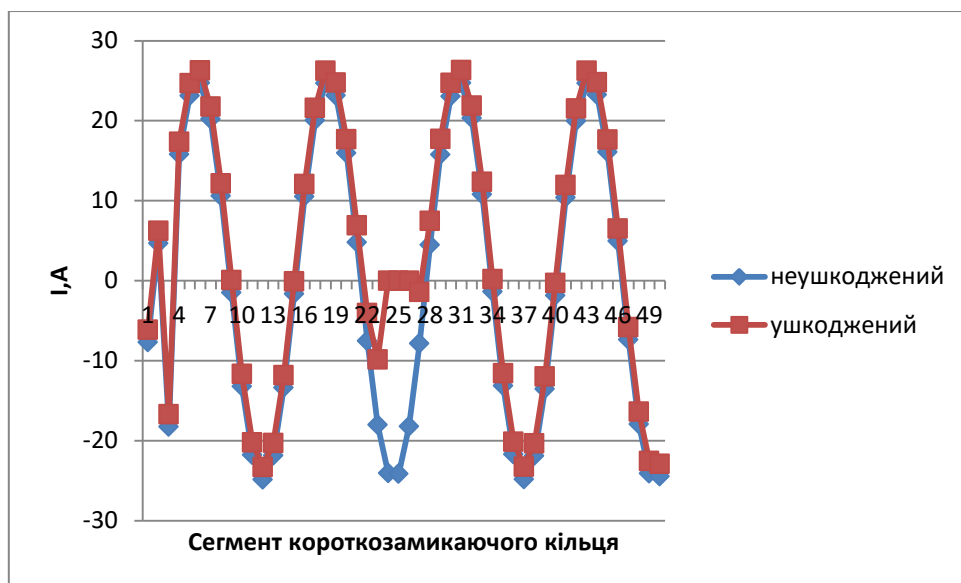


Рисунок 3.25 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M4У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

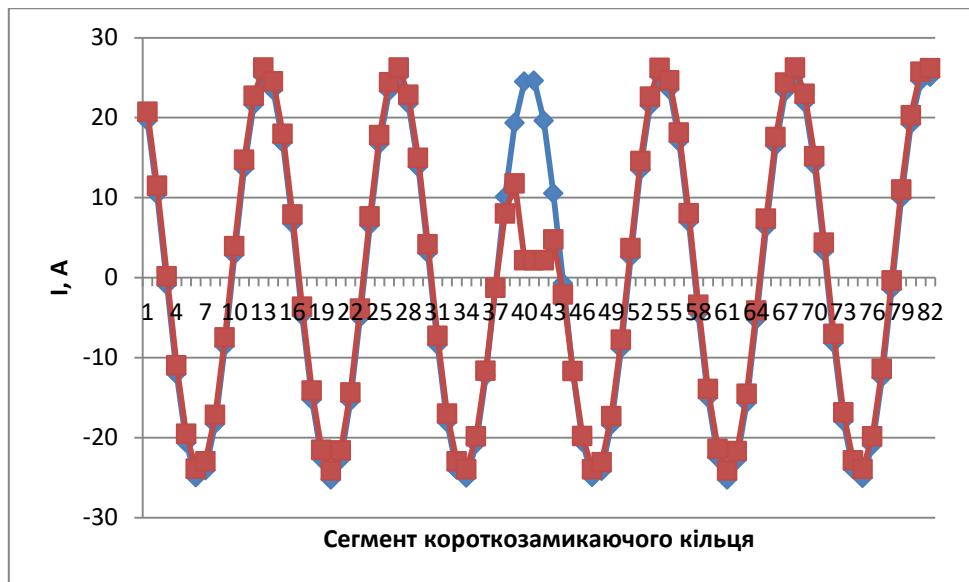


Рисунок 3.26 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М6У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

