

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак
(підпис)

«__» __червень__ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: Уточнення частотних параметрів асинхронних двигунів зі всипними обмотками

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕМ-01

_____ Горбатко Дмитро Дмитрович _____	_____
(прізвище, ім'я, по батькові)	(підпис)

Керівник: <u>PhD, асистент, Стулішенко Андрій Сергійович</u>	_____
(прізвище, ім'я, по батькові)	(підпис)

Рецензент: <u>PhD, асистент, Ніконенко Євген Олексійович</u>	_____
(прізвище, ім'я, по батькові)	(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.В. Чумак
(підпис)

«__» жовтень 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Горбатко Дмитрові Дмитровичу

1. Тема роботи Уточнення частотних параметрів асинхронних двигунів зі
всипними обмотками

керівник роботи Стулішенко Андрій Сергійович, асистент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2024

3. Вихідні дані до роботи Високочастотні параметри обмотки асинхронних
двигунів малої потужності та еквівалентні схеми заміщення.

4. Зміст роботи Вступ, Аналітичний огляд частотних параметрів обмоток
електричних машин, Розрахунок високочастотних процесів у обмотці,
Експериментальне дослідження частотних характеристик асинхронного двигуна
та вимірювання параметрів.

5. Перелік графічного матеріалу презентація, доповідь.

6. Дата видачі завдання 10.10.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд схем заміщення обмотки та її параметрів при живленні напругою високої частоти	30.01.2024	
2	Розрахунок високочастотних процесів у обмотці	20.03.2024	
3	Експериментальне дослідження та зняття частотних характеристик асинхронного двигуна	30.04.2024	
4	Вимірювання та визначення на основі отриманих результатів параметрів схеми заміщення	20.05.2024	
5	Аналіз отриманих результатів та порівняння з розрахунками	3.06.2024	
6	Оформлення дипломної роботи та презентації	10.06.2024	

Студент

(підпис)

Горбатко Д. Д.

Керівник проекту

(підпис)

Стулішенко А. С

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 63 сторінках, містить 35 рисунків, 6 таблиць та 14 літературних посилань.

У даній дипломній роботі розглянуто процеси, які відбуваються при живленні асинхронного двигуна від перетворювача частоти або при комутації обмоток. Наведено та описано одноланкову і багатоланкову схеми заміщення. Описано параметри високочастотної схеми заміщення, а також їх залежність від частоти. Досліджено вплив різного роду дефектів і можливості відповідно їх виявлення шляхом порівняння частотних характеристик. Уточнено високочастотні параметри асинхронного двигуна 4A80A4. Проведено велику кількість реальних досліджень з використанням цифрового двоканального осцилографа з вбудованим генератором. Зроблено прототип пристрою для автоматичного зняття частотних характеристик та виведення результату на комп'ютер, результати вимірювання яким наведені у роботі.

Ключові слова: Частотна характеристика, високочастотні параметри, резонанс, дефекти ізоляції.

ABSTRACT

The thesis consists of 63 pages, contains 35 figures, 6 tables and 14 references.

This diploma thesis examines the processes that occur when powering an asynchronous motor from a frequency converter or when switching windings. Single-link and multi-link substitution schemes are presented and described. The parameters of the high-frequency substitution circuit are described, as well as their dependence on frequency. The impact of various types of defects and the possibility of detecting them by comparing frequency characteristics have been studied. The high-frequency parameters of the 4A80A4 asynchronous motor have been specified. A large number of real experiments have been conducted using a digital two-channel oscilloscope with a built-in generator. A device prototype was made for automatically obtaining frequency characteristics and outputting the result to a computer, the measurement results of which are given in the work.

