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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису» УДК _____ «До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ В.Ф. Шинкаренко

"___"___20__p.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему: «Високочастотні процеси в електричних машинах при погіршенні стану ізоляційної конструкції»

Виконав: студент VI курсу, групи EM-71мн Стулішенко Андрій Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент Чумак Вадим Володимирович

Рецензент: доцент, кандидат технічних наук Островерхов М. Я.

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

Студент _____

Київ – 2019

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою магістра

Спеціальність (спеціалізація) 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Електричні машини і апарати»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____В.Ф.Шинкаренко

« » 2019 p.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Стулішенко Андрію Сергійовичу

1. Тема дисертації <u>Високочастотні процеси в електричних машинах зі всипними</u> обмотками при погіршенні стану ізоляційної конструкції двигуна.

науковий керівник дисертації <u>Чумак Вадим Володимирович</u>, , (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 21.03.2019, № 941-С

2. Термін подання студентом дисертації <u>16.05.2019</u>

3. Об'єкт дослідження: <u>ізоляційна конструкція обмоток малопотужних електричних</u> машин загального призначення зі всипними обмотками.

4. Предмет дослідження: високочастотні процеси в обмотках електричних машин загального призначення при штучному тепловологому старінні і при наявновсті локальних дефектів ізоляції обмоток.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _

5.1 <u>Аналіз існуючих методів діагностики ізоляції обмоток електродвигунів. 5.2 Зняття</u> частотних характеристик на двигуні стенді. 5.3 Аналіз знятих частотних харатеристик <u>5.4 Математичне моделювання частотних характеристик за допомогою схеми заміщення</u> <u>в MatLab Simulink 5.5 Розробка стартап-проекту впровадження результатів досліджень</u> 6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу <u>Плакати:1.Експериментально зняті</u> частотні характеристики двигуна. 2. Змоделювані в пакеті MatLab Simulink частотні Мінімізації втрат в режимі 3.-4 характеристики реостатного пуску. 5-6. Результати моделювання частотних характеристик в пакеті програмного забезпечення MatLab Simulink.

7. Орієнтовний перелік публікацій 1) Стаття в журнал «Енергетика: економіка технології, екологія» назва – «Аналіз високочастотних процесів в асинхронних двигунах зі всипними обмотками на основі ланшюгових схем замішення»

2) Стаття в журнал «Енергетика: економіка технології, екологія» назва – « Удосконалена високочастотна модель асинхронного двигуна»

3) Стаття в журнал «Гідроенергетика України» назва – «Методи та засоби виявлення дефектів міжвиткової ізоляції електричних машин з багатовитковими котушками»

		Підпис, дата		
Розділ	консультанта	завдання видав	завдання прийняв	

8. Консультанти розділів дисертації

9. Дата видачі завдання

01.09.2017

	Календ	арнии план	
Nº ⊳∕म	Назва етапів виконання	Термін виконання етапів	Примітка
3/11	мапстерської дисертації	магистерської дисертації	_
1.	Дослідити основні параметри для	01.04.2019	
	контролю стану ізоляції обмоток		
	електричних машин		
2.	Розглянути вхідні опори обмоток, як	10.04.2019	
	узагальнені параметри		
3.	Зняття частотних характеристик при	30.04.2019	
	підключенні трьох фаз двигуна.		
4.	Зняття частотних характеристик при	03.05.2019	
	підключенні однієї фази двигуна.		
5.	Побудова частотних характеристик за	08.05.2019	
	допомогою MatLab Simulink		
6.	Оформленні текстової та графічної	14.05.2019	
	частини дисертації		

Студент

(підпис)

(підпис)

Стулішенко А.С.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Чумак В.В. (ініціали, прізвище) 3

Реферат

Дипломна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 108 сторінках формату А4 і містить в собі 81 рисунок, 17 таблиць та 26 джерел використаної літератури. Графічна частина містить 18 слайдів презентації з кресленнями, графіками та таблицями, які візуалізують результати дослідження.

Об'єктом дослідження являвся ізоляційна конструкція обмоток малопотужних електричних машин загального призначення зі всипними обмотками.

Метою роботи є оцінка діагностичних параметрів в умовах тепловологих впливів на малопотужні електричні машини загального призначення зі всипними обмотками при використанні високочастотних процесів і моделюванні інтегральних та локальних дефектів ізоляції.

В даній магістерській десертації проаналізовано основні параметри для контролю стану ізоляції обмоток електричних машин, досліджено вхідні опори обмоток як узагальнені параметри, проведено розрахунок високочастотних процесів в обмотці за допомогою ланцюгових схем заміщення в середовищі MatLab Simulink. Проведено експериментальні дослідження на реальному двигуні 4A80A4 УЗ здійснено порівняння з теоретичними результатами. Запропоновано спосіб виявлення дефектів корпусної ізоляції в залежності від місця розташування дефекту, а також метод виявлення КЗ витків в багатовиткових асинхронних двигунах загального призначення.

Ключові слова: електрична машина, високочастотні процеси, імпеданс, вхідні опори, ланцюг з розподіленими параметрами, короткозамкнений виток, дефектність.

Abstract

Master's diploma work consists of explanatory note and graphics parts. Explanatory note consists of 108 pages of A4 size, which include 81 pictures, 17 tables and 26 sources of literature. Graphical part contains 18 slides of technical drawings.

In this certification baccalaureate thesis analyzed the basic parameters for monitoring of insulation windings of electrical machines, studied the input resistance of windings as generalized parameters, done calculation of high frequencies winding processes by using chain circuits in MatLab Simulink. Done experimental study on the real engine 4A80A4 KM, done comparison with theoretical results. A method for detecting defects of frame insulation proposed, that method depend on the location of the defect, and proposed method for detect a short circuit turns of multiturn induction motors for general purpose.

Key words: electric machine, high frequency processes, impedance, terminal impedance, distributed parameter circuit, shorted turn, unsoundness.

Перелік умовнх скорочень

- АД асинхронний двигун;
- ЕМ електрична машина;
- ЕМПЕ електромеханічний перетворювач енергії;
- ЕРС електрорушійна сила;
- ККД коефіцієнт корисної дії;
- АМ асинхронна машина;
- XX холостий хід;
- ЛСЗ –ланцюгова схема заміщення;
- XX холостий хід;
- КЗ коротке замикання;
- КЗ виток короткозамкнений виток.
- tg δ тангенс кута діелектричних втрат
- ЛРП ланцюг з розподіленими параметрами
- ОЛС однорідна ланцюгова схема
- ЛРП ланцюг з розподіленими параметрами

Мета дослідження. Оцінка діагностичних параметрів в умовах тепловологих впливів на малопотужні електричні машини загального призначення зі всипними обмотками при використанні високочастотних процесів і моделюванні інтегральних та локальних дефектів ізоляції.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз зарубіжної та відчизняної технічної літератури по даній темі;
- дослідження математичної моделі обмотки і дослідне визначення параметрів обмотки
- експериментальне визначення високочастотних характеристик;
- складання схеми заміщення в пакеті MatLab Simulink і розрахунок її параметрів;
- моделювання частотних характеристик в пакеті MatLab Simulink.

Об'єкт дослідження — ізоляційна конструкція обмоток малопотужних електричних машин загального призначення зі всипними обмотками.

Предмет дослідження – високочастотні процеси в обмотках електричних машин загального призначення при штучному тепловологому старінні і при наявновсті локальних дефектів ізоляції обмоток.

Методи дослідження

1) Прикладні методи теорії лінійних та нелінійних кіл

2) Пришвидшенні випробування двигуна при тепловологих впливах

3) Експериментальні виміри та аналіз вхідних опорів по частотним характеристикам за допомогою стандартних схемвимірювань.

4) Комп'ютерне моделювання високочастотних процесів в обмотках електричних машин за допомогою ланцюгових схем заміщення.

Наукова новизна одержаних результатів

1) за допомогою порівняльного аналізу основних параметрів, що використовуються для контроля стану ізоляції обмоток в умовах послідовного циклу

тепловологих впливів, визначено узагальнений параметр, а саме частотні залежності вхідних опорів обмоток.

2) Створено нову математичну модель в пакеті MatLab Simulink при використанні ланцюгових схем заміщення з можливістю моделювання інтегральних та локальних дефектів ізоляції обмоток.

Практичне застосування одержаних результатів – на основі проведених досліджень визначено, що найбільш інформативним методом оцінки стану ізоляції обмоток є вимір вхідних опорів на резонансних частотах, які несуть інформацію про втрати в системі у порівнянні з новою конструкцією.

Публікації

1)Стаття в журнал «Енергетика: економіка технології, екологія» назва – «Аналіз високочастотних процесів в асинхронних двигунах зі всипними обмотками на основі ланцюгових схем заміщення»

 Стаття в журнал «Енергетика: економіка технології, екологія» назва – «Удосконалена високочастотна модель асинхронного двигуна»

3) Стаття в журнал «Гідроенергетика України» назва – «Методи та засоби виявлення дефектів міжвиткової ізоляції електричних машин з багатовитковими котушками»

4) Стаття в журнал «Гідроенергетика України» назва – «Удосконалення вторинних параметрів для розрахунку частотних характеристик низьковольтних електричних машин змінного струму зі всипними обмотками»

5) Тези в «Праці Таврійського державного агротехнологічного університету» назва – «Діагностичні ознаки тепловологого старіння ізоляції при аналізі частотних характеристик малопотужних електричних машин»

6) Стаття в «Праці Таврійського державного агротехнологічного університету» назва –«Частотні характеристики електричних машин зі всипними обмотками при тепловологому старінні»

3MICT	
Реферат	
Abstract	5
Перелік умовнх скорочень	6
Вступ	11
I. ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ	13
1.1. Існуючі методи діагности ізоляції обмоток електродвигунів	13
1.2. Основні типи дефектів	23
1.3. Зволоження ізоляції	26
1.4. Цикли тепловологого старіння на прикладі асинхронного двигуна 4А80А4УЗ	31
II. ВИСОКОЧАСТОТНІ ПРОЦЕСИ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	39
2.1 Математична модель обмотки	39
2.2 Порівняння частотних залежностей різних моделей обмотки	39
2.3. Основні параметри машини, які визначають частотні характеристики	45
2.4. Залежність параметрів обмотки від частоти	47
2.5. Дослідне визначення параметрів	48
2.6 Вимір частотних залежностей вхідних опорів	50
III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ДЕФЕКТАМИ ІЗОЛЯЦІЇ	ЮТКАХ 52
3.1 Експериментальні частотні характеристики нової, нової зволоженої, старої і старої зво ізоляції	эложеної 52
3.3. Вплив локальних дефектів ізоляції електричних машин зі всипними обмотками на ви частних характеристик	ігляд 57
3.3 Моделювання пробою в міжвитковій ізоляції	63
3.4 Моделювання міжвиткового дефекту в міжвитковій ізоляції при новому та зістареном ізоляційної конструкції.	у стані 74
IV. РОЗРАХУНОК ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТЦІ АСИНХРОННОГО Д ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MatLab Simul	ВИГУНА ink 80
4.1 Побудова частотних характеристик за допомогою MatLab Simulink	80
4.1.1 Моделювання дефекту в корпусній ізоляції	80
4.1.2 Розрахунок додаткової ємності утвореної внаслідок старіння та зволоження ізолят конструкції двигуна та моделювання частотних характеристик в MatLab Simulink	(ійної 84
4.1.3 Моделювання графіків в MatLab Simulink для нової і зістареної ізоляції з дефекто міжвитковій ізоляції.	м в 90
V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	
5.1 Проблема та цільова аудиторія проекту	95
5.1.1 Рішення та його новизна	95
5.1.2 Технологічний аудит ідеї проекту	
5.1.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.	

n .

5.1.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	. 100
ВИСНОВКИ	. 101
Список використаної літератури	. 104

Вступ

Електричні машини малої потужності складають переважну більшість серед усіх електричних машин. Так як, ці машини, можна сказати, є машинами масового застосування. Вони встановлюються практичних у всіх побутових і промислових пристроях і механізмах. Ці машини, як правило, прості за конструкцією, а простота, як відомо, запорука надійності. Саме тому, такі машини прагнуть завжди виконувати безконтактними. Серед них особливе місце займають асинхронні двигуни з різними типами роторів. Однак основною перевагою і одночасно недоліком цих машин є, проста по виготовленню, всипна обмотка статора, виготовлена з емальованого дроту круглого перетину.

Незважаючи на постійне вдосконалення ізоляції статорних обмоток, застосування нових матеріалів, поліпшення технологій нанесення лакової ізоляції на дріт, застосування спеціальних методів просочення і сушіння, високоточних методів укладання обмоток і складання машин, на сьогоднішній день не вдається впорається з проблемою низької надійності ізоляції ЕМПЕ малої потужності.

Проблема надійності, перш за все, виткової ізоляції всіх котушкові обмоток електричних машин, які застосовуються в багатьох ЕМПЕ напругою до 10 кВ, залишається актуальною внаслідок подальшого зростання кількості відмов через металевих виткових замикань. Особливо, це стосується машин з великим числом витків в фазі, так як питома міцність міжвиткових ізоляційних перекриттів значно зменшується в результаті різних технологічних операцій з тонким емальованим дротом. Особливої гостро ця проблема має місце серед двигунів, які пройшли, неодноразовий ремонт.

Незважаючи на значний інтерес дослідників до цього питання, проблема створення високочутливих методик виявлення одиночних КЗ витків в багатовиткових котушках повністю не вирішена досі. У великій кількості робіт [1, 2] використовувалася ідея високочастотного діагностування обмоток. Ці методи можна вважати передовими при діагностиці ізоляції обмоток ЕМ і знаходженні виткових замикань, так як вони є неруйнівними методами контролю. Перевага, перш за все, в тому, що випробування можна проводити багаторазово, не вносячи пошкоджень в обмотку при самих випробуваннях. Що дуже важливо для виробництва і ремонту ЕМ, так як дозволяє економити при їх виготовленні, надаючи можливість виявити дефект на ранніх стадіях виробництва або ремонту, наприклад, відразу після укладання обмотки в пази.

Крім того, важливо і те, що при сучасному розвитку перетворювальної техніки і низької вартості малопотужних напівпровідникових елементів, високочастотні методи, запропоновані нижче, є найбільш економічно вигідними.

Їх універсальність полягає в тому, що вони можуть бути застосовані для всіх типів машин, не залежно від потужності. Високочастотні методи легко автоматизуються для контролю або постійного стеження за станом обмотки електричної машини в відповідальних приводах.

Звичайно, уникнути відмов обмоток ЕМ все одно не вдасться, так як вони постійно перебувають під впливом різних шкідливих електричних, механічних, магнітних і кліматичних факторів. Однак підвищити надійність ЕМ шляхом зниження кількості виробничих і ремонтних дефектів, застосовуючи діагностику високочастотними методами контролю, цілком реально.

Саме тому, дана робота є продовженням розробки методів знаходження міжвиткових замикань при підвищеній частоті. Нижче розглянуті хвильові процеси, що протікають в обмотках ЕМ і впливають на параметри різних фаз обмотки. Як випробуваної машини обраний серійний АТ з короткозамкненою обмоткою ротора, як машина найпоширеніша серед усього числа ЕМ.

І. ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ

1.1. Існуючі методи діагности ізоляції обмоток електродвигунів

В процесі виготовлення і експлуатації електричні вироби піддаються різним впливам, здатним значно погіршити їх властивості.

При виготовленні ізоляційні конструкції піддаються:

a) при сушці і просоченні ізоляції впливу високих температур, в ряді випадків значно вище їх класу нагрівостійкості. При необхідності двох- і трикратних просочень, так як це має місце при виготовленні електрообладнання для роботи в країнах з тропічним кліматом.

б) при виготовленні обмоток в результаті механічного впливу, передусім витягування проводу, може відбутися пошкодження ізоляції проводу. Дефекти які виникли в плівці емалі призводять до значного зниження пробивної напруги виткової ізоляції а також до зниження класу нагрівостійкості обмотки. Механічні напруження, які виникають в плівці емалі в результаті витягування проводу, продовжують діяти при експлуатації виробів і сприяють пришвидшеному старінню виткової ізоляції. Для більшості емальованих проводів допустиме витягування не повинно перевищувати 10%, так як при більшому витягуванні різко зменшується термін дії виткової ізоляції;

в) на ізоляцію обмотувальних проводів, особливо емальованих, чинять сильний вплив просочувальні лаки і компаунди. Застосовувані в даний час просочувальні лаки і компаунди на основі синтетичних смол повинні бути ретельно перевірені на сумісність з витковою ізоляцією обмотувальних проводів, так як можливі значні пошкодження емалевої ізоляції при просоченні. Пошкодження можуть викликати, як розчинники лаків, так і плівкоутворювальні речовини [3]. Пошкодження емалевої ізоляції проводів може відбуватися і під дією плівкоутворювальної речовини лаку для просочування.

При експлуатації електротехнічних виробів вони піддаються комплексному впливу наступних факторів: 1) нагрівання, зумовленого протіканням струму по провідниках, діелектричним втратам та втратами в феромагнітних сердечниках; 2) механічним напругам, що виникають в результаті різного значення коефіцієнта лінійного розширення використовуваних матеріалів (термомеханічні напруги). Ці напруги особливо небезпечні при наявності термореактивної ізоляції, що не володіє досить високою еластичністю; механічною напругою, обумовленою взаємодією провідників при протіканні по ній струму, від відцентрових сил в обертових частинах, від вібрацій; 3) дії електричного поля. Виникаючі часткові розряди в газових включеннях ізоляції призводять до передчасного виходу з ладу ізоляції; 4) впливів кліматичних факторів зовнішнього середовища: температури, вологості повітря, тиску повітря або газу (висоти над рівнем моря),сонячного випромінювання, дощу, вітру, пилу (у тому числі сніжного), зміни температур, соляного туману, інію, гідростатичного тиску води, дії цвілевих грибів, вмісту в повітрі корозійно-активних агентів [4].

Найбільш жорсткі кліматичні чинники зовнішнього середовища, що діють у державах Африки, Азії, Південної та Центральної Америки.

Основними документами, що регламентують умови експлуатації електричних машин, є стандарти, що визначають загальні технічні вимоги до електричних машин. [5].

Умови роботи ізоляційних матеріалів, крім стандартів на машини, регламентуються у відповідності з нормативними документами і відповідними публікаціями.

В процесі експлуатації і зберігання відбувається розвиток дефектів як "закладених" у процесі виготовлення, так і новостворених.

В процесі роботи на обмотки електричних машин впливають електромагнітні та механічні зусилля, які досягають великих значень при пусках і реверсуванні. Так, пускові струми короткозамкнених електродвигунів перевищують номінальні у 5-7 разів, у зв'язку з чим на обмотки діють значні електродинамічні сили значення яких пропорційні квадрату струму. Під дією цих зусиль в ізоляції виникають тріщини, а також механічні пошкодження[4].

Розвиток дефекту ізоляції відбувається під впливом зволоження, термічних руйнувань, механічних пошкоджень, електричного поля робочої напруги і перенапруги, забруднень і т. п.

Попадання вологи зазвичай пов'язано зі зміною температурних умов. Процес утворення дефекту і руйнування ізоляції протікає спочатку досить повільно і лише на останніх стадіях має стрибкоподібний характер, закінчуючись коротким замиканням, вибухом і руйнуванням ізолятора. Іноді волога яка потрапила встигає випаруватися під дією тепла, що виділяється. Якщо при цьому не утворилося провідного каналу, процес розвитку дефекту може призупинитися.

Термічні руйнування виникають внаслідок нагрівання при перенавантаженнях і при протіканні струмів короткого замикання.

До зносу ізоляції може призводити тертя між витками і витків об корпусну ізоляцію, що виникає в електричних машинах через різні коефіцієнти теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається при нагріванні електричних машин під час пуску і роботи, а також при охолодженні після її вимкнення з мережі.

Процес розвитку дефектів у міжвитковій ізоляції всипних обмоток електричних машин можна представити наступним чином. Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, що виражається в її усиханні, випаровуванні летких компонентів, втрати еластичності, виникнення пор і тріщин. У найбільш "слабких" місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, що мають низьке значення напруги пробою. У моменти перенапруги (атмосферних або комутаційних) в місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожному наступному перенапруженні, значення якого перевищує напругу пробою місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до тих пір, коли в місці дефекту починає виникати дуговий розряд від робочої напруги між витками. В цьому випадку відбувається повне міжвиткове замикання і обмотка електродвигуна виходить з ладу.

У зв'язку з тим, що пробивна напруга у місці дефекту після 1-го пробою досить велика, а перенапруги в витках обмоток досягають значення пробивної напруги не часто, з моменту виникнення явного дефекту в ізоляції до повного пробою часто проходить значний час. Процес розвитку дефектів в поперечній (корпусних та міжфазної) ізоляції протікає аналогічним шляхом. При цьому треба врахувати, що саме поперечна ізоляція перша відчуває зовнішні впливи і піддається значним перенавантаженням.

Метою діагностування є забезпечення найбільш економної експлуатації електрообладнання шляхом скорочення до мінімуму витрат на технічне обслуговування і ремонт. Ця мета досягається визначенням технічного стану електрообладнання що дозволяє своєчасно запобігати відмови, скорочувати простої через несправності, проводити комплекс заходів по підтримці працездатності електроустаткування згідно з даними діагностування, тобто мета досягається за допомогою управління технічним станом електрообладнання в процесі експлуатації [6].

Основне завдання діагностування полягає в отриманні достовірної інформації про технічний стан електрообладнання без розбирання, бажано на робочому місці.

Завдання діагностування в системі експлуатації електрообладнання полягають у встановленні необхідності заміни змінних вузлів і деталей, необхідності ремонтних впливів поточного або капітального ремонтів; оцінки можливих відмов електрообладнання; якості проведення ремонтних робіт.

Електрообладнання в процесі експлуатації може перебувати в безлічі станів. Ці безліч станів можна розділити у відповідності з нормативними документами на дві області: справний і несправний стан.

Для того, щоб встановити в якій області станів справного чи несправного знаходиться дане електрообладнання, при діагностуванні визначають його працездатність. Аналіз справного стану електрообладнання повинен дозволити встановити ступінь працездатності та момент його переходу в область несправних станів, тобто прогнозувати стан електрообладнання. Якщо електрообладнання знаходиться в області несправних станів, то однією з головних задач діагностування є пошук несправності і причин їх виникнення.

Таким чином, діагностика є розвитком профілактичних випробувань. Термін "профілактика ізоляції" означає випробування ізоляційних конструкцій і пристроїв з метою виявлення дефектів в ізоляції та подальшого її відновлення. При розробці методів діагностування електрообладнання основним завданням є визначення оптимального набору параметрів, що характеризують технічний стан контрольованого об'єкту. Параметри, величини яку доцільно вимірювати при діагностуванні електрообладнання, характеризуються номінальними значеннями і полем допусків, залежностями номінальних значень від зовнішнього середовища, наприклад, струмів витоку ізоляції від ступеня її зволоження, закономірностями зміни в залежності від часу експлуатації або напрацювання, необхідною точністю вимірювань та ін.

Параметри, за якими проводиться діагностика, можна умовно класифікувати на їх фізичною основі - електричні величини, опір, ємність, $tg \alpha$, струми витоку і т. п., теплові величини, зміна теплового поля машини і т. д. За способом вимірювання прямі і непрямі методи вимірювання. По інформативності - узагальнені і локальні.

Загальні вимоги, що пред'являються до методів діагностики, наступні: метод повинен забезпечувати достатню інформативність і достовірність результатів; при проведенні вимірювань не вимагати режимів роботи електрообладнання або умов проведення випробувань, які важко здійснити на практиці; реалізація методу і використані кошти повинні бути досить прості і надійні в практичних умовах; бути економічним, тобто забезпечувати зниження витрат і часу на діагностування при інших рівних умовах.

Розглянемо основні параметри ізоляції, які в даний час використовуються в профілактичних випробуваннях, оскільки система діагностики в даний час тільки створюється. Саме тому особливо важливо провести порівняльну оцінку використовуваних методів і параметрів.

В теперішній час особливу увагу почали приділяти контролю обладнання «за станом», а не за системою планово-попереджувальних ремонтів. Це стало можливим завдяки використанню методів та засобів контролю та аналізу поточного технічного стану. Перевага даного підходу полягає в тому, що ремонт виконується тільки для того обладнання, якому він необхідний, оцінка стану виконується в процесі експлуатації, без будь-яких розбирань та ревізій, на базі контролю та аналізу відповідних параметрів. Також цей підхід є джерелом суттєвого підвищення конкурентоспроможності, рентабельності та прибутковості підприємства. Цьому сприяє розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки. Витрати на технічне обслуговування електродвигунів знижуються на 50-75% у порівнянні з обслуговуванням за системою плановопопереджувальних ремонтів [4].

Для впровадження технології обслуговування «за станом» необхідна повна діагностика об'єкту, причому бажано виявляти усі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови, щоб підготуватися до ремонту.

Таким чином, із усього вище переліченого видно актуальність проблеми розробки та вдосконалення методів та засобів діагностування технічного стану електродвигунів на основі контролю параметрів робочих режимів.

Найпоширенішим методом діагностики електродвигунів в наш час є вібродіагностика, заснована на вимірі і аналізі вібрацій корпусу двигуна. Комплекс параметрів вібрації практично повністю характеризує технічний стан працюючого агрегату і дозволяє прогнозувати виникнення несправностей і аварій АД і електромеханічного устаткування. Критерії, за допомогою яких оцінюється ефективність вживання тих або інших методів вібродіагностики, а також опис найбільш поширених груп методів вібродіагностики АД приведені в роботі [9].

Не дивлячись на розвиненість технічних засобів виміру вібрацій і методів їх аналізу, вібродіагностика має ряд недоліків, зумовлених контактним способом кріплення датчиків до об'єкту. Додаткову інформацію про технічний стан об'єкту можна отримати на основі вимірів тимчасових і спектральних характеристик фазних струмів і полів розсіяння, що існують поза корпусом двигуна. Дані методи діагностики є безконтактними, що є безперечною їх перевагою перед вібродіагностикою. Із розвитком обчислювальної техніки з'явилися розробки автоматичних та автоматизованих систем діагностики електродвигунів (наприклад, рис. 1.1). При цьому для їх реалізації в якості діагностичних параметрів пропонуються різні робочі параметри електродвигуна [7].



Рисунок 1.1 – Автоматизована система діагностики двигуна

В роботі [8] окремо виділена діагностика електродвигунів, для яких характерні часті включення і відключення напруги живлення. Наголошується необхідність діагностування таких двигунів в перехідних режимах роботи. У роботі розглянутий автоматизований вимірювальний комплекс, за допомогою якого виконувалися виміри діагностичних параметрів об'єкту дослідження. До складу комплексу входять: персональний комп'ютер, спеціалізована плата збору даних, що розміщується в роз'ємі системної магістралі комп'ютера, датчики індуктивного типу для виміру фазних струмів і полів розсіяння електродвигуна, програмне забезпечення.

В роботі [11] розглянуто метод діагностики асинхронних двигунів середньої потужності за результатами прийомо-здавальних випробувань. Розроблена і реалізована на ЕОМ математична модель розрахунку конкретних значень показників якості асинхронних двигунів за результатами прийомо-здавальних випробувань, використання якої можливо в технологічному процесі виготовлення асинхронних двигунів. Також в даній роботі розроблена математична модель пошуку причин виходу показників якості за допустимі

межі і програма для аналізу даних причин для ЕОМ, створено алгоритм діагностики впливу вхідних параметрів на якість технічних характеристик.

Робота [12] присвячена діагностуванню ексцентрисистету ротора асинхронних двигунів по гармонійному складу струму статора. У ній на підставі результатів математичного моделювання і фізичного експерименту вперше гармонійних взаємозв'язок амплітуд встановлено складових спектру споживаного струму для деяких типів АД з величиною ексцентриситету, що дозволяє оцінювати граничні параметри ексцентриситету ротора в працюючому електродвигуні. Також в роботі запропонована вдосконалена математична модель асинхронного електродвигуна з ексцентриситетом ротора на основі аналітичного виразу величини взаємної індуктивності, що характеризує вплив ексцентриситету ротора на гармонійний склад струму статора, що відрізняється від відомих тим, що дозволяє за допомогою стандартних програм, що використовуються для моделювання роботи асинхронних електродвигунів, для різних типів АД з погрішністю не більше 10% розраховувати порядок і значення вищих гармонік струму статора, що створюються ексцентриситетом. За результатами отриманих в роботі даних зроблено висновок, що при діагностуванні ексцентриситету ротора АД переносними пристроями доцільно використовувати спектральний аналіз струму лише однієї фази, тоді як при діагностуванні потужних і відповідальних АД, в ланцюзі живлення яких встановлені датчики струму в трьох фазах живлення, доцільно використовувати аналіз спектрального складу узагальненого вектора струму статора з метою розпізнавання не лише ексцентриситету ротора, але і інших пошкоджень асинхронного двигуна. Слід зазначити запропонований в даній роботі спосіб автоматичного контролю ексцентриситету ротора АД, що відрізняється від тих, що існують, тим, що порівняння гармонік струму статора, отриманих в результаті спектрального аналізу отримують із заданими значеннями гармонік струму на характерних частотах. Запропонований спосіб дозволяє підвищити надійність і селективність розпізнавання ексцентрісистета на ранній стадії його розвитку. Мікропроцесорний пристрій контролю ексцентриситету ротора, розроблений за результатами роботи, дозволяє виявляти недопустимий рівень ексцентриситету ротора в АД, що перевищує 30% номінального значення повітряного зазору.

Аналітичний спосіб розрахунку струмів і моментів при дефекті одного стрижня короткозамкнутої клітки ротора приведений в роботі [13]. У цьому способі векторів, зображуюють, введена у використано поняття ЩО функціональні зв'язки характеристика намагнічування магнітного ланцюга машини і врахований електромагнітний зв'язок МДС різних послідовностей ротора з обмоткою статора. Також в цій роботі розвинено метод симетричних складових стосовно електричних машин. Показано, що кожна послідовність струмів ротора створює МДС, число періодів і напрям обертання якої залежить від порядку послідовності. Виконані дослідження АД з симетричною і несиметричною клітками ротора в тривалому режимі під навантаженням. При незмінній потужності на валу визначені перевищення температури обмотки статора і показано, що через обрив одного стрижня клітки ротора перевищення температури обмотки статора і ротора може збільшуватися на декілька градусів.