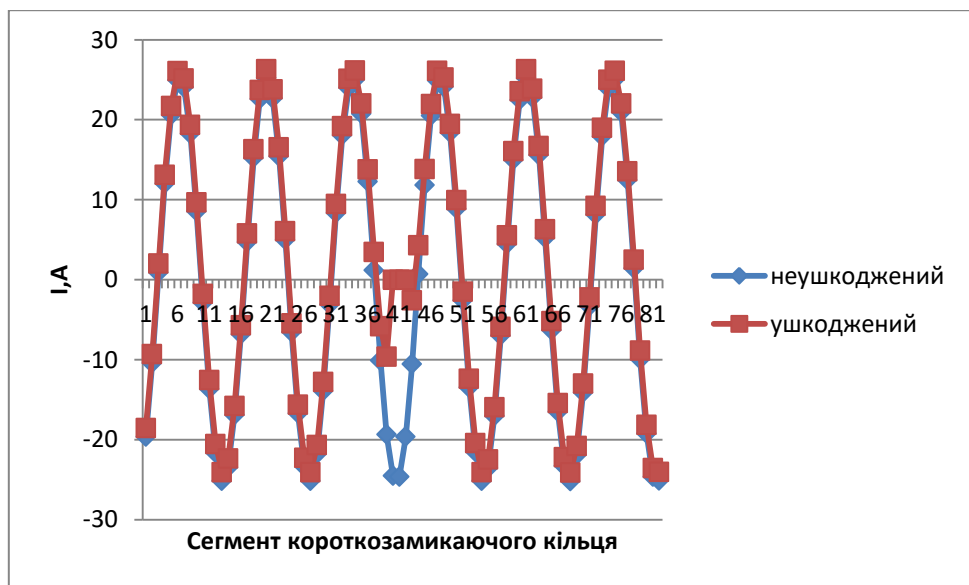


Рисунок 3.27 - Графік розподілу струмів двигуна 4А355М6У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

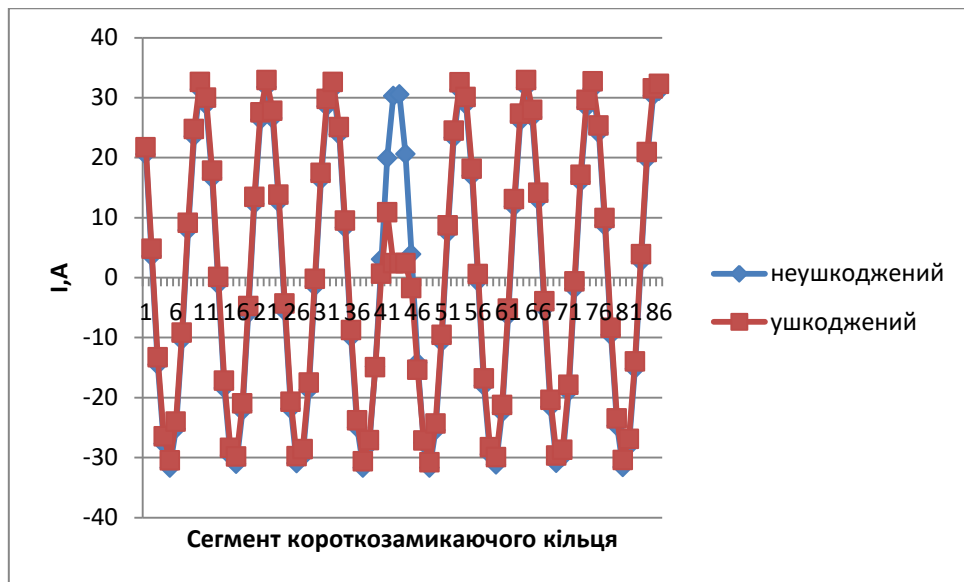


Рисунок 3.28 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M8У3 у лівому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

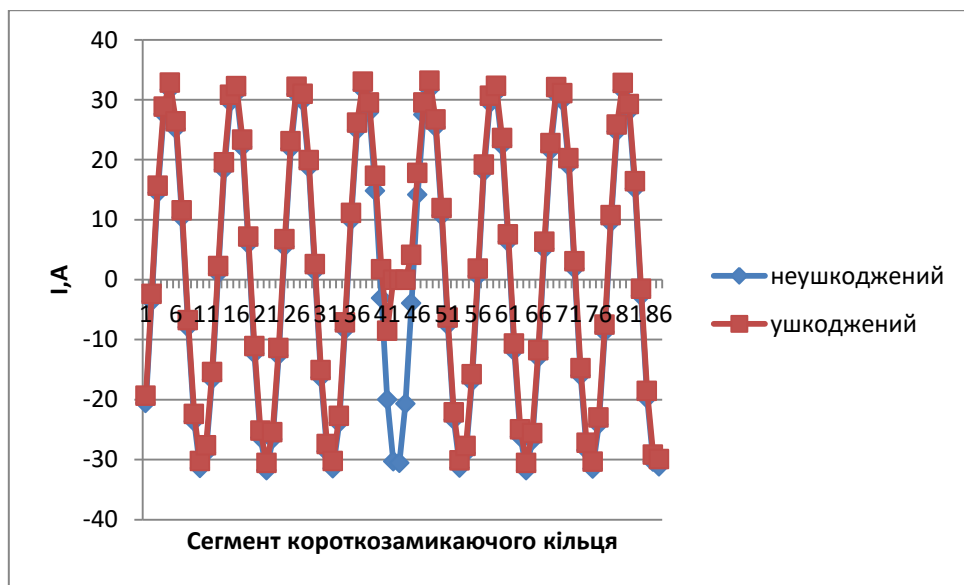


Рисунок 3.29 - Графік розподілу струмів двигуна 4A355M8У3 у правому СКК з синім – неушкодженими стрижнями ротора, та червоний – ушкоджені.