Keywords: Frequency response, high-frequency parameters, resonance, insulation defects.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
I. ЧАСТОТНІ ПАРАМЕТРИ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН.....	9
1.1. Частотні параметри довгої лінії	9
1.2. Частотні параметри схеми заміщення обмотки електричних машин	11
1.2.1. Багатоланкова схема заміщення	12
1.2.2 Параметри ланки схеми заміщення у вигляді чотириполюсника.....	14
1.3. Частотні залежності одноланкової і багатоланкової схеми заміщення при інтегральній і локальній зміні параметрів	21
1.4. Вимірювання високочастотних параметрів за допомогою спеціалізованого обладнання	23
1.5. Висновки	26
II. РОЗРАХУНОК ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З РІЗНОЮ СХЕМОЮ УКЛАДАННЯ ОБМОТОК	27
2.1. Типові варіанти обмоток асинхронних двигунів потужністю до 5.5 кВт та кількістю полюсів $2p=4$ і $2p=6$	27
2.2. Розрахунок високочастотних процесів у обмотці при врахуванні лише власних параметрів однієї фази	31
2.3. Розрахунок високочастотних процесів з урахуванням індуктивних зв'язків між сусідніми елементами обмоток	38
2.4. Висновки	43
III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ СМІЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ОБМОТОК	44
3.1. Високочастотна схема заміщення двигуна 4A80A4 з урахуванням взаємодій індуктивних зв'язків	44
3.2. Експериментальне дослідження високочастотних процесів двигуна 4A80A4 з визначенням вхідного опору та резонансної частоти.....	49
3.3. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів	57
3.4. Висновки	58
ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	62

ВСТУП

Електричні машини змінного струму з висипними обмотками з круглого проводу є одним з наймасовіших типів електричних машин, що застосовуються скрізь для електромеханічного перетворення енергії та виконання механічної роботи. Їх чисельність вимірюється мільярдами, а це означає неминуче виникнення питання не тільки їх виготовлення, а також їх експлуатації, діагностування та, за економічної доцільності, ремонту.[1]

Одною з поширених причин виходу з ладу таких машин є пошкодження ізоляції обмотки та відповідно порушення електричної міцності. Тому питання електричної, механічної та термічної міцності ізоляції є ключовим та визначальним для забезпечення надійності та довговічності їх роботи. Саме тому діагностування впродовж експлуатації та при випробуваннях стану ізоляції, перед введенням в експлуатацію, є важливим та актуальним питанням.

Існує багато методів та способів діагностування стану ізоляції обмотки статора: за допомогою мегаомметрів різних типів та номінальної напруги, випробування короткими високовольтними імпульсами та інші. Одним з нових та сучасних підходів є визначення частотних параметрів обмотки машини, яку діагностують. Такий спосіб має ряд суттєвих переваг, а саме: низька напруга живлення, що подається на обмотку, низька потужність високочастотного генератора, висока чутливість та можливості регулювання, можливість виявлення міжвиткових замикань та інших локальних дефектів на ранньому етапі їх розвитку. Практична реалізація такого способу стала можливою завдяки стрімкому розвитку сучасної електроніки та обчислювальної техніки, завдяки чому є можливим не тільки проведення, а і обробка результатів дослідження, та виведення користувачу у зручному форматі готового результату на дисплей у вигляді тексту та графіків або на комп'ютер.

З розвитком промислової електроніки постійно зростає присутність електроприводів з живленням двигуна від перетворювача частоти. При цьому на відміну від мережі більшість таких перетворювачів на виході видають широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) з певною високою частотою (може бути десятки

кілогерц). Враховуючи це для достовірного моделювання електричних перехідних процесів в такому випадку необхідно використовувати високочастотну схему заміщення обмотки АД з урахуванням всіх її параметрів.

Тому метою даної роботи є дослідження частотних характеристик трифазних асинхронних двигунів загальнопромислового виконання з багатовитковими обмотками та визначення або уточнення параметрів високочастотної схеми заміщення з метою використання отриманих результатів в подальшому для побудови більш точної ВЧ моделі двигуна. Для досягнення даної мети буде використано загальні положення з теоретичних основ електротехніки, математичне моделювання за допомогою сучасного пакету програм MATLAB та експериментальні дослідження. Для оцінки правильності отриманих результатів буде здійснено порівняння даних отриманих різними шляхами.