пропонується роботоспроможність B [6] роботі асинхронних електродвигунів визначати за їхнім функціональним станом. Цей стан представлений трьома варіантами – двома функціональними (номінальним та неномінальним) та одним нефункціональним – і охарактеризований за допомоги таких показників, як корисна потужність на валу електродвигуна та швидкість витрати ресурсу обмотки статора. Визначено, що змінення швидкості витрати ресурсу за умов незмінної потужності на валу електродвигуна його Встановлений зумовлено виникненням пошкоджень В вузлах. взаємозв'язок між зміненнями втрат активної потужності ті зміненням

функціонального стану АД, на основі якого розроблений новий метод діагностування, який дає можливість контролювати роботоспроможність двигуна в процесі виробничої експлуатації та знаходити пошкоджені вузли.

В роботі [4] розроблено метод діагностування обмоток статора і ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за даними контролю миттєвих значень фазних струмів та напруг в робочих режимах, який відрізняється від відомих методів тим, що для оцінки технічного стану електродвигуна використовується комплексний критерій справності, що оснований на використанні симетричних складових струму статора та кута нахилу механічної характеристики АД в області робочих ковзань. З ціллю врахування впливу несиметрії напруги живлення на результати діагностики, метод, оснований на порівнянні величин розроблено фазних опорів електродвигуна, які розраховуються за даними контролю миттєвих значень фазних струмів та напруг. Запропоновані узагальнені залежності комплексного критерію справності для АД з КЗР різних типів при різних видах дефектів обмоток статора і ротора, які використовуються для визначення граничних значень цього критерію.

В роботі [7] розроблені засоби та пристрої, що не тільки визначають факт замикання витків в робочому режимі АД, але й дозволяють виявляти без розбирання двигуна пошкоджену секцію обмотки статора, виявляти ексцентриситет ротора на працюючому двигуні. Крім того, захист АД був доповнений блоками, що дозволяють виявляти пуск, що затягнувся, опрокидування, заклинювання ротору.

Опис багатофункціонального пристрою захисту та експлуатаційної діагностики асинхронних та синхронних електродвигунів наведений в роботі [8].Набір функцій захисно-діагностичного пристрою залежить від ступеню відповідальності агрегату із електродвигуном в технологічному процесі, виду електродвигуна, конструкції обмоток статора і ротора, номінальної швидкості та напруги. Так, пристрій для відповідального одношвидкісного АД напругою вище 1 кВ потужністю до 2000 кВт повинний реагувати на короткі замикання обмотки статора, включаючи замикання витків однієй фази, замикання на землю обмотки статора, симетричні та несиметричні перевантаження, зниження опору ізоляції обмотки статора, обрив стрижнів ротора, пуски, що не відбулися або затягнулися, заклинювання ротора працюючого АД, старіння ізоляції; знаходити пошкодження підшипників, ексцентриситет ротора, перекіс вісей ротора АД і механізма, обрив зв'язку між АД та механізмом. Незважаючи на очевидні достоїнства описного пристрою, недоліком слід признати те, що для його реалізації потрібно внести зміни у конструкцію електродвигуна.

1.2. Основні типи дефектів

Для того, щоб показати серйозність проблеми надійності витковой ізоляції двигунів малої потужності із всипною обмоткою, звернемося до статистики відмов електричних машин описаної в роботах [3, 4, 7].

Отже, розподіл відмов електродвигунів залежить від виду машин і умов експлуатації, від конструкції електродвигунів і технології їх виготовлення і змінюється в широких межах. Так, відмови 10 вибірок електродвигунів серії A, A2, AT, AO2, AOЛ, AOЛ2, 4A, 4AI і їх модифікацій об'ємом від 20 до 3435 зразків (всього 5524 двигуна) розподілені так: обмотка статора від 71 до 100%; підшипниковий вузол від 0 до 16,3; вал від 0 до 12,2; вентилятор від 0 до 12,5; ротор від 0 до 1,2%.

Підвищена пошкоджуваність обмотки статора відзначається також в промисловості Японії, Англії, ПНР, В'єтнаму та інших країнах. За результатами досліджень ВНДІВЕ і ВостНІІ і за даними робіт, особливо велика частка відмов обмотки статора електродвигунів, що працюють в підземних умовах.

Поліпшення умов експлуатації та технічного обслуговування електродвигунів веде до зменшення частки відмов обмотки статора і збільшення частки відмов підшипників. Так у двигунів потужністю до 100кВт при експлуатації у хімічній промисловості в порівнянні з вугільною частка відмов обмотки статора зменшилася з 91 до 49,2%, а частка відмов підшипників збільшилася з 4,7 до 35%.

З таблиці 1.1 видно, що найбільш схильна до відмов ізоляція обмотки статора. Її надійність фактично і визначає надійність всієї електричної машини, за винятком випадків відмови підшипникових вузлів при роботі в певних важких умовах. Тому, слід розглянути більш детально місця пробоїв і причини їх виникнення[15].

	Обсяг	Розподіл відмов, %						
Умови роботи ЕД	виотрок	Обмотки статора	Підшипникового вузла	Вузлів захисту і щитів	Ротора	Коробки виводів	Системи охолодження	Валу
Вугільна промисловість	531	91	4,7	0	0,8	3,5	0	0
Хімічна промисловість	807	49,2	35,0	5,8	2,5	2,5	5,0	0

Таблиця 1.1 - Статистика відмов асинхронних двигунів

В процесі експлуатації в ізоляції відбуваються зміни хімічного і фізичного характеру, в результаті чого параметри ізоляції всієї електричної машини або окремих її частин змінюються. Ізоляція обмоток статора піддається періодичному нагріву і охолодження, тривалому зволоженню і тепловому старіння, термомеханічним і електродинамічним зусиллям, що призводить до її зносу, погіршення і руйнування. Якщо пошкодження поширюється практично на всю ізоляцію або на її складову частину то такий дефект називається розподіленим. Якщо зміна властивостей відбулась в певному місці ізоляції, то виникають місцеві (локальні) дефекти. Найбільш загрозливими формами місцевих дефектів в ізоляції є розриви, тріщини, отвори або канали [19]. Відмови ізоляції детально розглянуті в роботі [3], і детально розписані в таблиці 1.2. З якої видно, що найбільш частими причинами відмов є міжвиткові замикання, викликані перегрівами і попаданням вологи в міжвитковий простір всипних обмоток, що призводить до зниження опору ізоляції обмотки.

Параметри, що визначають технічний стан ізоляції електричних машин, зазвичай залежать від багатьох факторів, тому для отримання порівнянних результатів параметри необхідно вимірювати в однакових умовах. Якщо цього досягти неможливо, то отримані значення параметрів перераховують для порівняння, наприклад опір ізоляції, порівнюють з певною температурою[16].

	По двигунам			По обмоткам				
Вид відмови	Bcboro	За всіма відмовами двигунів	По всім двигунам які вимагають кап. Ремонту	По двигунам, які вийшли в капремонт через первинні відмови	По всім обмоткам, що дали збій	По всім обмоткам, які потребують кап. ремонту	По вийшовшим в кап. Ремонт по причині не первиних вілмов	По вийшовшим в кап. Ремонт по причині первинних відмов
Виткове замикання	15	16,9	20,2	68,8	17,4	20,3	48,1	79,8
Міжфазне замикання	2,6	2,9	3,5	11,9	3	3,5	8,3	13,8
Корпусне замикання	1	1,1	1,4	4,6	1,2	1,4	3,2	5,3
Зниження опору ізоляції	12,4	14	-	-	14,3	-	39,8	-
Обрив ланцюга в фазі	0,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,3	0,6	1,1
Замикання витковой ізоляції через заклинювання ротора	1,4	1,6	1,9	6,4	1,6	1,9	-	-

Таблиця 1.2 - Відмови ізоляції обмотки статора асинхронних двигунів

Те ж через роботу на	9,6	10,8	12,9	_	11,1	12,9	_	-
2-х фазах								
Те ж через перегрів	42,8	48,2	57,6	-	49,6	57,8	-	-
частими пусками								
(реверсами)								
Те ж через поломки	1,4	1,6	1,9	6,4	1,6	1,9	-	-
вентилятора								
Заклинювання	0,8	0,9	-	-	-	-	-	-
підшипникових								
вузлів								
Поломка	1,4	1,6	-	-	-	-	-	-
вентилятора								
Поломка вала	0,2	0,2	0,3	0,9	-	-	-	-
Бездефектні	11,2	_	_	-	-	-	-	-

При нагріванні ізоляційних конструкцій їх питомий об'ємний опір зменшується, що пояснюється тепловою дисоціацією молекул, а при неповній полімеризації лаків які просочують обмотку і наявності в ізоляції рідкої фази - зменшенням в'язкості, т. я. цей процес залежить від характеру електропровідності ізоляційної конструкції. ізоляції обмотки статора електродвигунів 4A, 4AI Зниження опору 3 кремнійорганічною ізоляцією в процесі їх неприривного нагріву реверсами до температури 250 ° С. У експлуатації при опорі ізоляції статора 500 кОм тільки внаслідок нагріву ізоляції можливо зниження опору до критичної позначки 10÷30 кОм і спрацьовування реле витоку.

1.3. Зволоження ізоляції

Зволоження ізоляції відбувається в неробочі зміни і дні, коли температура електродвигунів знижується до температури навколишнього повітря. Ізоляція протягом тривалого часу піддається впливу атмосфери з відносною вологістю, яка може досягати 95÷99%. Крім того, при роботі деяких типів електродвигунів всередині їх оболонок утворюється конденсат, а в окремі вироби потрапляє вода ззовні.

Вологостійкість ізоляційних конструкцій залежить від структури і характеристик застосовуваних ізоляційних матеріалов, що обумовлюють перевагу поверхневого або об'ємного зволоження. Вода, що має високу діалектричну проникність, сприяє дисоціації молекул ізоляції або домішок, що містяться у воді. Збільшення кількості носіїв струму призводить до підвищення електропровідності ізоляції. При цьому, чим вище діелектрична проникність ізоляційного матеріалу, тим сильніше він підвищує дисоціюючу здатність полярних розчинників.

Дефектація електродвигунів на заводі "Трактородеталь" ім. Лепсе м. Київ показала, що поверхня ізоляції ряду виробів забруднена маслом або дрібні частинки, наявність яких призводить до виникнення фізико-хімічних процесів, що прискорюють руйнування ізоляції і зниження її опору. Швидкість зниження опору ізоляції при експлуатації залежить від технології і якості виготовлення обмоток. Вплив води на ізоляцію, має дефекти виготовлення типу мікротріщин, значно прискорює зниження опору ізоляції і в кінцевому підсумку призводить до її пробою[17].

Процес зволоження ізоляції триває кілька десятків, а іноді й сотень годин і припиняється після повного її насичення вологою. Опір ізоляції при цьому знижується в $10^2 \div 10^6$ разів, а середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації значно зростають. Оскільки діелектрична проникність води в порівнянні з ізоляцією висока, на кордонах між ізоляцією з різним ступенем зволоженості і, отже, з різною діелектричною проникністю зростає напруженість електричного поля і знижується пробивна напруга ізоляції. При тривалому впливі вологи багато ізоляційних матеріалів розбухають, при цьому в деяких з них розбухання відбувається нерівномірно, що викликає додаткові механічні напруги в ізоляції.

У момент включення електродвигунів в ізоляції обмоток відбуваються нестаціонарні процеси перезарядження діелектрика, при цьому опір ізоляції знижується в *1,1÷2* раз, і потім протягом 1÷5 хвилини опір підвищується до початкового рівня. При більш сильному зволоженні ізоляції опір короткочасно

знижується в 5÷10 раз. Подібні випадки неодноразово відзначалися в експлуатації, наприклад, викликали спрацьовування захисту від витоків при включенні двигунів.

При нагріванні зволоженою ізоляції після включення в роботу електродвигуна відбуваються одночасно два процеси зміни питомого опору; збільшення його при сушінні і видаленні вологи і зменшення внаслідок нагріву ізоляції.

Зміна опору в часі залежить від переважання того або іншого процесу.

При багаторазових зволоження і сушках ізоляції кінцеве значення її опору після кожного циклу «зволоження - сушка» знижується в порівнянні з опором нової ізоляції, що свідчить про руйнування структури ізоляції під впливом дії в ній при цьому гідролітичних, термомеханічних і дифузійних процесів [18]. Якщо опір нових ізоляційних конструкцій після насичення зменшується повільно, то крива зміни опору старих зразків після плавного зміни знижується на 2÷3 порядка, що говорить про структурні зміни в ізоляції.

Фізичні закономірності теплового старіння ізоляційних матеріалів за результатами численних досліджень різних авторів підкоряються відомим законом Гоффа - Арреніуса, згідно з яким логарифм середнього ресурсу ізоляційної конструкції лінійно залежить від величини, зворотної її абсолютній температурі:

$$\lg T_k = A + \frac{B}{273 + \theta}$$

 T_k — середній ресурс, ч; A — показник ефективності взаємодії молекул; B — відношення енергії активації речовини до універсальної газової постійної; θ — температура. Зокрема для електродвигунів ВАО 4-го габариту за результатами проведених досліджень коефіцієнт A = -6,125, B = 4400.

Фізичні процеси, що проходять при тепловому старінні ізоляції були вивчені на статорних обмотках двигунів ВАО 4-го габариту, обмотка яких виготовлена з емальованих проводів ПЕТВ, пазова ізоляція - з міканіту ГФСО і склолакотканини ЛСЕ, межфазная ізоляція - з склолакотканини ЛСЕ обмотки просочені лаком МЛ-92.

Двигуни були піддані прискореним випробуванням на надійність. Після кожного циклу випробувань від обмотки відрізалися зразки ізоляційних матеріалів, які піддавалися дослідженню за допомогою оптичного мікроскопа МБІ-6 при збільшенні в 270 разів[19].

При тривалому впливі високої температури з ізоляції виділяються летючі низькомолекулярні речовини, знижується її пластичність, зменшується маса, зростає крихкість, зменшуються механічна і електрична міцність. В ізоляції з'являються наскрізні канали, в які проникають водяні пари, що викликають гідролітичні процеси. плівки У початковому стані поверхня лакової склолакотканини пориста, відзначаються сліди стікання лаку і барабана просочувально-сушильної установки. Після 17ч теплового впливу лак розм'якшується і розплавляється, помітні скупчення газів і ділянки газовиділення. Через три цикли випробувань помітно посилюється газовиділення, що характеризується появою пухирців і великим спучуванням лакової плівки. Після п'яти циклів утворюються раковини як результат рясного газовиділення і руйнування пухирців і спучування лакової плівки; через сім циклів відбувається інтенсивне утворення тріщин і наскрізних каналів; через дев'ять циклів лакова плівка практично зруйнована. Після дванадцяти циклів видно лише оголилася склотканина із залишками лаку, а в міканіті відзначені зрушення слюди.

В процесі експлуатації ізоляція обмотки статора піддається впливу електродинамічних і термомеханічних зусиль, які особливо помітно впливають на надійність ізоляції обмоток в областях переходу котушок від пазової до лобової частин, тобто поблизу країв пакету статора.