	m2L	m2R	m4L	m4R	m6L	m6R	m8L	m8R
$I_{пк_неушк}$	21,34586	21,34586	24,86266	24,8627	25,2225	25,22245	31,76429	31,7643
$I_{пк_ушк}$	23,11715	23,22772	26,42328	26,31399	26,29114	26,3206	32,97632	33,19476
$k_{пер}$	1,08298	1,08816	1,06277	1,05837	1,04297	1,043539	1,038157	1,04503

Таблиця 3.4 - Зведені навантаження стрижнів двигуна 4А355М8У3 при неушкоджені та ушкоджені взяті по модулю, та коефіцієнт перенавантаження струму.

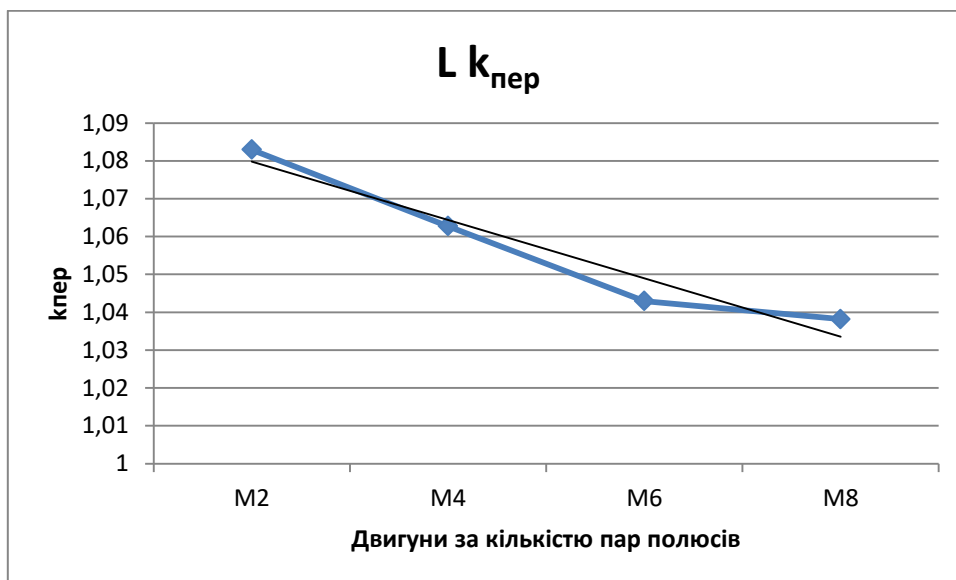


Рисунок 3.30 - Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перенавантаження.

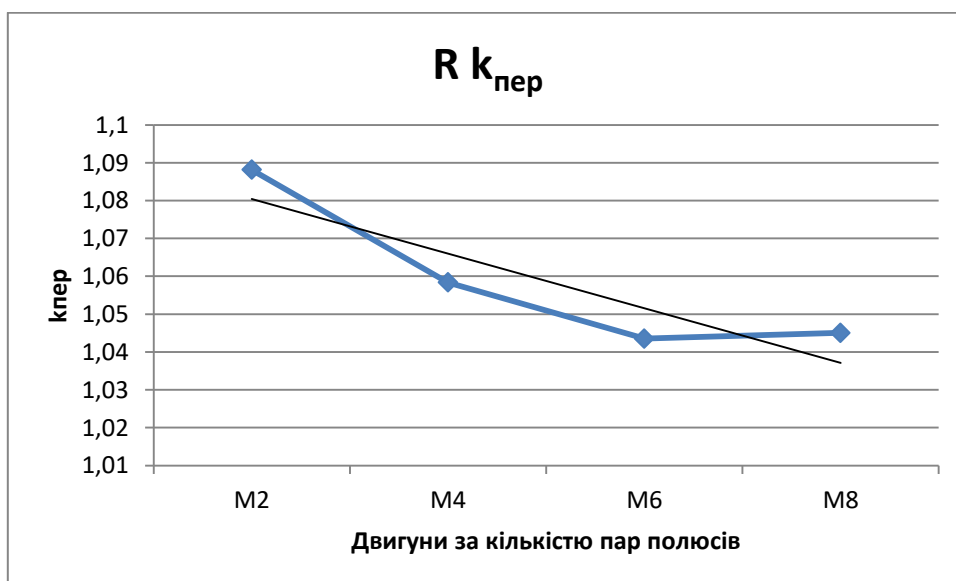


Рисунок 3.31 - Лінія тренда для графіку коефіцієнтів перенавантаження.