Мета роботи: Уточнення високочастотних параметрів асинхронного двигуна 4А80А4 з врахуванням залежності їх значення від частоти, а також врахуванням міжфазних параметрів.

Цілі роботи: Зробити аналітичний огляд літератури по даній тематиці. Провести розрахунок частотних характеристик обмотки за різних схем з'єднання та підключення. Експериментально дослідити залежність повного опору від частоти для схеми під'єднання до початку фази і нейтралі та початку фази і корпусу.

Шляхи реалізації: Використання як вітчизняних так і закордонних літературних джерел. Проведення розрахунку відомими методами та формулами з теоретичних основ електротехніки. Експериментальні дослідження з використанням сучасного вимірювального обладнання, такого як двоканальний портативний цифровий осцилограф з вбудованим генератором сигналів. Створення пристрою для автоматичного вимірювання залежності повного опору від частоти.

I. ЧАСТОТНІ ПАРАМЕТРИ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

У даному розділі буде розглянуто основні теоретичні питання пов'язані з процесами, що відбуваються при живленні обмотки електричної машини змінною напругою високої частоти за різних варіантів підключення до генератора та різних параметрів і стану ізоляції. Також увагу буде приділено існуючим приладам для проведення високочастотних досліджень.

1.1. Частотні параметри довгої лінії

З теоретичної точки зору будь-яке електричне коло є колом з розподіленими параметрами. Але необхідність його розрахунку і аналізу саме як кола з розподіленими параметрами, а не з зосередженими виникає лише за певних умов. Для цього необхідно, щоб були наявні та мали суттєві значення як повздовжні опори, так і поперечні активна та реактивна провідності. При цьому їх значення мають або рівномірно (однорідні лінії), або нерівномірно (неоднорідні) бути розподілені вздовж довжини лінії. Під цей опис підходять довгі лінії електропередачі, довжина яких може складати десятки кілометрів та лінії зв'язку, частота напруги у яких може вимірюватись у мегагерцах.

Через наявність вздовж довгої лінії рівномірно розподілених активної провідності G_0 та ємності C_0 напруга на виході лінії U_2 буде нижчою за напругу на вході U_1 і окрім того буде мати певний кут зсуву за фазою по відношенню до вхідної. Окрім поперечних параметрів наявні також і повздовжні параметри R_0 та L_0 які впливають на значення струму на виході лінії I_2 .

Довгу лінію з наявними всіма описаними вище розподіленими по довжині параметрами та суттєвим впливом кожного з них на вторинні параметри не можна замінити одною ланкою у вигляді П-подібної або Т-подібної схеми заміщення. Це пов'язано з відмінністю процесів, що відбуваються у ній при її живленні та відповідно іншими математичними рівняннями, які описують її поведінку. У реальних довгих лініях можуть спостерігатись багато резонансів струму та напруги на різних частотах, тоді як у випадку з одноланковою схемою може бути лише один резонанс напруги та один резонанс струму. Чим більше

ланок у схемі заміщення довгої лінії, тим більше її характеристики відповідають реальній лінії. Для кожного окремого випадку є певна кількість ланок, після якої подальше збільшення кількості призводить до нехтовно малих змін та немає практичного сенсу. Вибір кількості ланок залежить від конкретного електричного кола та поставленої задачі.

Варто відзначити, що не кожне електричне коло має такі властивості. До прикладу всипні обмотки більшості електричних машин малої потужності як правило не мають явно виражених декількох резонансів з поступовим затуханням їх амплітуди по мірі збільшення частоти. Тому частину обмоток з достатньою точністю можна замінити і одноланковою схемою заміщення, що і роблять у багатьох практичних дослідженнях при моделюванні та розрахунках параметрів обмотки. При цьому за необхідності врахувати вплив додаткових виникаючих резонансів використовують додавання у схему заміщення додаткових RLC ланцюгів зі своєю резонансною частотою, які допомагають уточнити модель та зробити більш наближеною до реальної обмотки при живленні напругою високої частоти.

Основні формули для розрахунку основних величин, що характеризують довгу лінію наведені нижче.