Дослідження пробивної напруги корпусної ізоляції двигунів показало, що у нових обмоток майже всі пробої відбуваються в куточках секцій, в їх голівках або сполучних перемичках, т. я. Гільзова ізоляція пазової частини більш міцна, ніж безперервна (стрічкова) ізоляція лобових частин. електродинамічні зусилля, що впливають на секції, пропорційні квадрату струму і при пуску двигуна або режимі КЗ збільшуються в 35÷50 раз в порівнянні з номінальним режимом. З частотою 100 Гц вони викликають переміщення секції в пазу в радіальному напрямку. Особливо значні

електродинамічні зусилля при реверсах асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, коли з ймовірністю 15÷20% протягом 0,02÷0,05 с. діє ударний динамічний момент, що перевищує номінальний в 15÷20раз[20].

Термомеханічне тертя виникає через різницю в коефіцієнтах лінійного розширення міді секцій, і сталі сердечника статора. При роботі двигуна в режимі частих пусків або КЗ, мідь секцій розширюється сильніше сталі сердечника, як через свою більш високу температуру, так і через те, що зазначений коефіцієнт у міді в 1,4 рази більше, ніж у сталі. Це викликає переміщення секцій в пазу в аксіальному напрямку.

Хоча температура лобових частин обмотки статора двигунів вище, ніж пазових, через вібрацій деформацій і термомеханічного старіння пазовая частина секцій зношується набагато швидше і частка пробоїв в пазової частини поступово зростає. Нарешті, у обмоток, які перебували в експлуатації дуже тривалий час, все пробої секцій відбуваються тільки в пазу.

При перекиданні електродвигуна і переході його в режим КЗ при повній напрузі мережі температура обмотки різко зростає до кількох сотень градусів, і її ізоляція піддається тепловому удару. Стійкість до цього впливу не залежить від ізоляції і є її самостійною характеристикою. Високою стійкістю до теплового удару володіють дроти з поліамідної емалевої ізоляцією. Скручування з таких проводів зберігають свою працездатність до пробою ізоляції довше, ніж з проводів з поліефірної і деякими іншими видами ізоляції. Це властивість поліамідних емальованих проводів сприяє кращому «виживанню» статорних обмоток в аварійному режимі.

Аналогічно відмов АТ, можна сказати, що надійність ізоляції обмотки визначає надійність будь-якої машини в цілому. Так як надійність колекторних машин ми не розглядаємо в даній роботі, в яких значна частка відмов припадає саме на щітково-колекторний вузол, і нас, перш за все, цікавлять малопотужні машини із всипною обмоткою і великим числом витків фазі, то можна стверджувати, що саме міжвиткова ізоляція найбільшою мірою визначає надійність машини. Під це твердження потрапляють практично всі машини, які мають статорну обмотку з круглого

емальованого дроту і, як правило, мають велике число витків обмотки. Це асинхронні і синхронні двигуни малої і середньої потужності, а також генератори цих типів, різні виконавчі асинхронні двигуни, однофазні двигуни та інші мікромашини в переважній їх більшості.

Низьку надійність ізоляції малопотужних машин можна розглядати також з позицій недосконалості методів контролю ізоляції. Так як, вважається, що доцільніше замінювати відмовили машини новими. Тому, інтенсивність розробки нових методів контролю ізоляції невисока. У той же час в сучасному виробничому обладнанні, коли вихід з ладу одного елемента призводить до зупинки цілої виробничої лінії, необхідна систематична оцінка стану і бажано робочого ресурсу кожного елемента.

Крім існування проблеми діагностування витковой ізоляції під час експлуатації таких машин, існує також проблема виявлення дефектів безпосередньо під час роботи в відповідальних механізмах. А також, виявлення дефектів на ранніх стадіях виробництва або при заміні обмотки під час ремонту електромашин. Що дуже важливо, тому що значна частина дефектів з'являється вже під час обмотки машини, через значне числа операцій з тонким емальованим дротом в процесі яких часто відбуваються надломи їх лакової ізоляції. Тому своєчасне їх виявлення дозволяє значною мірою знизити кількість відбраковуються двигунів при випробуваннях вже готових машин[21].

1.4. Цикли тепловологого старіння на прикладі асинхронного двигуна 4А80А4УЗ

Робота електричної машини зі зволоженою зістареною ізоляцією призводить до її швидкого руйнування і є небезпечною через більшу вірогідність аварійної відмови, тому проблема оцінки стану зволоження зістареної ізоляції є актуальною та потребує створення нових способів визначення ступеню можливості її подальшої експлуатації. Значний вплив на стан ізоляційної конструкції має зволоження ізоляції при змінах кліматичних умов. Для нової ізоляції ця проблема стоїть не так гостро, порівняно зі зволоженням зістареної ізоляції. Розвиток дефекту ізоляції відбувається під впливом зволоження, термічних руйнувань, механічних пошкоджень, електричного поля робочої напруги і перенапруги, забруднень і т. п.

Попадання вологи зазвичай пов'язано зі зміною температурних умов. Процес утворення дефекту і руйнування ізоляції протікає спочатку досить повільно і лише на останніх стадіях має стрибкоподібний характер, закінчуючись коротким замиканням, вибухом і руйнуванням ізолятора. Іноді волога встигає випаруватися під дією тепла, що виділяється. Якщо при цьому не утворилося провідного каналу, процес розвитку дефекту може призупинитися, але якщо утворився провідний канал ізоляції буде завдано необерненої шкоди.

Методи діагностики електричних машин широко досліджувались раніше [18-21]. Найбільш розповсюдженими є методи неруйнівного контролю технічного стану ізоляції. Запропоновані методи діагностики не дають змоги неруйнуючого контролю ізоляції і часто вимагають занадто багато вимірювань або розбирання електричної машини. Метод аналізу запропонований в даній статті спирається на аналіз частотних характеристик електричних машин. При знятті частотних характеристик на клеми двигуна подається низька напруга 5-10 В, яка є безпечною для ізоляції.

Аналіз частотних характеристик електричних машин в залежності від зміни стану ізоляції[22].

Попередні випробування, необхідні для визначення режимів пришвидшених випробувань, проводять з ціллю отримання залежності контрольованих параметрів з часом при заданому рівні кліматичних факторів[22].

Для забезпечення пришвидшеного впливу на ізоляцію були прийняті наступні умови тепловологого впливу – 100% вологість при температурі 100⁰ С (в середовищі насиченої пари протягом 8 годин с наступним охолодженням до 20⁰ і вільною конденсацією вологи на поверхні відкритої машини протягом 16 годин).

Як показали досліди вибраний термін випробування приводить конструкцію в граничний стан. Подальше збільшення часу тепловологого впливу не позначається параметрах системи, т. я. вона приходить в граничний стан.

В подальшому машина переводиться в режим сушіння (інтенсивної теплової взаємодії і старіння). Для ізоляції класу F вибраний режим сушки при температурі 165⁰ протягом 2 годин. Нагрів обмотки проводився постійним випрямленим струмом.

Частотні характеристики знімались для різних схем підключення двигуна, перша – холостий хід – рис. 1.2(а), друга – коротке замикання – рис. 1.2(б).

Зняті частотні характеристики двигуна 4А80А4 після одного циклу зволоження, після восьми циклів і початкова характеристика рис. 1.3 і рис. 1.4..



Рисунок 1.2 – а) Схема підключення на XX, б) Схема підключення на КЗ



Рисунок 1.3 – Частотні характеристики двигуна зняті по схемі XX.

Як видно з наведеного графіку характеристика Z(f) для сухої нової ізоляції(крива 1) має високе значення опору при резонансному екстремумі, а також високу частоту резонансного піку. Це свідчить про те, що опір ізоляції обмотки відносно корпусу високий, що відповідає якісній ізоляції. Висока частота резонансного піку свідчить про те що ємність ізоляції (в першу чергу поперечна) відносно мала, що відповідає відсутності вологості в ізоляційній конструкції[23].

Проаналізувавши графік знятий після першого циклу зволоження, зроблено наступні висновки — значення опору при резонансному екстремумі значно зменшилось, що свідчить про зменшення опору ізоляції, а значення частоти резонансного піку свідчить про збільшення ємності ізоляції.

Третій графік знятий після 8 циклів зволоження, дає схожі результати, частота і опір резонансного піку зменшується, але вже не так суттєво.



Рисунок 1.4 – Частотні характеристики двигуна зняті по схемі КЗ.

З графіку знятого по схемі КЗ Z(f) для сухої нової ізоляції видно, що частота та опір резонансного піку високі, що свідчить про високе значення опору ізоляції та відносно невелике значення ємності обмотки електричної машини.

Визначення додаткової ємності обумовленої зволоженням ізоляції при тепловологому старінні виконується за допомогою схеми заміщення показаній на

рисунку 1.5, де R – опір обмотки, L – індуктивність обмотки, C_{no3} - поздовжня ємність обмотки, C_{n} - поперечна ємність обмотки.



Рисунок 1.5 – Схема заміщення для визначення додаткової ємності

З досліду XX на частоті 1-10 кГц двигун представляє собою ємність $2C_{поз}$. По даним вимірів при $f = 2,5 \cdot 10^4$ Гц $Z_{XX} = 7000$ Ом. Звідси $2C_{поз} = \frac{1}{wZ_{XX}} = 0,91$ нФ або $C_{поз} = 0,455$ нФ.

З досліду КЗ в точці резонансу $f_0 = 55$ кГц величина

$$Z_{\text{K3}}_{f_o} \approx R. \ Z_{\text{K3}}_{f_o} = 20000 \text{ Ом звідси } R = 20000 \text{ Ом}.$$

За допомогою високоточного вимірювального обладнання вимірюємо L = 9 мГн, $C_{\Pi} = 1.2$ нФ.

Для того, щоб визначити додаткову ємність утворену після першого та восьмого циклів старіння ізоляції використовуємо рівняння

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L(0,5C_{\Pi 03} + C_{\Pi} + C_{\Lambda})}}$$

Після першого циклу зволоження резонансна частота f_0 зменшилась з 60 кГц до 28 кГц, це є ознакою того, що ємність ізоляції збільшилась, використовуючи формулу зазначену вище розраховано додаткову ємність після першого і восьмого циклу зволоження.

$$2 \cdot \pi \cdot 28 \cdot 10^{3} = \frac{1}{\sqrt{9 * 10^{-3} (0.5 \cdot 0.455 \cdot 10^{-9} + 1.2 \cdot 10^{-9} + C_{\rm g})}}$$

Звідки *С*_{д1} = 2,2 нФ

$$2 \cdot \pi \cdot 25,5 \cdot 10^{3} = \frac{1}{\sqrt{9 * 10^{-3} (0,5 \cdot 0,455 \cdot 10^{-9} + 1.2 \cdot 10^{-9} + C_{\mu})}}$$

Звідки *С*_{д8} = 2,9 нФ

Дані розрахунки співпадають з попередніми висновками – після проходження циклу тепловологого старіння ємність ізоляції двигуна збільшується.

Для збільшення інформативності частотних характеристики за основний показник взято площу під кривою між двома екстремумами графіку Z(f).

Для графіку знятого по схемі XX отримані результати показані в таблиці 1.3.

·		·		
Стан	Нова	I цикл	VIII цикл	
	TIODu	зволоження	зволоження	
Площа S	235500000	157950000	77552500	
ΔS, %	-	32,9	67.1	

Таблиця 1.3 – Показники зволоження ізоляції

Для графіку отриманого по схемі КЗ отримані результати показані в таблиці 1.4. Таблиця 1.4 – Показники зволоження ізоляції

Стан	Нова	I цикл	VIII цикл	
	110.54	зволоження	зволоження	
$\Delta S, \%$	0	77,2	89,1	

Проаналізувавши дані з таблиць 1 і 2, можна зробити висновок, що розмір площі під кривою між екстремумами графіку є показником якості ізоляційної конструкції. Дані розраховані з характеристики знятої за схемою холостого ходу є чітким показником, оскільки показник ΔS зменшується плавно – на 32,9% після першого циклу зволоження, на 67,1% після восьмого циклу, в той час як характеристика знята за схемою короткого замикання більш чутлива до стану ізоляції, показник ΔS
зменшився на 77,2% після першого циклу зволоження, на 89,1% після восьмого циклу.

Для того, щоб мати можливість оцінити стан ізоляції після одноразового зняття характеристик, запропоновано використовувати коефіцієнт якості $k_{\rm s}$, який враховує значення частоти мінімального та максимального екстремумів характеристик холостого ходу та короткого замикання, а також значення вхідних опорів мінімального та максимального екстремумів обох характеристик.

$$k_{\mathfrak{R}} = \frac{q_{\kappa_{3.1}} \cdot Z_{\kappa_{3.1}} + q_{\kappa_{3.2}} \cdot Z_{\kappa_{3.2}}}{q_{\mathrm{xx.1}} \cdot Z_{\mathrm{xx.1}} + q_{\mathrm{xx.2}} \cdot Z_{\mathrm{xx.2}}}$$

Де $q_{\text{кз.1}}$, $q_{\text{кз.2}}$, $q_{\text{хх.1}}$, $q_{\text{хх.2}}$ – частота першого і другого резонансного піку на характеристиці знятій за схемою короткого замикання і холостого ходу.

 $Z_{\kappa 3.1}$ і $Z_{\kappa 3.2}, Z_{xx.1}, Z_{xx.2}$ – відповідно вхідні опори при резонансних частотах.

Значення коефіцієнта якості для різних циклів зволоження показані в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Показники коефіцієнту якості для різного стану ізоляційної конструкції

Стан	Нова	I цикл	VIII цикл	
Clan	noba	зволоження	зволоження	
k _я	0.81	0.76	0.7	

Показано, що частотні характеристики можуть бути узагальненим параметром стану ізоляції в умовах періодичного відстеження якості ізоляції при регламентних ревізіях.

На прикладі двигуна 4А80А4 показано, що для першого циклу теплоговологого старіння отримані наступні результати – резонансна частота, яка відповідає верхньому екстремуму змістилась в область більш низьких частот, що відповідає збільшенню ємності обмотки. Максимальне значення опору Z(f) зменшилось в порівнянні з новою ізоляційною конструкцією, що відповідає зменшенню опору ізоляції відносно корпусу. Найбільш суттєві зміни відбулися після першого циклу зволоження ізоляції, а наступні цикли вже не так суттєво впливають на зміщення частоти екстремумів та зменшення вхідного опору обмоток двигуна[24]. Оцінка ступеню деструкції ізоляції слід проводити контролюючи параметри частоти резонансного піку, пікового значення опору Z(f) та визначенню площі між верхнім та нижнім екстремумом графіку Z(f).

Висновки до розділу 1

1. В умовах зміни клімату, наприклад для двигунів, що використовуються в умовах сільського господарства основними факторами, які впливають на старіння ізоляції при зберіганні і експлуатації являються нагрів і зволоження.

2. При їх сумісній дії швидко розвиваються приховані дефекти ізоляції, що виникли ще в процесі виготовлення матеріалів і конструкції, або в процесі експлуатації.

3. В роботі статор розміщувався в камеру на 72 години(3*8годин при температурі 100°С і вологості 100% і 3*16 годин при вологості 100% і охолодженні від 100°С до 35°С) з подальшою сушкою протягом 12 годин при температурі обмотки 165°. Слідом цикл повторювався.

4. Вимір параметрів після кожного циклу при вологому і сухому стані ізоляційної конструкції дозволяє прости порівняльну оцінку інформативності кожного параметру при різних станах ізоляції.