Звідси видно що із збільшенням потужності та збільшенням кількості пазів зменшується перевантаження при вибиванні 3-х стержнів а саме різниця між найбільшим піковим значенням синусоїди при не ушкодженій білячій клітці, у порівнянні з ушкодженою

Видно що із збільшенням кількості пазів на одиницю потужності струм перенавантаження буде менший при аварії двигуна.

Проміжні висновки:

Спершу у розділі 3.1 подаються дані розрахунку двигунів які мають однакову кількість пар полюсів але різні за номіналом потужності.

Ушкодженим елементом є стрижень ротора АД. Наступні розрахунки у розділі 3.2 ж мають відмінність у кількості пар полюсів.

Всі досліді було обраховано двічі при номінальному режимі та ушкодженому стрижні ротора. Ушкодженими були саме 3 стрижні, обумовлено тим що при вибитому одному стрижні наслідки будуть не такими значними.

Другим обрахунком було ушкодження коротко замикаючого кільця у розділах 3.3 та 3.4 для двох типів двигунів, поділених за тією ж логікою що і у розділі 3.1 та 3.2.

Всі дані були згруповані в таблиці та побудовані графіки для кращої візуалізації та сприйняття інформації.

Із розрахунків 3.1 отримані результати що вказують на критичне перевантаження що спричиняє перегрів у сусідніх стрижнях через збільшення струму, та нерівномірне магнітне потокозчеплення яка є початком вібрацій.

Із графіків для першого циклу обрахунку видно, що коефіцієнт перевантаження становить приблизно 1.8. Тобто з механічної точки зору струм у сусідніх стрижнях буде збільшений у 1.8 разів. А також

тепловиділення зросло в 3.24 рази, із розрахунку квадрату струму за законом Джоуля – Ленца.[13]

Основним висновком з графіків видно що при збільшені потужності двигуна, при цьому не змінюючи кількість пазів струм перевантаження буде пропорційно зростати. Звісно видно у другому двигуні більший коефіцієнт що є нерівномірним для графіку, але це спричинено через розрахунок миттєвих значень, що видно на рисунках 3.1-4. Це і впливає на відхилення в подальших розрахунках. Тому на рисунку 3.5 додана лінія тренду, для розуміння як змінюється залежність коефіцієнту перевантаження від збільшення потужності двигуна. Що підтверджує твердження що вказані [14-15].

Для двигунів які різняться між собою кількістю пар полюсів були проведені аналогічні досліді. Дані дали ж приблизно такі ж самі результати як і в попередньому обрахунку різниця лиш в тому, що при збільшені кількості пар полюсів коефіцієнт перевантаження струму в стрижні ротора буде пропорційно зменшуватися. Так як при однаковій потужності але з більшим розділення віток для проходження ерс, величина буде меншою через правило Кірхгофа.[16]

Ще два подібних досліді 3.2 та 3.4 для струмозамикаючих кілець показали аналогічні значення, що підтверджує попередні твердження.

Заключний графіко показує відношення кількості пазів двигуна до коефіцієнту рисунок 3.6 та спроектовано на тип двигуна, то видно як зменшується ця залежність. Це показує, що чим струми у стрижня менші то і навантаження на сусідні стрижні менше, а звідси що і двигуни будуть надійнішими при даних ушкодженнях.

Всі графіки побудовані та розраховані з даних миттєвих значень, тому точно стверджувати що такі будуть коефіцієнти перевантаження не можна. Але це дає нам приблизне уявлення і закономірність механіки процесу ушкоджень та розвитку майбутніх наслідків. Що в майбутньому використовуючи ці знання дає можливість передбачати ці ушкодження у

двигунах, на етапі виникнення проблеми, щоб потім не ремонтувати цілий двигун, а провести плановий ремонт та діагностику.

Висновок до розділу 3.

Були досліджені двигуни з однаковою кількістю пар полюсів, але різною номінальною потужністю (розділ 3.1). Ушкодження стрижня ротора призвело до критичного перевантаження і перегріву сусідніх стрижнів, з коефіцієнтом перевантаження приблизно 1.8 і збільшенням тепловиділення в 3.24 рази. Збільшення потужності двигуна пропорційно підвищувало струм перевантаження.

Для двигунів з різною кількістю пар полюсів (розділ 3.2) результати показали, що при збільшенні кількості пар полюсів коефіцієнт перевантаження струму зменшувався. Аналогічні результати були отримані для ушкодження коротко замикаючого кільця (розділи 3.3 і 3.4).