Коефіцієнт поширення

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$$

де $\underline{Z}_0$ – комплексний опір лінії, $\underline{Y}_0$ – комплексна провідність лінії, α – коефіцієнт загасання (характеризує зменшення за амплітудою синусоїдної величини), β – коефіцієнт фази, який характеризує зміну за фазою.

Хвильовий опір

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{\gamma}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$$

Якщо однорідну лінію розглядати як чотириполюсник, то його характеристичний опір дорівнює хвильовому опорі лінії. Хвильовий опір $\underline{Z}_c$ і

коефіцієнт поширення $\underline{\gamma}$ називаються вторинними параметрами лінії, оскільки вони визначаються через первинні параметри лінії.[2]

Вхідний опір лінії (зі споживачем $\underline{Z}_2$ у кінці лінії)

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_1} = \underline{Z}_c \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_c \operatorname{tg} \gamma l}{\underline{Z}_2 \operatorname{tg} \gamma l + \underline{Z}_c}$$

Опір за режиму неробочого ходу ($\underline{Z}_2 = \infty, I_2 = 0$)

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{\text{вх}0} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \underline{Z}_c \operatorname{cth} \gamma l = \frac{\underline{Z}_c}{\operatorname{th} \gamma l}$$

Опір при короткому замиканні лінії ($\underline{Z}_2 = 0, U_2 = 0$)

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{\text{вх}k} = \frac{U_{1k}}{I_{10k}} = \underline{Z}_c \operatorname{th} \gamma l$$

Комплексні опори $\underline{Z}_0$ і $\underline{Z}_k$ можна визначити експериментально. Хвильовий опір та коефіцієнт поширення через опір НХ і КЗ

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Z}_k} \quad \operatorname{tg} \gamma l = \sqrt{\underline{Z}_k / \underline{Z}_0}$$

Кут зсуву за фазою характеристичного опору

$$\varphi_c = \frac{1}{2} (\varphi_0 + \varphi_k)$$

Первинні параметри довгої лінії виражені через вторинні (на метр довжини)

$$R_0 = Z_c (\alpha \cos \varphi_c - \beta \sin \varphi_c)$$

$$L_0 = \frac{Z_c}{\omega} (\alpha \sin \varphi_c + \beta \cos \varphi_c)$$

$$G_0 = (1/Z_c) (\alpha \cos \varphi_c + \beta \sin \varphi_c)$$

$$C_0 = (1/\omega Z_c) (\beta \cos \varphi_c - \alpha \sin \varphi_c)$$

1.2. Частотні параметри схеми заміщення обмотки електричних машин

Основними величинами, які визначаються при знятті частотної характеристики машини є значення резонансної частоти та значення повного опору при цій частоті. Значення резонансної частоти залежить від співвідношення загальних індуктивного опору розсіювання і ємності обмотки до корпусу, при яких їх реактивні опори будуть рівні за модулем та протилежні за знаком. Значення повного опору у цій точці залежить від величини активних

повздовжніх та поперечних опорів. При резонансі напруги для схеми під'єднання до початку фази та корпусу (схема ХХ) повний опір за резонансної частоти буде знижуватись до певного мінімального значення, а при резонансі струму для схеми з під'єднанням до початку та нейтралі (схема КЗ) буде прямувати до певного максимального значення та визначати величину повздовжнього активного опору пов'язаного з втратами в сталі (чим більший активний опір, тим більшим буде повний).

Таким чином можна побачити і зрозуміти, що отримавши частотну характеристику реальної машини, з неї можна шляхом проведення розрахунків дістати основні параметри її схеми заміщення. І навпаки знаючи всі параметри схеми заміщення обмотки можна розрахувати і побудувати частотну характеристику.

1.2.1. Багатоланкова схема заміщення

В цілому, як було описано раніше, електричні кола можна поділити на кола з зосередженими та розподіленим параметрами. Кола з зосередженими параметрами можна замінити простою еквівалентною схемою заміщення утвореною з окремих зосереджених активних та реактивних елементів з'єднаних між собою. Проте існують приклади, коли параметри не концентруються окремо у певних ділянках, а розподілені по довжини провідної частини. Тому у таких випадках для певних усталених режимів при якійсь одній відомій частоті можна здійснити заміну на еквівалентне коло з зосередженими параметрами. Але при дослідженні перехідних процесів, або при зміні частоти напруги живлення, для отримання високого рівня відповідності реальним процесам необхідно використовувати багатоланкову схему заміщення.