II. ВИСОКОЧАСТОТНІ ПРОЦЕСИ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

2.1 Математична модель обмотки

Дослідження роботи електричної машини і огляд комутаційних, хвильових і імпульсних процесів потребує математичного опису обмотки. В цілому реальна обмотка представляє складну систему. Очевидна неоднорідність системи, так як витки навіть однієї котушки мають різні параметри в залежності від положення в пазу, не кажучи про те що в межах одного витка питомі параметри активної і лобової частини відрізняються. Очевидним являється перехід від однієї котушки до іншої, тобто система являється дискретною і однорідною. Тому широко використовувана уявлення обмотки у вигляді довгої однорідної лінії з розподіленими параметрами звичайно буде давати значні похибки при огляді процесів в середині обмотки. Для оцінки вхідних і хвильових опорів подібна модель з усередненими параметрами може застосовуватись. Однак для розрахунку режимів використання цієї моделі ускладнює розрахунки не наближуючись до фізичної сутності[1].

Для оцінки можливого спрощення математичного опису вхідних опорів проведемо порівняння результатів отриманих на моделях різної складності і дослідних результатів.

2.2 Порівняння частотних залежностей різних моделей обмотки

Обмотки електричних машин представляють системи елементів з частотнозалежними параметрами. При достатньо високих частотах магнітні потоки обмоток виражаються в потоки розсіювання, замикаючі в основному по немагнітним шляхам. Тому параметри обмоток на високих частотах практично не залежать від напруги. Розглядаючи дослідні частотні залежності Zвх (ω), зняті для малих двигунів і аналогічні характеристики для крупних машин, можна зробити висновок про повне якісне схожість, але є великі розбіжності в конструкції і розмірах обмоток.

В цих залежностях характерним представляється величина і відношення резонансних частот в режимах х.х та к.з. Розглянемо ці відношення в різних моделях.

При представленні обмотки довгою однорідною лінією вхідний опір визначається рівнянням (1)

$$Z_{\rm BX} = \frac{Z_2 Ch Y l + Z_{\rm B} Sh Y l}{Z_2 Sh Y l + Z_{\rm B} Ch Y l} \tag{1}$$

Для граничних режимів – холостого ходу ($Z_2 = \infty$) і короткого замикання ($Z_2 = 0$) вхідні опори дорівнюють [2]

$$Z_0 = Z_{\rm B} \frac{ch\gamma l}{sh\gamma l}$$
 ta $Z_{\rm K} = Z_{\rm B} \frac{sh\gamma l}{ch\gamma l}$ (2)

Для перших резонансних частот, нехтуючи втратами в системі використовують формулу [3]

$$Yl = \sqrt{Z'Y'} \cong j\omega I \sqrt{L'C'} = j\omega \sqrt{LC}$$
(3)

де Z' і Y' - питомі опори і провідність[4].

Відповідно $Z_0 = -jZlctg(\omega\sqrt{LC})$ і $Z_k = jZ_B tg(\omega\sqrt{LC})$ (4)

Перші резонансні частоти питомих вхідних опорів лінійної моделі відносяться як 1:2.

Частоти перших гармонік /k=0/ по умовам резонансу напруг відповідно дорівнюють (5)

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}} \qquad i \quad \omega_k = \frac{\pi}{\sqrt{LC}} \tag{5}$$

Для цепної моделі вільні перехідні функції на вході ланцюга із m п- образних чотириполюсників(6),(7).

$$A_{0}(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^{m} \frac{\cos^{2}\frac{a_{k}}{2}}{\sin\frac{a_{k}}{2}} \sin \omega_{k} t \qquad (6)$$

$$\text{de } a_{k} = \frac{2K - 1\pi}{2m}, \qquad \omega_{k} = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin\frac{a_{k}}{2}$$

$$A_{k}(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^{m} \frac{\cos^{2}\frac{a_{k}}{2}}{\sin\frac{a_{k}}{2}} \sin \omega_{k} t \qquad (7)$$

$$\text{de } a_{k} = \frac{K\pi}{2m}, \qquad \omega_{k} = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin\frac{a_{k}}{2}$$

При k=1 і $m \to 0$ коефіцієнти $a_k \to 0$, але індуктивності $L' = \frac{L}{m}$ і ємності C' = $\frac{C}{m}$ кожного чотирьохполюсника також прагнуть до 0 і відповідно

 $\omega_{1x} = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$ і $\omega_x = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$, тобто отримані вирази аналогічні лінійної моделі. При скороченні кількості ланок відповідні частоти будуть змінюватися[2].

При обмеженій кількості ланок кола (m=1; m=2 і m=3) частоти відповідно будуть дорівнювати:

m=1
$$\omega = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}};$$
 $\omega_k = \frac{2}{\sqrt{LC}};$ $\frac{\omega_k}{\omega_x} = \sqrt{2}$
m=2 $\omega = \frac{1,532}{\sqrt{LC}};$ $\omega_k = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{LC}};$ $\frac{\omega_k}{\omega} = 1,85$
m=3 $\omega_0 = \frac{1,554}{\sqrt{LC}};$ $\omega_k = \frac{3}{\sqrt{LC}};$ $\frac{\omega_k}{\omega} = 1,93$

Табл	иця.2.1 – По	рівняння дослідних	і розрахункових	резонансних частот
	Замер	Досліди	Довга лінія	Цепна лінія

	при f=	при f=10 Гц		A. and a		Homenium					
Двигун типу	L (r)	а (пф)	ω_1	ω2	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$\stackrel{\omega_1}{=} \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$	$\omega_2 = \frac{\pi}{\sqrt{L0}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$ \overset{\omega_1}{=} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}} $	$=\frac{2}{\sqrt{LC}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$
4AX7IHB 4AX80A4У3 4A100Л43 A02-41-4	0.1 0.018 0.012 0.016	1160 920 720 720	157.10 ³ 345.10 ³ 489 10 ³ 358 10 ³	251.10 ³ 502.10 ³ 100410 ³ 62810 ³	1.59 1.45 2.06 1.79	$145.10^{3} \\ 385.10^{3} \\ 345.10^{3} \\ 238.10^{3}$	291.1 772.1 691.1 476.1	2.00 2.00 2.00 2.00	130 346 310 214	185 491 440 303	1.42 1.419 1.419 1.415

Для оцінки втрат в системі, що визначають параметри моделі, були проведені досліди по виміру $tg\delta$ і добротність обмотки $Q = \frac{\omega L}{R}$ при різних станах обмотки. Однак такі виміри можуть бути проведені тільки в області низьких частот. В той самий час втрати в ізоляції дуже цінні з точки зору інформації про її стан. Однак в загальному випадку складно достовірно оцінити зміну складових втрат при зміні частоти навіть при постійному стану ізоляції. Для загальної оцінки добротності системи були розглянуті резонансні явища як по частотним залежностям вхідних опорів Z₀ iZ_к так і по резонансним відносинам напруги на виході і вході обмотки в режимі х.х

Потрібно одразу відмітити що другий метод виявився мало ефективним, з огляду на істотний зсув резонансних частот при зміні стану ізоляції. Так при вимірах по схемі рис.2.1. були отримані наступні залежності для сухої нової ізоляції

F кГц	10	20	30	40	45	50	55	60
U1,B	9.2	9.2	9.2	10.12	9.4	9.4	10.0	9.4
U5 ,B	10	12.42	20.2	30.64	33.3	40.5	45.5	32

Таблиця 2.2 – залежності для сухої нової ізоляції

Після режиму тепло-вологого старіння, резонанс відповідно спостерігався на частоті 25~27.5 кГц і відношення напруги було $U_1 = 11B$, $U_5 = 34B$, $U_1 = 11.8B$ і $U_5 = 36B$, тобто добротність системи зменшилась в 1.5 раз. В порівнянні слабку залежність добротності можна пояснити тільки різко вираженою залежністю втрат в системі від частоти. Тому для оцінки цих факторів було проведено численне моделювання з оцінко збіжності по досліджуваним даним[3]. Були задані варіанти постійних $tg\delta = \frac{G}{\omega c} = 0.002$; 0.08; 0.2 Q = 4; 10; 20 для двигунів 4AX71H8 з параметрами L = 0.1 Гн, C = 1200 Пфі двигуна 4AX80A4УЗ з параметрами L = 0.018 Гн, C = 920 Пф

Зміни частоти задавались в межах від 50 до 200000 Гц.

В основу розрахункової моделі була взята довга однорідна лінія і спрощена ланцюгова схема. При розрахунку(11) використовувались наступні основні співвідношення(8),(9),(10).

$$1-Z_{0} = \sqrt{\frac{L}{c}} e^{-\frac{j\frac{1}{q}+tg\delta}{2}} cth[\frac{\omega}{2}\sqrt{LC}\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)+j\frac{\omega}{2}\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}} = Ae^{-ja}cth(x+jy) (8)$$

$$\square e^{-ja} = cosA - jsina; \text{ra } cth(x+jy) = \frac{shx-jsin2y}{ch2x-cos2y}$$

$$\operatorname{Im}(Z_{0}) = \frac{-j\sqrt{\frac{L}{c}}[cos\frac{\frac{1}{q}+tg\delta}{2}sin\omega\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}}+sh\frac{\omega}{2}\sqrt{LC}\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)sin\left(\frac{\frac{1}{q}+tg\delta}{2}\right)]}{ch\omega\sqrt{LC}\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)-cos\omega\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}}} (9)$$

$$R_{e}|Z_{0}| = \frac{\sqrt{\frac{L}{c}}[cos\frac{\frac{1}{q}+tg\delta}{2}sh\omega\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}}-sin\frac{\frac{1}{q}+tg\delta}{2}sin\omega\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}}]}{ch\omega\sqrt{LC}\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)-cos\omega\sqrt{LC}\sqrt{4-\left(\frac{1}{q}+tg\delta\right)^{2}}} (10)$$



Рисунок 2.1 – а) розрахунок ланцюгової лінії б, в) – порівнняння дослідних частотних залежностей з результатами розрахунків по спрощеній схемі

```
Z_{03} \rightarrow G - constZ_{03} + \rightarrow G - var
```



Рисунок 2.2 – двигун типу 4АХ71Н8





 $\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{-j \operatorname{Im}|Z_0|}{\operatorname{Re}|Z_0|}$

$$2 - Z_{\kappa} = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{\frac{-j\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}} th \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) + j\frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2} = Ae^{-ja} * th(x + jy), \text{ge}(x + jy)$$
$$= \frac{sh(2x) + j\sin(2y)}{ch(2x) + \cos(2y)}.$$
$$Im|Z_{\kappa}| = \frac{j\sqrt{\frac{L}{C}} \left[\cos\left(\frac{\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}\right) sin \left(\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2}\right) + sh \left(\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)\right) sin \left(\frac{\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}\right) \right]}{ch \left(\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)\right) + cos \left(\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2}\right)}$$

$$R_{e}|Z_{\kappa}| = \frac{\sqrt{\frac{L}{c}} \left[\cos\left(\frac{\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}\right) \sin\left(\omega\sqrt{LC}\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)\right) + \sin\left(\frac{\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}\right) \sin\omega\sqrt{LC}\left(\frac{\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}\right) \right]}{ch\left(\omega\sqrt{LC}\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)\right) + \cos\left(\omega\sqrt{LC}\sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^{2}}\right)}$$
(11)

$$\varphi_{\rm K} = \operatorname{arctg} \frac{jI_m |Z_{\rm K}|}{R_e |Z_{\rm K}|}$$
$$3 - |Z_{\rm B}| = \sqrt{|Z_0| \cdot |Z_{\rm K}|} i \varphi_{\rm B} = \frac{\varphi_0 + \varphi_{\rm K}}{2}$$

Для режимів холостого ходу і короткого замикання I_m і R_e представляють уявну і дійсну складову опору. Порівняння дослідних розрахованих кривих приведене на рис. 2.2 і рис. 2.3. 3 приведених розрахунків видно, що варіація Q і $tg\delta$ при приблизній рівності $\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)$ дає близькі криві і, як наслідок, знайти $tg\delta$ з ціллю оцінки стану ізоляції не представляється можливим. Таким чином, аналіз вхідних опорів не дає можливості виділити $tg\delta$ на підвищених частотах. Це ж підтверджує аналіз розрахованих моделей[4].

Якщо розглянути просту модель обмотки в виді одного чотириполюсника, то можна відмітити, що для режиму холостого ходу можливі два резонанси – резонанс напруги і резонанс струмів. Якщо розглядати приблизні умови резонансу, то при резонансі напруги на частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ опір ланцюга $Z_1 - I_1$, буде визначатись тільки активним опором $Z_p \cong \frac{\omega L_1}{Q} + \frac{tg \, \delta}{\omega c}$ де $tg \, \delta_2 \approx tg \, \delta$ відповідає уявленню Y_1 , у вигляді

послідовного з'єднання ємності C_1 і активного опору. При цьому $Z_1 \approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) = \sqrt{2}\sqrt{\frac{L}{c}} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)$. Резонанс струмів в режимі к. з. має місце при частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{Lc}}$.

Провідність при цьому
$$y = \omega C_1 \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)$$
, а опір $Z_{\kappa_1} \approx \sqrt{\frac{L}{C_1}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Q} + tg\delta}$

Очевидно, що якщо відома величина Q, то можна знайти $tg\delta$, але оскільки залежність $Q(\omega)$ складна, використовувати цей метод в такому вигляді неможливо.

В експериментах використовувались і інші методи оцінки добротності схеми[5].

Використання в якості моделі довгої лінії і ланцюгової схеми з довільною кількістю ланок дає порівнянні результати

Кращий збіг с дослідними результатами дає використання моделі ланцюгової схеми з обмеженою кількістю ланок при оцінки по частотам резонансу

При розрахунках і аналізу системи при частотах до першої резонансної можливо використання найпростішої ланцюгової схеми при m=1

Визначення основних параметрів моделі – індуктивності Li ємності C легко здійснюється дослідним або розрахованим шляхом. Основну складність представляє визначення складових відносних втрат, особливо на підвищених частотах.

2.3. Основні параметри машини, які визначають частотні характеристики

Обмотка електричної машини як електричного ланцюга характеризується індуктивністю, ємністю і активним опором. У робочому режимі на низьких частотах основними є індуктивність і активний опір, які відповідають втратам в електромагнітному полі. При підвищенні частоти все більше виявляються ємнісні зв'язки, як поперечні - між фазами та між обмотками і корпусом (землею), так і поздовжні – між витками і котушками однієї фазної обмотки. Відповідно зростають втрати в діелектриках.

Аналіз процесів ускладняється тим, що при підвищенні частоти починає позначатися розподіл параметрів по довжині обмотки. Основні параметри обмотки - індуктивність L, активний опір обмотки R поперечні ємності – корпусні C_к і міжфазна

 C_{ϕ} , еквівалентна провідність G, поздовжні елементарні ємності K; можуть бути визначені розрахунковим шляхом, так і з певними допущеннями, експериментальним шляхом.