Заключні графіки показали, що зі збільшенням кількості пазів двигуна коефіцієнт перевантаження зменшується, що свідчить про зниження навантаження на сусідні стрижні та підвищення надійності двигунів при ушкодженнях. Ці знання допоможуть прогнозувати ушкодження на ранніх етапах та проводити планові ремонти і діагностику.

Розділ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Проблема невчасної діагностики асинхронних двигунів на виробничих підприємствах становить серйозну загрозу ефективності та безпеці роботи обладнання. Невчасна ідентифікація потенційних проблем може призвести до непередбачених аварій, збитків у виробництві через простої та витрат на неплановий ремонт, а також загрожує безпеці працівників. У разі великих виробничих об'єктів ця проблема стає особливо актуальною, оскільки невчасне виявлення несправностей може призвести до серйозних наслідків для виробництва та фінансової стабільності підприємства. Інноваційні технології, спрямовані на вчасну діагностику та моніторинг стану двигунів, можуть значно знизити ці ризики та покращити безпеку та продуктивність виробничих процесів.

Даний проект має перспективу бути застосований на наступних об'єктах:

Промислові компанії: великі компанії автомобільної, сталеливарної, хімічної та нафтогазової промисловості мають велику кількість асинхронних двигунів, що знаходяться в безперервній експлуатації. Діагностика стану цих двигунів може запобігти нещасним випадкам і зменшити витрати на ремонт.

Енергетика: теплові, вітрові та гідроелектростанції також використовують асинхронні двигуни для виробництва електроенергії. Ефективна діагностика може допомогти виявити потенційні несправності і підвищити ефективність роботи станції.

Будівельна галузь: Будівельна галузь використовує асинхронні двигуни в ліфтах, конвеєрах, насосах та інших механізмах. Діагностика допомагає підтримувати безперебійну роботу обладнання та запобігати нещасним випадкам.

Транспортна галузь. Асинхронні двигуни також використовуються в транспортній галузі в залізничних локомотивах, метро і на кораблях.

Діагностика допомагає забезпечити безпеку та ефективність цих транспортних засобів.

Сільське господарство: асинхронні двигуни також використовуються в різних механізмах при виробництві та переробці сільськогосподарської продукції. Діагностика може заощадити фермерам час і гроші, виявляючи потенційні проблеми з обладнанням.

Це лише деякі зі сфер, де може бути застосований стартап, але в залежності від специфіки ринку і потреб майбутніх клієнтів, можливе використання ще для більше обсягу. [20-23]

4.2 Приблизні фінансові розрахунки проекту

1. Витрати на розробку та впровадження технологій:

- Дослідження та розробка прототипу системи діагностики: 2,000,000 грн;
- Розробка програмного забезпечення для аналізу даних: 1,200,000 грн;
- Розробка пристрою для інфрачервоної томографії: 1,600,000 грн;
- Тестування та вдосконалення прототипу: 800,000 грн.

Загальні витрати на розробку технологій: 5,600,000 грн.

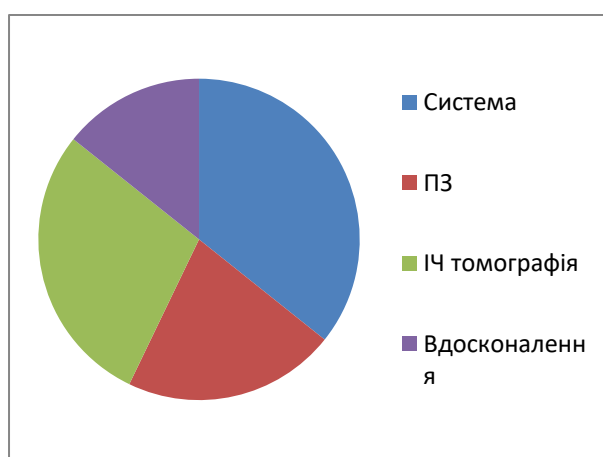


Рисунок 4.1 – Кругова діаграма на витрати на розробку та впровадження технологій

2. Витрати на маркетинг та продажі:

- Рекламні витрати: 800,000 грн;
- Участь у виставках та конференціях: 600,000 грн;
- Розробка матеріалів для маркетингу та PR-кампанії: 400,000 грн.

Загальні витрати на маркетинг та продажі: 1 800 000 грн.