На відміну від одноланкової схеми багатоланкова може мати декілька резонансних частот кількість яких залежить від кількості ланок. Така схема заміщення може бути використана і для обмоток електричних машин. У такому випадку кількість ланок буде відповідати кількості секцій, а кожна з них в свою чергу буде пасивним чотириполюсником з П-подібною схемою заміщення з

значенням кожного параметру, що дорівнює цьому параметру для всієї фази поділеному на кількість ланок або секцій.

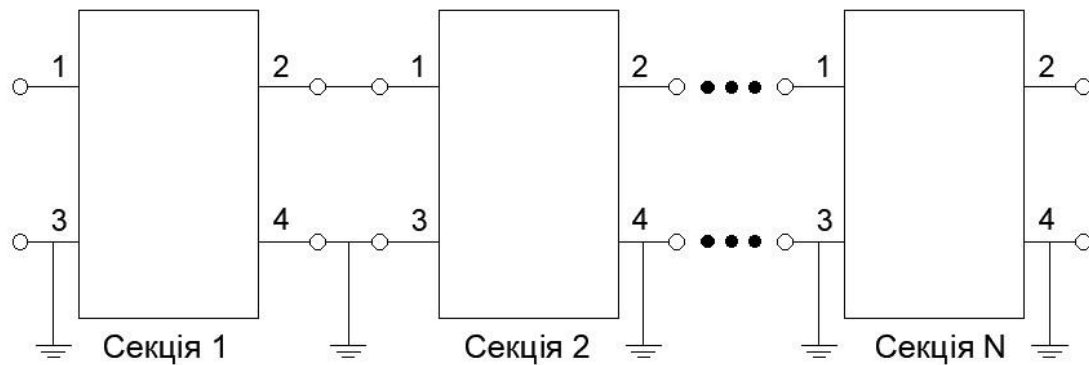


Рисунок 1.1 – Багатоланкова схема заміщення фази.

Для багатоланкових схем заміщення обмотки асинхронного двигуна кількість ланок залежить від кількості секцій (котушок) у обмотці. Пороте необхідно враховувати, що між самими секціями можуть бути взаємні індуктивності та ємності, які на практиці дуже суттєво впливають на зміну частотних характеристик. Особливо ця неточність багатоланкової моделі при нехтуванні зв'язками між секціями проявляється при моделюванні дефектів та порівнянні з отриманими експериментальними результатами. Для оцінки впливу зміни кількості ланок на частотні характеристики було побудовано графіки на рис. 1.2.