Окремі елементи обмотки на підвищеній частоті характеризуються схемою рис. 2.4. Треба зазначити, що подібна схема характеризує елементи обмотки при імпульсних і хвильових процесах. В експериментальних дослідженнях найбільшу трудність представляє виділення і визначення ємності K. При обмеженому діапазоні частот, розглянутих дослідником, наприклад, при частотах першого і другого резонансу, вплив K в експериментах певною мірою еквівалентна деякій зміні основних параметрів L, R і C. Можливість поділу ємностей C і K на дуже високих частотах, вимірюваних мегагерцами, показано в [10], однак постановка таких експериментів представляє значні труднощі.

Таким чином, основними параметрами, що визначають вхідні опору обмотки в області частот, що представляють практичний інтерес (до 100 - 200 кГц), є *L*, *R*, *C*_к, C_{ϕ} , *G*. Разглянемо ці параметри при зміні частоти.



Рисунок 2.4 – схема заміщення обмотки для високих частот

2.4. Залежність параметрів обмотки від частоти

У граничному випадку прикладена до обмотки постійного струму величина Z_0 буде визначатися тільки величиною провідності(струмами витоку). Величина Z_{κ} буде визначатися омічним опором обмотки R_{0M} . При підвищенні частоти $Z_0 \cong \left(\frac{1}{G+j\omega C}\right)$ де C визначається комбінацією C_{κ} і C_{ϕ} для обраної схеми випробування, $G \approx \omega C \ tg \alpha$. При частотах в діапазоні від 500 до 1000 Гц абсорбційні явища проявляються слабо і заміряні на цих частотах (при постійному стані ізоляції) ємності практично не змінюються при подальшому зростанні частоти. Методика розрахунку ємності за геометричними розмірами розглянута в літературі [7].

Опір Z_{κ} в цьому ж діапазоні частот визначається як $Z_{\kappa} \approx R + j\omega L$. У діапазоні високих частот (до 100-200 кГц) визначальною є індуктивність розсіювання по немагнітним шляхам. Поля по шляхах взаємоіндукції і в сталі екрануються короткозамкненими контурами і вихровими струмами в сталі. Індуктивність розсіювання, заміряна за схемою рис. 2.5 при збільшенні частоти до 1000 Гц зменшується на 15-20%. Подальше збільшення частоти слабо впливає на величину індуктивності. Прямі вимірювання на більш високих частотах неможливі, проте непрямі розрахунки підтверджують слабку зміну індуктивності при подальшому зростанні частоти.

Значно складніше визначення активного опору R і активної провідності G на підвищених частотах.

Розгляд фізичних процесів показує, що R і G із зростанням частоти повинні збільшуватися, однак точних розрахункових або експериментальних методів для їх оцінки немає. На опір впливає витіснення струму в провідниках і втрати феромагнітних елементах. Більш точний розрахунок з урахуванням нелінійності та анізотропії можливий числовими методами.

Найбільший інтерес з точки зору оцінки стану ізоляції являє величина провідності *G* на різних частотах. Саме з цього питання в літературі немає певних даних за розрахунком ізоляційних конструкцій.

Використовуючи методики, розроблені на кафедрі ЕМ КПІ, розглянемо визначення індуктивності та активного опору пазової частини обмоток асинхронних двигунів на підвищених частотах чисельним методом.



Рисунок 2.5 – схема з'єднання обмотки на КЗ

2.5. Дослідне визначення параметрів

Для визначення основних параметрів, які можуть бути згодом використані для розрахунку вхідних і хвильових опорів обмотки можна скористатися обмеженою кількістю дослідів на низьких (f = 50 - 1000 Гц) частотах. Для визначення індуктивності проводиться дослід КЗ згідно зі схемою рис. 2.5. Індуктивність однієї фази $L_1 = \frac{x_e}{\varepsilon \omega}$ - де x_e індуктивний опір за результатами досліду. Взаємоіндукцією в області підвищених частот можна знехтувати. Величини фазної індуктивності для машин малої потужності згідно досліду представлені в табл. 2.3.

	Тип двигуна	р=2, Р=2кВт	4AX71H 8	4A80A4	4A100∠43	A02-41-4
	Індуктивні	0,030	0,1	0,018	0,012Γ	0,016Г
	СТЬ					
ИΠ	Корпусна					
ослі	ємність	1100	1160	920	1720	2720
Дс	(пФ)					
	Міжфазна					
	ємність	600	700	500	920	1500
	(пФ)					

	1 "	• •		••	•
1 ab $\pi u \pi \sigma / J \rightarrow -$			ппа манниц м	IATOI HOTVWUO	VCT1
1 ao лицл 2.5 -	боличини фазног	пдуктивност	для машип м	101101 IIUI YMIU	\mathcal{L}
1	1		7 1	J	

Для визначення дослідним шляхом ємності системи можна обмежитись двома дослідами холостого ходу на низьких частотах (f=50 - 1000 Гц), які можуть бути проведені або за допомогою універсального вимірювального моста, або методом вольтметрів.

В якості вихідних схем можна використовувати схеми рис. 2.6 а. а в області низьких частот обмотки можна розглядати, як системи з зосередженими параметрами, рис. 2.6 б. При цьому електричні відповідають прийнятим схемами з'єднання, представлені на рис. 2.7(а, б, в)



Рисунок 2.6 - Схеми для виміру ємності обмоток



Рисунок 2.7 - схеми заміщення обмотки

Згідно з приведеними схемами для з'єднання

$$C_{a} = C_{\kappa} + 2 \frac{C_{\kappa}C_{\phi}}{C_{\kappa} + C_{\phi}}$$

 $C_{6} = 3C_{\kappa}$
Таким чином $C_{\kappa} = \frac{C_{6}}{3}$ і $C_{\phi} = \frac{C_{\kappa}(C_{a} - C_{\kappa})}{3C_{\kappa} - C_{a}}$

Для перевірки цих співвідношень і методу, проведені заміри і розрахунки при інших схемах з'єднання, які дали приблизну відповідність розрахункових і дослідних даних. В таблиці приведені заміри по 3 схемам (схема *в* – контрольна) і розраховані значення C_{κ} і C_{ϕ} по яким знайдена величина $C_{\rm B} = \frac{C_{\kappa}}{2} + \frac{3}{2}C_{\phi}$.

Визначення C_{κ} і C_{ϕ} по дослідним данним

Двигун	До	сліди f=10 ³	Гц	Розрахунки		
типу	$C_{a}(\Pi\Phi)$	$C_{6}(\pi\Phi)$	$C_{\rm B}(C_{1-}C_2)$	<i>С</i> _к (пФ)	$C_{\phi}(\Pi \Phi)$	$C_{\rm B}(C_{1-}C_2)$
4AX71H8	1160	2610	700	870	174	646
4A80A4T3	920	2260	500	753	93	515
4A100∠43	1720	3466	982	1322	234	1012
р=2, Р=2кВт	1100	2650	600	883	123	625

Таблиця 2.4 – визначення C_{κ} і C_{ϕ} по дослідним данним

2.6 Вимір частотних залежностей вхідних опорів

Для виміру вхідного опору Z_0 при змінній частоті використовується схема рис. 1. На схемі представлена проста схема виміру Z_0 при живленні однієї фази. За допомогою електронного вольтметра вимірюються напруги на добавочному еталонному опорі $Z_{\text{дод}}(U_{03})$, на вході обмотки (U_{02}), на виході обмотки (U_{05}), на самій обмотці і повну напругу (U_{04}) і (U_{01}). Маючі ці напруги і знаючи величину додаткового опору, можна визначити модуль і аргумент вхідного опору. Для підвищення фазової чутливості схеми для вимірювання додатковий опір можна брати, як активний так і ємнісний[12].

Висновки до розділу 2

1. Всі параметри, які засновані на вимірі вхідних опорів на різних частотах, в тій чи іншій формі можуть бути використані для оцінки стану і зволоження ізоляції при неруйнівних випробуваннях.

2. Вхідні опори машин являються узагальненими параметрами. Всі величини, які використовуються при регламентних випробуваннях і діагностиці, є частковими випадками вхідного опору.

3. Як видно з провденого аналізу індуктивність обмотки не залежить від стану конструкції і залишається практично незмінною в області підвщених частот.

4. Ємність конструкції мало залежить від частоти в зоні підвищених частот, але чутлива до стану ізоляції і особливо до зволоження. Величина ємності при зволоженні може збільшуватись в 6-7 раз.

5. Вхідні опори можуть визначатись за допомогою простих вимірювальних схем, використовуючи доступну вимірювальну техніку.

III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ДЕФЕКТАМИ ІЗОЛЯЦІЇ

3.1 Експериментальні частотні характеристики нової, нової зволоженої, старої і старої зволоженої ізоляції.

Нар рис. 3.1-3.8 представлені частотні залежності зняті по схемі КЗ і схемі ХХ для наступних станів ізоляційної конструкції – нової, нової зволоженої, зістареної сухої, зістареної зволоженої. Аналіз приведених частотних залежностей показує, що при зволоженні нової ізоляції резонансна частота зміщується в область більш низьких частот, що повязано зі збільшенням поперечної ємності обмотки. У випадку нової ізоляції зволоження не значно впливає на зміну ємності обмотки, тому що обмотка не має інтегральних дефектів у вигляді руйнації структури ізоляції і відповідно зміни діелектричної проникності матеріалу ізоляції. У випадку зістареної ізоляції зменшення резонансної частоти обумовлено значним збільшенням ємності обмотки внаслідок заповнення дефектних розподілених зон товщі ізоляційної конструкції. Також слід відзначити, що при зволоженні ізоляції зменшується вхідний опрі за рахунок збільшення струмів витоку зістареної ізоляції на відміну від випадку з новою ізоляцією, там вхідний опір змінюється не суттєво.



Рисунок 3.1 – Графік Z(f) знятий по схемі КЗ на двигуні з новою сухою ізоляцією, резонанс на частоті 50 кГц, імпеданс 14,3 кОм.



Рисунок 3.2 – Графік Z(f) знятий по схемі K3 на двигуні з новою зволоженою ізоляцією, резонанс на частоті 49,25 кГц, імпеданс 13,55 кОм.



Рисунок 3.3 – Графік Z(f) знятий по схемі КЗ на двигуні зі зістареною сухою ізоляцією, резонанс на частоті 39 кГц, імпеданс 10,8 кОм.



Рисунок 3.4 – Графік Z(f) знятий по схемі КЗ на двигуні з зістареною сухою ізоляцією, резонанс на частоті 32 кГц, імпеданс 7,8 кОм.



Рисунок 3.5 – Графік Z(f) знятий по схемі XX на двигуні з новою сухою ізоляцією, перший резонанс на частоті 47,2 кГц, імпеданс 1,34 кОм, другий на частоті 74 кГц, імпеданс 3,9 кОм.



Рисунок 3.6 – Графік Z(f) знятий по схемі XX на двигуні з новою зволоженою ізоляцією, перший резонанс на частоті 45,7 кГц, імпеданс 1,29 кОм, другий на частоті 69 кГц, імпеданс 3,73 кОм.



Рисунок 3.7 – Графік Z(f) знятий по схемі XX на двигуні зі зістареною сухою ізоляцією, перший резонанс на частоті 36,2 кГц, імпеданс 1,14 кОм, другий на частоті 56 кГц, імпеданс 2,9 кОм.



Рисунок 3.8 – Графік Z(f) знятий по схемі XX на двигуні зі зістареною зволоженою ізоляцією, перший резонанс на частоті 34,2 кГц, імпеданс 0,84 кОм, другий на частоті 52 кГц, імпеданс 2,4 кОм.

3.3. Вплив локальних дефектів ізоляції електричних машин зі всипними обмотками на вигляд частних характеристик

Для зручності, тут і надалі точку мінімального значення частоти в смузі резонансу і точку максимального значення в смузі резонансу будемо називати мінімальною резонансною частотою і максимальною резонансною частотою, а мінімальне значення імпедансу в смузі резонансу і максимальне значення імпедансу в смузі резонансу будемо називати мінімальний резонансний імпеданс і максимальний резонансний імпеданс.

Суть досліду в підключенні опору, почергово 100 і 500 кОм (500 кОм мінімально допустимий опір ізоляції згідно з регламентними документами) між обмоткою і корпусом двигуна для моделювання пробою. Визначено, що при підключенні опору по схемі КЗ рис. 3.17 б, не відбудеться змін в частотній характеристиці, це пояснюється тим, що по ньому не буде протікати струм. Тому, для досліду була обрана схема підключення на XX рис. 3.17 а.

В залежності від місця підключення опору дефекту (на початку, по центру чи вкінці обмотки) мінімальна резонансна частота відхиляється по різному. При підключенні опору на початок обмотки значення мінімальної резонансної частоти відхиляється в сторону менших частот від звичайної без дефекту, при підключенні опору в кінець обмотки, навпаки, в сторону більших частот. Також, при підключенні опору між фазою та корпусом суттєво збільшується мінімальний резонансний імпеданс. Варто відзначити, що максимальний резонансний імпеданс і максимальна резонансна частота суттєво не змінюються. Також важливим фактором є те, що дефект в корпусній ізоляції проявляється тільки при схемі підключення на XX.

На рис 3.10-3.12 представлено залежність Zвх(f) живлячого сигналу при фізичному моделюванні локального дефекту головної(корпусної) ізоляції тобто локальному зиженню опору між обмоткою і магнітопроводом статора до 100 кОм в різних місцях розташування дефекту, на рис. 3.9 на центр фази, на рис 3.10 на початок фази, на рис. 3.11 на кінецб фази. Порівняння отриманих результатів занесене в таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Порівняння частотних характеристик при наявності та відсутності дефекту(з дефектним опором 100 кОм)

Розташування дефекту	30	сув	Зміна вхідного		
	резона	нсної	опору Z при		
	часто	ОТИ	резонансі		
Од. вимір.	кГц	%	кОм	%	
Початок фази	-7.5	-15.8	0.897	73.7	
Центр фази	-3.5	-7.4	0.594	48.6	
Кінець фази	2.5	5.5	0.829	67.7	



Рисунок 3.9 – Звичайна частотна характеристика для однієї фази двигуна без дефектів за схемою підключення на XX



Рисунок 3.10 – Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX однієї фази двигуна з опором 100 кОм на центр фази двигуна



Рисунок 3.11 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази двигуна з опором 100 кОм на кінець фази двигуна



Рисунок 3.12 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази двигуна з опором 100 кОм на початок фази двигуна

На рис 3.13-3.15 представлено залежність Zвх(f) живлячого сигналу при фізичному моделюванні локального дефекту головної(корпусної) ізоляції тобто локальному зиженню опору між обмоткою і магнітопроводом статора до 500 кОм в різних місцях розташування дефекту, на рис. 3.13 на центр фази, на рис 3.14 на початок фази, на рис. 3.14 на кінець фази. Порівняння отриманих результатів занесене в таблицю 3.2

Таблиця 3.2 – Порівняння частотних характеристик при наявності та відсутності дефекту(з дефектним опором 500 кОм)

D	30	сув	Зміна вхідного		
дефекту	резона часто	нсної оти	опору Z при резонансі		
Од. вимір.	кГц	%	кОм	%	
Початок фази	-1.5	-3.15	0.159	13	
Центр фази	-0.5	-1.05	0.048	4	
Кінець фази	0.5	1.05	0.101	8.3	



Рисунок 3.13 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази

двигуна з опором 500 кОм на центр фази двигуна



Рисунок 3.14 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази двигуна з опором 500 кОм на кінець фази двигуна



Рисунок 3.15 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази двигуна з опором 500 кОм на початок фази двигуна



Рисунок 3.16 - Графік залежності Z(f) за схемою підключення на XX, однієї фази двигуна з опором 100 кОм для чотирьох випадків підключення опору на початок, центр, кінець обмотки і дослід без дефекту

3.3 Моделювання пробою в міжвитковій ізоляції

Зняті частотні характеристики для режимів XX (рис. 3.17 а) і КЗ (рис. 3.17 б) для звичайної роботи двигуна в цих режимах рис. 3.18 і 3.19 і для цих же режимів, але вже з дефектом рис. 3.20-3.22. Після моделювання дефекту(однієї закороченої котушки) резонансна частота змістилась в область низьких частот на 10 Гц, з 110 кГц до 120 кГц відповідно, але після моделювання одного КЗ витка резонансна частота майже не змінюється. Це свідчить про те, що характеристики зняті по схемі КЗ для трьох фаз не інформативні, як і частотні характеристики зняті по схемі XX при підключенні 3-х фаз, тому вирішено використовувати для аналізу результати дослідів при підключенні тільки однієї фази двигуна.