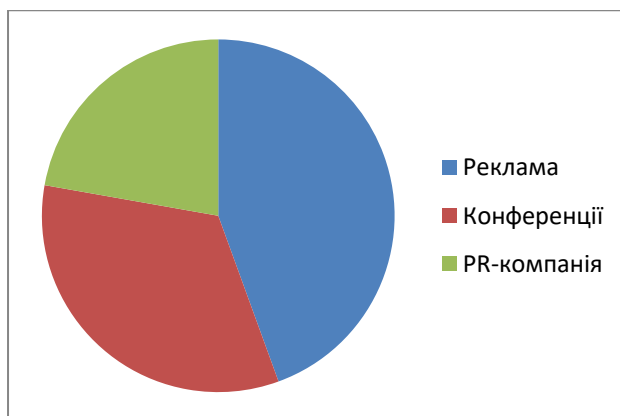


Рисунок 4.2 – Кругова діаграма на витрати на маркетинг та продажі

3. Очікувані доходи:

- Ціна ліцензії на один двигун потужністю 50 кВт: 400,000 грн;
- Ціна ліцензії на один двигун потужністю 75 кВт: 580,000 грн;
- Ціна ліцензії на один двигун потужністю 100 кВт: 700,000 грн;
- Приблизний середній річний дохід від від підписок та послуг діагностики: 4,000,000 грн.

Загальні очікувані доходи: 5,680,000 грн.

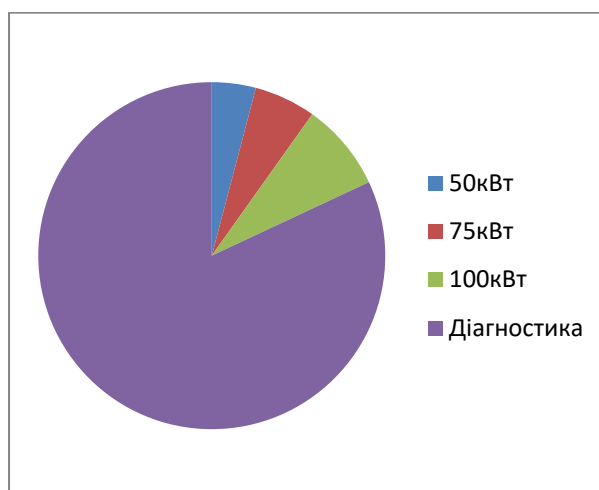


Рисунок 4.3 – Кругова діаграма очікуваних доходів

4. Вигідність та ROI:

- Приблизний чистий прибуток (доходи мінус витрати):
 $5,680,000 - (5,600,000 + 1,800,000) = 4,940,000$ грн.

- Розрахунок строку окупності: $\text{Строк окупності} = (\text{Витрати на розробку} + \text{Витрати на маркетинг}) / \text{Річний прибуток} = (5,600,000 + 1,800,000) / 4,940,000 \approx 1,5 \text{ року (приблизно 18 місяців)}$
- Чистий приведений дохід (NPV) та внутрішня норма прибутковості (IRR) можуть бути розраховані з урахуванням часової вартості грошей та інших фінансових факторів.

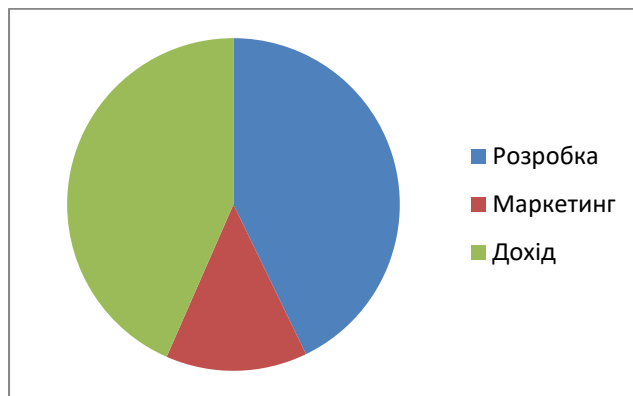


Рисунок 4.3 – Кругова діаграма відношення затрат до доходів стартап проекту

Ці числа є лише приблизними і можуть змінюватися в залежності від різних факторів, таких як ринкові умови, конкуренція та внутрішній розвиток вашого стартапу. Однак вони можуть служити початковою точкою для оцінки вигідності вашого проекту. [24-28]

4.3 Висновки до розділу 4

На підставі аналізу фінансових показників та планування витрат можна зробити висновок щодо перспектив старту. Перш за все, розрахунки показують значну виявлену рентабельність проекту, що забезпечує його можливу вигідність для інвесторів та підприємства в цілому. Прогнозований рядок обсягу вкладених коштів у проект вкрай низький, що свідчить про його швидку рентабельність та ефективність.

Далі, розгорнутий аналіз показав, що ринкові умови та потреби сприятливі для успішної реалізації проекту. З огляду на показову клієнтську базу,

конкурентоспроможність технологій та ринкові можливості, існує чітка перспектива комерціалізації та прибутковості проекту.