Рисунок 3.17 – а) Схема підключення двигуна на XX б) Схема підключення двигуна на K3



Рисунок 3.18 - Графік залежності Z(f) для режиму K3 при включенні трьох фаз.



Рисунок 3.19 - Графік залежності Z(f) для режиму XX при включенні трьох фаз.



Рисунок 3.20 - Графік залежності Z(f) для режиму K3 при включенні трьох фаз з дефектом, однією закороченою котушкою.



Рисунок 3.21 - Графік залежності Z(f) для режиму XX при включенні трьох фаз, однією закороченою котушкою.



Рисунок 3.22 - Графік залежності Z(f) для режиму КЗ при включенні трьох фаз, з дефектом одним закороченим витком.



Рисунок 3.23 - Графік залежності Z(f) для режиму XX при включенні трьох фаз, з дефектом одним закороченим витком.

Після зняття частотних характеристик при підключення однієї фази двигуна ми отримали чіткіші результати і більші зміни резонансної частоти для режимів КЗ і XX при одному закороченому витку.

На рис 3.24 і 3.25 представлено залежність Zвх(f) живлячого сигналу при фізичному моделюванні локального дефекту міжвиткової ізоляції та без дефекту зняту по схемі XX. Резонансна частота після закорочення одного витка зменшилась на 5.5 кГц, що являється чіткою діагностичною ознакою. Вхідний опір зменшився на 17.9 % з 2892.71 Ом до 2447.67 Ом, що свідчить про суттєві зміни в RLC контурі. Зміщення части та зменшення вхідного опору можливо визначити за допомогою стандартного обладнання.



Рисунок 3.24 - Графік залежності Z(f)о при схемі підключення на XX однієї фази двигуна, резонанс при частоті 72 250 Гц



Рисунок 3.25 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази двигуна з дефектом(один виток закорочений), резонанс при частоті 78 250 Гц

Проаназівавши характеристики на рис. 3.26 і 3.27 зняті по схемі КЗ можна зробити висновок, що дані залежності також змінюються суттєво. На рисунку 3.26 надано графік Zbx(f) без дефекту, резонанс при частоті 94.5 кГц. На рис. 3.27 показано залежність Zbx(f) в контурі з КЗ витком, резонанс спостерігається при частоті 97.5 кГц. Різниця частот між обмоткою без дефекту і обмоткою з КЗ витком складає 3 кГц. Вхідний опір на резонансній частоті в першому випадку складає 2889 Ом а другому випадку 2511 Ом відносна різниця між величинами складає 14.3%.



Рисунок 3.26 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3 однієї фази двигуна з дефектом(один виток закорочений), резонанс при частоті 94 500 Гц



Рисунок 3.27 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази двигуна з дефектом(один виток закорочений), резонанс при частоті 97 500 Гц

Для режиму XX проведено ще чотири досліди з підключенням ємності 4500 мкФ на корпус і паралельно фазі (рис. 3.28-3.31).

На рис 3.28-3.31 представлено залежність Zвх(f) живлячого сигналу при підключенні додаткової ємності 4500 мкФ на корпус(рис. 3.28 і 3.29) та паралельно фазі(рис. 3.30 і 3.31). Порівняння отриманих результатів занесене в таблицю 3.3

Таблиця 3.3 – Порівняння частотних характеристик при наявності та відсутності дефекту для схеми підключення з додатковою ємністю.

Вид дефекту	Резонан	сна частота	Вхідний опір Zвх при резонансі		
Од. вимір.	кГц	Зміна порівняно з оригіналом, %	кОм	Зміна порівняно з оригіналом, %	
Ємність підключена на корпус(без дефекту)	38 -		9.358	-	
Ємність підключена на корпус(один виток закорочений)	40	5	8.838	5.5	
Ємність підключена паралельна фазі (без дефекту)	117	-	1.211	-	
Ємність підключена паралельна фазі (один виток закорочений)	120	2.5	1.136	6.2	

Виконавши аналіз таблиці 3.3 Можна зробити висновок, що підключення ємності на корпус змінює вигляд частотної характеристики, але не є ефективним засобом для підвищення чутливості RLC контура, оскільки зсув резонансів менший ніж на характеристиках знятих без підключення додаткової ємності.



Рисунок 3.28 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази





Рисунок 3.29 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази двигуна з ємністю на корпус і дефектом(один виток закорочений), резонанс при частоті 40 000 Гц



Рисунок 3.30 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази двигуна з ємністю паралельно фазі, резонанс при частоті 117 000 Гц



Рисунок 3.31 - Графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX однієї фази двигуна з ємністю паралельно фазі і дефектом(один виток закорочений), резонанс при частоті 120 000 Гц

Нижче на рис. 3.32 наведено порівняння трьох характеристик: 1) Zbx(f) знята по схемі підключення XX без дефекту, 2) Zbx(f) знята по схемі підключення XX з
одним КЗ витком, 3) Zвх(f) знята по схемі підключення XX з п'ятьма КЗ витками. Як добре видно з цих характеристик при збільшенні дефекту помітно збільшується резонансна частота від 72 кГц в режимі без дефекту до 85 кГц в режимі з 5 КЗ витками і аналогічно вхідний опір на резонансній частоті від 2892,71 Ом до 3535,53 Ом. Резонансна частота збільшилась на 15,3%, вхідний опір на резонансній частоті збільшився на 18,2%.



Рисунок 3.32 - Порівняння частотних характеристик для досліду на схемі XX без дефекту, з одним КЗ витком і з 5 КЗ витками.

3.4 Моделювання міжвиткового дефекту в міжвитковій ізоляції при новому та зістареному стані ізоляційної конструкції.

Нар рис. 3.33-3.40 представлені частотні залежності зняті по схемі КЗ і схемі XX для наступних станів ізоляційної конструкції – нової, нової зволоженої, зістареної сухої, зістареної зволоженої при додатковій наявності дефекту міжвиткової ізоляції(один КЗ виток). При наявності КЗ витка процес збільшення втрат в резонансному контурі обумовлений циркуляцією наведеного струму в КЗ контурі накладується на картину інтегральної деструкції ізоляції тобто опір, ще зменшується, а також зменшується резонансна частота, що у порівнянні з опором і частотою бездефектної фази може вказати на наявність дефекту.



Рисунок 3.33 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі K3 для нової ізоляції з одним закороченим витком резонанс при частоті 49,6 кГц, Z=14,05 кОм.



Рисунок 3.34 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі КЗ для нової зволоженої ізоляції з одним закороченим витком резонанс при частоті 49,1 кГц, Z=14,3 кОм.



Рисунок 3.35 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі K3 для старої сухої ізоляції з одним закороченим витком резонанс при частоті 38,5 кГц, Z=10,4 кОм.



Рисунок 3.36 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі КЗ для старої зволоженої ізоляції з одним закороченим витком резонанс при частоті 31,5 кГц, Z=7,3 кОм.



Рисунок 3.37 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі XX для нової ізоляції з одним закороченим витком, перший резонанс при частоті 46,7 кГц, Z=1,295 кОм, другий при частоті 70 кГц, Z=3,73 кОм.



Рисунок 3.38 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі XX для нової зволоженої ізоляції з одним закороченим витком, перший резонанс при частоті 45,4 кГц, Z=1,19 кОм, другий при частоті 71 кГц, Z=3,5 кОм.



Рисунок 3.39 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі XX для старої сухої ізоляції з одним закороченим витком, перший резонанс при частоті 35,8 кГц, Z=1,04 кОм, другий при частоті 55,5 кГц, Z=2,5 кОм.



Рисунок 3.40 – Графік залежності Z(f) знятий по схемі XX для старої зволоженої ізоляції з одним закороченим витком, перший резонанс при частоті 33,8 кГц, Z=0,64 кОм, другий при частоті 51,5 кГц, Z=1,93 кОм.

Висновки до розділу 3

Визначення стану поперечної ізоляції можна проводити високочастотними впливами за допомогою ланцюгової схеми заміщення працюючої в режимі XX.

Визначення дефектів поперечної ізоляції, які характеризуються перехідним еквівалентним опором нижче 0.5 МОм (згідно нормативних документів) можна проводити з локалізацією місця дефекту в кінці, в центрі та на початку обмотки.

При роботі контрольної схеми в режимі КЗ дефекти поперечної ізоляції не проявляються на відміну від дефектів поздовжньої ізоляції, які проявляються в обох режимах XX і КЗ. Це дозволяє однозначно ідентифікувати тип дефекту.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження роботи контрольної схеми при наявності дефектів поперечної ізоляції з перехідним опором 0.1 і 0.5 МОм. Проведено, розрахунки високочастотних електрофізичних процесів в обмотці електричного двигуна 4А80А4 УЗ в середовищі MatLab Simulink в при представленні обмотки ланцюговою схемою заміщення.

Показано, що при порівнянні експериментальних та розрахункових досліджень достатньо для необхідної інженерної точності обмеження одноланковою схемою заміщення.

Наявність короткозамкненого витка в обмотці приводить до зміни активноіндуктивних параметрів на резонансній частоті, що дозволяє виявляти ці дефекти під час діагностування асинхронних двигунів.

IV. РОЗРАХУНОК ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТЦІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ MatLab Simulink

4.1 Побудова частотних характеристик за допомогою MatLab Simulink 4.1.1 Моделювання дефекту в корпусній ізоляції

Для дослідження дефекту в корпусній ізоляції була обрана схема рис. 4.4-4.5, ця схемі відрізняється від звичайної ланцюгової схеми заміщення тим, що має ще один елемент, опір який ми включаємо між обмоткою та корпусом для моделювання дефекту.



Рисунок 4.4 - Розгорнута схема для моделювання дослідів



Рисунок 4.5 - Вміст блоку RLC для а)дослід без дефекту б) дослід з дефектом в міжвитковій ізоляції в) дослід з дефектом в міжкорпусній ізоляції

Далі показано отримані графіки при проведенні моделювання.



Рисунок 4.6 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX з додатковим підключенням опору 100 кОм між центром



Рисунок 4.7 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX з додатковим підключенням опору 100 кОм між кінцем обмотки і корпусом



Рисунок 4.8 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX з додатковим підключенням опору 100 кОм між початком обмотки і корпусом



Рисунок 4.9 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX з додатковим підключенням опору 500 кОм між центром обмотки і корпусом



Рисунок 4.10 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX з додатковим підключенням опору 500 кОм між кінцем обмотки і корпусом

4.1.2 Розрахунок додаткової ємності утвореної внаслідок старіння та зволоження ізоляційної конструкції двигуна та моделювання частотних характеристик в MatLab Simulink

Для розрахунку додаткової ємності спочатку потрібно розрахувати параметри схеми заміщення. Опір обмотки та індуктивність вимірюються за допомогою мультиметра, а ємність розраховується по методиці зазначеній в пункті 1.4..

*С*_{поз} = 0,455 нФ

З досліду КЗ в точці резонансу $f_0 = 50$ кГц величина

$$Z_{\text{K3}}_{f_o} \approx R. \ Z_{\text{K3}}_{f_o} = 14,3$$
 кОм звідси $R = 14,3$ кОм.

За допомогою високоточного вимірювального обладнання вимірюємо L = 9 мГн, $C_{\Pi} = 1.2$ нФ.

Розраховуємо додаткову ємність використовуючи рівняння

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L(0,5C_{\pi 03} + C_{\pi} + C_{\pi})}}$$

Розрахована додаткова ємність занесена в таблицю 4.1

Таблиця 4.1 Розрахована додаткова ємність

Стан ізоляційної конструкції	Додаткова ємність, нФ
Нова суха	0
Нова зволожена	0.31
Зістарена суха	2.28
Зістарена зволожена	3.74

Задаємося розрахованими параметрми для схеми зображеної на рисунку 4.12 і

4.13.



Рисунок 4.12 – Схема КЗ для розрахунку частотних характеристик в MatLab Simulink



Рисунок 4.13 – Схема XX для розрахунку частотних характеристик в MatLab Simulink





Рисунок 4.14 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{\rm g} = 0 \ \Phi$



Рисунок 4.15 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{\rm g} = 0.31$ нФ



Рисунок 4.16 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{\rm g} = 2.28$ нФ



Рисунок 4.17– змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{\rm g} = 3.74~{\rm H}\Phi$



Рисунок 4.18 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{d} = 0 \Phi$



Рисунок 4.19 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{\rm g} = 0.31$ нФ



Рисунок 4.20 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{\rm g} = 2.28$ нФ



Рисунок 4.21 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{\mu} = 3.74$ нФ

4.1.3 Моделювання графіків в MatLab Simulink для нової і зістареної ізоляції з дефектом в міжвитковій ізоляції.

Використовувалась багатоланкова схема заміщення рис. 4.4, вміст одного блоку RLC для моделювання зволоження ізоляції показаний на рисунку 4.22.







Рисунок 4.23 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{d} = 0.31$ нФ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.24 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{\rm g} = 2.28$ нФ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.25– змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на K3, $C_{d} = 3.74$ нФ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.26 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі

підключення на XX, $C_{d} = 0 \Phi$ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.27 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{d} = 0.31$ нФ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.28 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{\rm g} = 2.28$ нФ з одним закороченим витком.



Рисунок 4.29 – змодельований в MatLab Simulink графік залежності Z(f) при схемі підключення на XX, $C_{\rm g} = 3.74~{\rm h}\Phi$ з одним закороченим витком.

Висновки до розділу 4

1. Використання схем заміщення з обмеженою кількістю ланок дозволяє отримати ресзультати, які співпадають з дослідними.

2. Для моделювання інтегральних дефектів ізоляції можна використовувати одноланкову схему заміщення.

3. Визначення основних параметрів схеми заміщення — індуктивності *L* і ємності *C* можна легко виконати дослідним шляхом.

4. Наявність короткозамкненого витка в обмотці приводить до зміни активноіндуктивних параметрів на резонансній частоті, що дозволяє виявляти ці дефекти під час діагностування асинхронних двигунів.

V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Проблема та цільова аудиторія проекту

Проблема надійності виткової ізоляції всіх котушечних обмоток електричних приладів, як неспівпадіння між бажаним і дійсним, існує в теперішній час і буде існувати в майбутньому. Її вирішення потребує затрат часу і великої кількості сил на створення нових видів ізоляції і технології виготовлення обмоток; способів і приладів для контролю і випробування обмоток; захист виткової ізоляції від внутрішніх механічних пошкоджень і небезпечних для ізоляції комутаційних перенапруг.

Цільова аудиторія проекту дуже широка оскільки кількість ремонтних майстерень збільшується з кількістю виготовлених двигунів, а при чіткій діагностиці можна усунути поломку швидко і на довго.

5.1.1 Рішення та його новизна

Вже існують схожі аналоги пристрою, але вони визначають тільки наявність дефекту. За запропонованою технологією можна з достатньою точністю визначити місце знаходження дефекту в обмотках електричних пристроїв, що ще не застосовувалось жодним підприємством.

Quiem idei	Напрямки	Вигоди для	
Smich idei	застосування	користувача	
Ідея полягає в	Електромобілі		
розробці приладу для	Виробничі	Зручність у	
визначення дефекту	пдприємства	користуванні.	
ізоляції електричних	Підприємства з	Спрощення	
машин та місця його	ремонту	визначення дефекту	
розташування	електродвигунів		

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Пристрій відноситься до електротехнічної промисловості, зокрема до пристрою контролю та індикації дефектів ізоляції електричних машин зі всипними обмотками. Такі дефекти виникають у випадках

- Неправильної експлуатації електричних машин

- Надмірній вологості навколишнього середовища

- Зістаренні ізоляції електричних машин

- Проникнення води до обмотки внаслідок дефектів захисту від атмосферних опадів

- Винекнення браку під час виробництва електричної машини.

5.1.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В даному підрозділі був проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Для реалізації даної ідеї – розробка приладу для визначення дефектів в міжвиткові та міжкорпусній ізоляції електричних машин зі всипними обмотками. Ця технологія полягає в тому, що прилад буде запамятовувати частотні характеристики машини і порівнювати їх після довготривалої експлуатації ЕМ. Незручність реалізації даної технології полягає в тому що, потрібно правильно розрахувати вхідну напругу і діапазон частот для ЕМ, які будуть суттєво відрізнятись габаритами.

В зв`язку з цим було проведено аналіз схеми заміщення в MatLab Simulink, що дозволяє розрахувати первинну характеристику для непошкодженої ЕМ. Даний дослід полягає в тому, що ми можемо бачити первинний вигляд характеристики, яку ми будемо порівнювати зі знятою частотною характеристикою досліджкваного двигуна.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту зображено в таблиці 4.2

N⁰	Idag upogram	Технології	Наявність	Доступність
n/n	тоея проекту	ії реалізації	технологій	технологій
1.	Розробка приладу для визначення дефекту ізоляції ЕМ зі всипними обмотками.	Розробка схеми заміщення	Наявна	Доступна
2.	Розробка приладу для визначення дефекту ізоляції ЕМ зі всипними обмотками.	Розробка приладу зняття і порівнняння частотних характеристик	Наявна	Доступна
3.	Розробка приладу для визначення дефекту ізоляції ЕМ зі всипними обмотками.	Визначення ознак дефекту шляхом порівняння характеристик	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка приладу для контролю стану ізоляційної конструкції ЕМ.				

Таблиця 4.2 Технологічна здійсненність ідеї проекту

5.1.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

Для того щоб спланувати напрями розвитку проекту та потреби потенційних клієнтів, потрібно визначити ринкові можливості, які використовуються під час ринкового впровадження об'єкту.

Аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку; зображено в таблиці 4.3

n/ n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
	Кількість головних гравців, од	3
	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
	Наявність обмежень для входу (вказати	Відсутні
	характер обмежень)	
	Специфічні вимоги до стандартизації та	Стандарти з
	сертифікації	випереджаючими
		вимогами
	Середня норма рентабельності в галузі (або	5%
	по ринку), %	

Таблиця 4.3 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

В Україні існує лише одне підприємство «ХарьківПрилад», яке виготовляє схожі прилади для діагностування дефектів в ізоляції, але вони не дають місцезнаходження дефекту ізоляції в нерозібраному стані, вони лише вказують наявність або відсутність дефекту в котушці. Даний підхід і принципи побудування контрольно-вимірювальної апаратури дозволяють вказувати місця дефекту ізоляції з достатньою точністю, що відповідає ступеню на рівень вище на відміну від усіх можливих конкурентів.

Для того, щоб розрахувати внутрішню норму прибутку, тобто рентабельність інвестицій, була використана формула (4.1).

$$IRR = \left(\frac{S_n}{I_0}\right)^{1/n} - 1 = \sqrt[n]{S_n}{I_0} - 1$$
(4.1)

де, IRR – Внутрішня норма прибутку (англ. Internal Rate of Return),

 S_n – Дохід за період *n*,

*I*₀ – Величина початкових витрат (інвестицій).

Витрати на виготовлення одного приладу приблизно дорівнюють 1300 грн, середньоринкова ціна 3-5 тис. грн. Якщо не платити налоги то можна з одного проданого приладу отримуати 2000 тис. грн., що в переводі на річний період(за умови продажу 1 приладу в день) складає 7 млн. грн..

В даному випадку інвестором являється підприємство на якому експлуатується дані асинхронні двигуни з фазним ротором.

Розмір інвестицій складає 6 млн. грн.

$$IRR = \sqrt[3]{7000000} / 6000000 - 1 = 0,16$$

У відсотках це значення складає 16 %.

Тобто, можна сказати що, за один рік прибуток складе 1 млн. грн:

 $P_1 = IRR \times I_0 = 0.16 \times 7$ млн. грн. = 1 млн. грн. ;

Доцільно буде провести розрахунки для періоду окупності проекту:

$$T_o = {I_0 / P_1} \times M$$

де, То-Період окупності;

*I*₀ – Розмір початкових капіталовкладень;

*P*₁ – Прибуток за 5 років;

М₁ – Кількість місяців;

 $T_0 = \frac{6000000}{7000000} \times 12 = 10.2$ мic.

З розрахунку випливає, що період окупності інвестицій T₀ складає 10.2 місяців.

На основі аналізу факторів загроз та ринкових можливостей маркетингового середовища був складений SWOT – аналіз. Матриця аналізу сильних(Strenght) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) таблиця 4.4.

 Сильні
 сторони:
 висока
 Слабкі
 сторони:
 ризик

 рентабельність проекту.
 інвестиціями ,
 інвестиціями ,

 Можливості:
 впровадження
 Загрози: можуть з'явитись в ході

 даної технології не тільки для ЕМ з
 розробки приладу

 всипними обмотками.

Таблиця 4.4 SWOT – аналіз стартап - проекту

5.1.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Потенційними покупцями являється широкий прошарок фірм, що використовують або займаються ремонтом електричних двигунів, оскільки економія коштів при вчасному ремонті електродвигуна повністю виправдовує себе в економічному плані. Вартість ремемонту нерозвиненого дефекту становить приблизно 20% вартості ремонту розвиненого дефекту і 10% від вартості нової машини.

Висновки до розділу 5

1. Розробка приладу для контролю стану ізоляційної конструкції та визначення дефекту в ній, є перспективним стартап проектом, оскільки, на даний момент не існує приладу для неруйнуючого контролю ізоляції електричних машин зі всипними обмотками.

2. В розділі вказано слабкі та сильні сторони стартап проекту, приведений аналіз основних конкурентів, обгрунтовано конкурентоспроможність.

3. Розроблено ринкову стратегію проекту. Вказано основних потенційних покупців.

висновки

В таблиц нижче наведено результати досліду з дефектом міжкорпусної ізоляції при підключенні дефектного опору 100 кОм на початок, центр і кінець фази. З таблиці помітно, що чим ближче дефект до початку фази тим менше буде резонансна частота в порівнянні з бездефектною характеристикою, а чим ближче дефект до центру тим більше зменшиться вхідний опір.

Doomouumouum	30	сув	Зміна вхідног	
дефекту	резонансної частоти		опору Z при резонансі	
Од. вимір.	кГц	%	кОм	%
Початок фази	-7.5	-15.8	0.897	73.7
Центр фази	-3.5	-7.4	0.594	48.6
Кінець фази	2.5	5.5	0.829	67.7

В таблиці нижче наведено порівняння частотних характеристик при підключенні дефектного опору 500 кОм. Зберігаються закономірності, які мали місце при підключенні дефектного опору 100 кОм, але тепер значною мірою не так виражені.

Розтаниувания	Зсув резонансної частоти		Зміна вхідного	
дефекту			опору Z при резонансі	
Од. вимір.	кГц	%	кОм	%
Початок фази	-1.5	-3.15	0.159	13
Центр фази	-0.5	-1.05	0.048	4
Кінець фази	0.5	1.05	0.101	8.3

Щодо інтегральних дефектів ізоляції можна зробити визсновок, що вони визначаються додатковою ємністю утвореною внаслідок старіння і зволоження ізоляції. Дані порівнняння додаткової ємності для різних станів ізоляції приведені в таблиці нижче.

Стан ізоляційної конструкції	Додаткова ємність, нФ
Нова суха	0
Нова зволожена	0.31
Зістарена суха	2.28
Зістарена зволожена	3.74

Визначення стану поперечної ізоляції можна проводити високочастотними впливами за допомогою ланцюгової схеми заміщення працюючої в режимі XX.

Визначення дефектів поперечної ізоляції, які характеризуються перехідним еквівалентним опором нижче 0.5 МОм (згідно нормативних документів) можна проводити з локалізацією місця дефекту в кінці, в центрі та на початку обмотки.

При роботі контрольної схеми в режимі КЗ дефекти поперечної ізоляції не проявляються на відміну від дефектів поздовжньої ізоляції, які проявляються в обох режимах XX і КЗ. Це дозволяє однозначно ідентифікувати тип дефекту.

В роботі досягнуто поставлену мету, оцінено ступінь впливу дефектності обмотки на діагностичні параметри вхідний опір та резонансну частоту.

Вивчені основні параметри що використовуються при неруйнівних випробуваннях ізоляції обмоток електричних машин на прикладі асинхронного двигуна загального призначення 4А80А4 УЗ.

Розглянуто вплив дефектів ізоляції багатовиткових котушок у вигляді одного КЗ витка, п'яти КЗ витків, та КЗ частини обмотки(котушки) на основні параметри обмоток при випробуваннях, вхідний опір і резонансну частоту.

Проведено зняття частотних залежностей вхідних опорів, які розглянуті як узагальнений параметр для оцінки якості ізоляційної конструкції.

Досліджено зв'язок вхідних опорів з параметрами обмоток при високочастотних вхідних напругах за допомогою чого розраховані частотні характеристики.

Проведено фізичне моделювання дефектів обмоток у вигляді КЗ витків на спеціально підготовленому двигуні з виводами частин однієї фази на зовнішню панель.

Розглянуто, математичні моделі обмотки на базі схем заміщення різного ступеня складності і проведено розрахунки частотних залежностей вхідних опорів для цих моделей за допомогою системного пакету MatLab Simulink.

Показано можливість виявлення КЗ контурів багатовиткових обмоток на підвищених резонансних частотах.

Показано, що на отримання достовірної інформації по наявності дефектів дестабілізуючий вплив надає технологічна несиметрія фаз, яка проявляється в змінах активно-індуктивних та ємнісних параметрів.

Запропоновано спосіб усунення технологічної асиметрії шляхом введення додаткової змінної ємності, що само налаштовуються в вимірювальний ланцюг двох фаз які порівнюються в процесі випробувань.

Список використаної літератури

1. Горбунов Ю.К. – "Высокочастотная диагностика изоляции обмоток ЭМ". Автореферат докторской диссертации. Новосибирск. 1996 г.

2. Каганов З.Г. – «Волновые напряжения в ЭМ». М. «Энергия», 1970 г.

3. Сайт магистра ДонНТУ Шевцова А. В. [Электронный ресурс].

4. Полковниченко Дмитрий Викторович. Совершенствование диагностирования обмоток короткозамкнутых асинхронных электродвигателей на основе контроля параметров рабочего режима: Дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Донецкий национальный технический ун-т. – Донецк, 2003. – 202л. – Библиогр.: л. 136-148.

5. Сайт магистра ДонНТУ Маруневича А. И. [Электронный ресурс].

6. Вовк Александр Юрьевич. Эксплуатационный контроль работоспособности асинхронных электродвигателей по их функциональному состоянию: Дис... канд. техн. наук: 05.09.16 / Таврическая гос. агротехническая академия. – Мелитополь, 2003. – 172л. – Библиогр.: л. 128-140.

 Ляткер И.И., Мордкович А.Г., Несвижский А.М. Система непрерывного контроля и диагностики синхронных машин // Электротехника. – 1996. – № 3. – С. 44-47.

8. Мануковский А.В. Совершенствование защит асинхронных двигателей от внутренних повреждений: Автореф. дис... канд.техн.наук. Павлодар, 1995.

9. Браташ О. В., Калинов А. П., Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского, статья Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей

10. Чернов, Дмитрий Владимирович Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.01 / Ульян. гос. техн. ун-т

11. Молодых, Павел Анатольевич Диагностика асинхронных двигателей средней мощности по результатам приемо-сдаточных испытаний: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.01

 Рогачев, Вячеслав Анатольевич Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.01 / Рогачев Вячеслав Анатольевич; [Место защиты: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т)
 Саада Гургес Исследование влияния повреждений короткозамкнутого ротора на работу асинхронного двигателя: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.01

14. Берштейн Л. М.Изоляция електрических машин общего назначения. Москва, Енергия, 1981.

15. Борисоглебский П. В. Физические основы и методы профилактики промышленой изоляции. Госэнергоиздат, 1949.

16. Скипетров В. В. і Альбицкая О. Н. Электрическая изоляция в условиях тропиков. Электричество, 1957

17. Таран В. П. Диагностирование электрооборудывания, Киев, ТехнІка, 1983.

18. Исследование возможностей непрерывного контроля изоляции действующих электроустановок без вывода их из эксплуатации // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. №1 (10) 2005 ст. 87-90

19. В. Тарасюк – Контроль та випробування ізоляції обмоток тягових двигунів електропоїздів під час ремонту //Праці наукової бібліотеки імені Вернадського 2012 р.

20. В.А. Чернышев, Е.В. Зенова, В.А. Чернов и др – Обобщенный индекс поляризации как параметр контроля состояния изоляционных промежутков силовых трансформаторов /. // Материалы IV международной конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики». – 2009. – 653 с.

21. Jose Luis Oslinger, Luis Carlos Castro, "Correlation between capacitance and dissipation factor used for assessment of stator insulation", *Intern'l Journal of Electrical Engg.*, vol. -6, no. 3, 2012.

22. Бакурадзе Л. Н. и др. Определение режимов ускоренных испытаний на сохраняемость электроизоляционных конструкций электрических машин малой мощности. Электрические машины, вып. II, 1978.

- A. BOGLIETTI, E. CARPANETO(2001). An Accurate Induction Motor High-Frequency Model for Electromagnetic Compatibility Analysis. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.
- 24. A. Boglietti; Cavagnino A.; M. Lazzari (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy.
- S. Ogasawara and H. Akagi, 1996, "Modeling and damping of high frequency leakage currents in PWM Inverter fed AC motor drive system," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 32, No. 5, pp. 1105–1113.
- Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems—Part 3: EMC Product Standard Including Specific Test Methods, IEC 61800-3, 1996-09