Нарешті, для успішної реалізації проекту необхідно звернути увагу на вибір оптимальних стратегій та технологій. Необхідно акцентувати увагу на розвитку та вдосконаленні системи управління, що дозволяє забезпечити конкурентоспроможність продукту на ринку.

Отже, на основі вихідного аналізу можна стверджувати, що реалізація цього стартапу має перспективи на успіх та може стати великим вкладом у розвиток промислового сектору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Огляд сучасної літератури щодо ушкоджень білячої клітки асинхронного двигуна виявив складнощі виявлення дефектів без зупинки двигуна через високу швидкість обертання. Інфрачервона томографія та аналіз струмів стержнів є перспективними методами діагностики. Інфрачервона томографія дозволяє неінвазивно визначати температурні розподіли та незримі дефекти, а аналіз струмів виявляє зміни, пов'язані з ушкодженнями. Ці методи корисні для моніторингу стану асинхронних двигунів у реальному часі, забезпечуючи їх безперебійну та ефективну роботу.

У цій роботі проведено математичне моделювання обриву стрижня ротора в білячій клітці асинхронного двигуна з використанням різних параметрів: тип двигуна, ковзання, пусковий момент, геометрія стрижня та кільця, густина струму в роторі та статорі, електромагнітні параметри. За допомогою Excel і Multisim створено детальну модель ротора для аналізу сценаріїв обриву стрижня.

Результати показали, що обрив стрижня збільшує струм у сусідніх стрижнях, що важливо для оцінки стану та прогнозування відмов двигуна. Математичне моделювання дозволяє ефективно досліджувати можливі сценарії руйнування ротора та розробляти стратегії попередження аварій. Використання Multisim допомагає будувати детальні схеми та вивчати характеристики електромагнітного поля.

Отримані результати корисні для підвищення надійності та безпеки роботи асинхронних двигунів у сфері електротехніки та машинобудування.

Були досліджені двигуни з однаковою кількістю пар полюсів, але різною номінальною потужністю. Ушкодження стрижня ротора призводило до критичного перевантаження і перегріву сусідніх стрижнів, з коефіцієнтом перевантаження 1.8 і збільшенням тепловиділення в 3.24 рази. Збільшення потужності двигуна пропорційно підвищувало струм перевантаження.

Для двигунів з різною кількістю пар полюсів результати показали, що зі збільшенням кількості пар полюсів коефіцієнт перевантаження струму зменшується. Аналогічні результати були отримані для ушкодження короткозамикаючого кільця.

Заключні графіки показали, що зі збільшенням кількості пазів двигуна коефіцієнт перевантаження зменшується, що знижує навантаження на сусідні стрижні та підвищує надійність двигунів при ушкодженнях. Ці знання допоможуть прогнозувати ушкодження на ранніх етапах та проводити планові ремонти і діагностику.

На підставі аналізу фінансових показників та планування витрат, проект виглядає перспективним для старту. Розрахунки показують високу рентабельність, що робить його привабливим для інвесторів. Низький обсяг вкладених коштів свідчить про швидку рентабельність та ефективність проекту.

Аналіз ринкових умов та потреб вказує на сприятливі умови для успішної реалізації проекту. Враховуючи клієнтську базу, конкурентоспроможність технологій та ринкові можливості, існує чітка перспектива комерціалізації та прибутковості.

Для успішної реалізації проекту необхідно вибрати оптимальні стратегії та технології, а також удосконалити систему управління для забезпечення конкурентоспроможності продукту.

Отже, проект має високі перспективи на успіх та може суттєво сприяти розвитку промислового сектору.

Перелік посилань

1. В. Г. Петров та І. В. Сидоренко. "Діагностика електромеханічних систем". Київ: Техніка, 2017, с.56 - 79.
2. К. А. Страшко, О. В. Горбань, та В. І. Кулинич. "Електроприводи промислових робіт: діагностика та ремонт". Київ: Наукова думка, 2019, с.123 - 125.
3. Васьковський Ю.М., Гераскін О.А., Коваленко М.А. Аналіз віброзбуджуючих сил в асинхронних двигунах при обриві сегментів короткозамикаючих кілець обмотки ротора на основі коло-польової математичної моделі// "Електротехніка і електромеханіка", №5, 2011, с.18 - 22
4. Р. В. Васильєв та І. С. Кузнецов. "Дослідження методів діагностики ушкоджень білячої клітки асинхронних двигунів". Матеріали конференції "Енергоефективність та енергозбереження", 2020, с. 45-51.
5. Д. А. Горбач та О. П. Коваленко. "Використання тепловізійних камер у діагностиці асинхронних двигунів". Журнал "Електротехніка та електромеханіка", 2018, с. 178-185.
6. A Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Interturn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines / C.-C. Yeh et al. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008. Vol. 23, no. 4. P. 1005–1014. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2008.2001443> .
7. Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Based on Rotor Flux Angle Monitoring / M. Nemeč et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 5. P. 794. URL: <https://doi.org/10.3390/en12050794>
8. Rodriguez-Cortes H., Hadjicostis C. N., Stankovic A. M. Model-based broken rotor bar detection on an IFOC driven squirrel cage induction motor. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, MA, USA, 30 June – 2 July 2004. 2004. URL: <https://doi.org/10.23919/acc.2004.1384384>
9. da Silva A. M., Povinelli R. J., Demerdash N. A. O. Induction Machine Broken Bar and Stator Short-Circuit Fault Diagnostics Based on Three-Phase Stator

- Current Envelopes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 3. P. 1310–1318. URL: <https://doi.org/10.1109/tie.2007.909060>
10. Lopez-Perez D., Antonino-Daviu J. Application of Infrared Thermography to Failure Detection in Industrial Induction Motors: Case Stories. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, no. 3. P. 1901–1908.
URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2655008>
11. А. Е. Кравчик, М. М. Шлаф, В. І. Афонін, О. А. Соболенська Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник. Енергвидат, 1982. -504 с.
12. Электродвигатель 315 кВт 1500 об/мин – АИР355М4 | АИР 355М4 | АИР 355 М4 – цены и характеристики. *АІР Україна*. URL: https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodvigatelej_air/air-355m4-315-kvt-1500-ob-min/#gallery-1.
13. Сервей, Р. А., и Джуэтт-младший, Д. В. Фізика для науковців та інженерів із сучасною фізикою. Cengage Learning. 2012, с. 712-713.
14. Лауман, Г. Проектування і виробництво низькошвидкісних високопотужних двигунів. *Машинобудування та автоматизація*, 2009, с. 21-25.
15. Bhatia, J. S. Large High-Performance Electric Motors. CRC Press 2019, с.47-56.
16. Васьковский Ю.М., Гераскин О.А. Математичне моделювання електромагнітних полів в короткозамкнутому асинхронному двигуні з ушкодженою обмоткою ротора // *Технічна електродинаміка №2*, 2010, с.56-61.
17. Микитюк О.Ю., Гераскін О.А., Чумак В.В., Реуцький М.О., Цивінський С.С. Огляд статей щодо проблематики появи ушкоджень роторів асинхронних двигунів. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. 2023. № 1. С. 209-211.
<http://jour.fea.kpi.ua/article/view/302475/294474>
18. Шевчук О.А., Микитюк О.Ю. Перспективи енергетичного розвитку України у період післявоєнної відбудови. *Збірник тез доповідей XVI*

Всеукраїнської наукової-практичної конференції з міжнародною участю "Моделювання та прогнозування економічних процесів", Київ, 2022, с.99.

19. Geraskin O.A., Influence of the turbogenerator damage on the reliability of its operation/ O.A. Geraskin, O.Y. Mikityuk // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" – Київ: «Політехніка». – 2021. – № 1. – С. 255-259.

<http://jour.fea.kpi.ua/article/view/254917/252021>

20. R. D. De Mattos, A. S. Nascimento, L. F. A. Pereira "Predictive Maintenance of Rotating Machinery: Advanced Techniques and Tools for Improvement" - 2017, с. 58-64.

21. A. Tse, S. Gan, W. Yeung "An Overview of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Diesel Engines", 2010, с.17-25.

22. "Market Study Report: Predictive Maintenance Market" - Grand View Research, 2020, с.10-58.

23. M. J. Devaney, M. E. El-Hawary "A Review of Motor Current Signature Analysis for Motor Fault Detection: History, Methodologies, and Applications" 2015, с. 78-90.

24. Піс, Е. Ощадливий стартап: як сучасні підприємці використовують безперервні інновації для створення надзвичайно успішного бізнесу. Корона Бізнес, 2011, с.41-66.

25. Osterwalder, A., & Pigneur, Y. Business Model Generation: A Guide for Visionaries, Rule Changers, and Challengers. Wiley, 2010, с. 178-190.

26. Olsen, D. The Lean Product Playbook: How to innovate with a minimum number of viable products and quick customer feedback. Wiley. 2015, с. 3-14.

27. Blank, S. and B. Dorf. The Startup Owner's Handbook: A step-by-step guide to building a great company. Wiley, 2012, с. 39-58.

28. Mauria, A. Lean work: move from plan A to a plan that works. O'Reilly Media, 2012, с. 85-101.