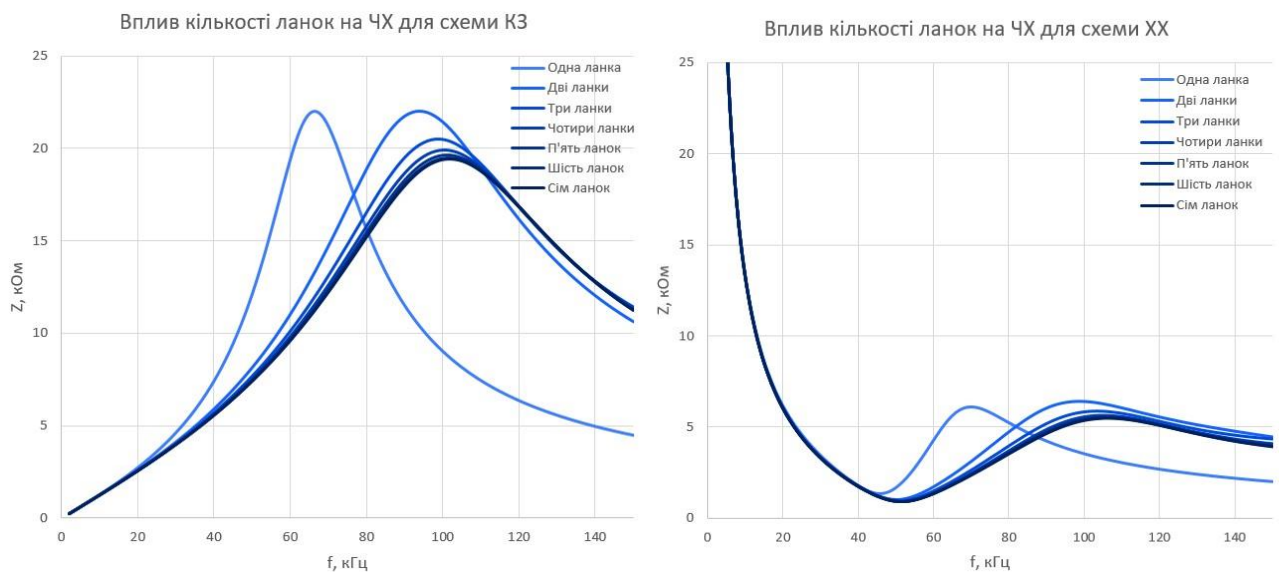


Рисунок 1.2 – Частотні характеристики при однакових значеннях всіх параметрів фази та різних кількості ланок.

1.2.2 Параметри ланки схеми заміщення у вигляді чотирьох полюсника

З теоретичних основ електротехніки відомо, що існують пасивні і активні чотирьохполюсники. Для заміщення та аналізу багатовиткових обмоток асинхронних двигунів використовується пасивний чотирьохполюсник як правило з П-подібною еквівалентною схемою заміщення внутрішнього електричного кола. При цьому одна котушка у фазі приймається колом з зосередженими параметрами, а всі параметри для кожного окремого витка замінюються одним еквівалентним параметром для всіх витків.

У схемах заміщення АД з загального курсу електричних машин як правило не вказуються і не розглядаються ємності через їх нехтовно малий вплив за промислової частоти. Але при живленні обмотки напругою високої частоти (до сотень кілогерц) ємність обмотки до корпусу має вирішальне значення. Через це з'являється необхідність визначення її величини. Окрім того частково також впливає на перебіг процесів і повздовжня ємність, що утворюється за рахунок ємності між витками однієї котушки. Детальніше розрахунок та зміну в залежності від частоти кожного параметру буде описано далі.

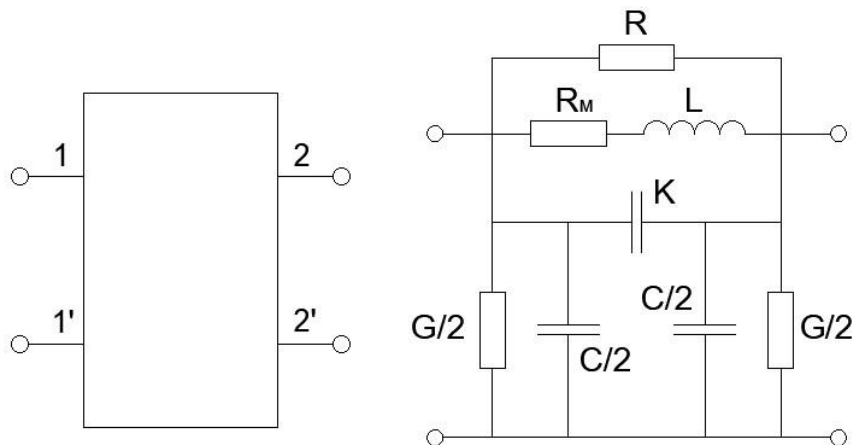


Рисунок 1.3 – Одна секція фази у вигляді чотирьохполюсника з П-подібною схемою заміщення.[3]

Попереочною активною провідністю G за нормального стану ізоляція можна знехтувати через дуже великий активний опір між фазою та корпусом. Також у певних випадках для багатовиткових виспних обмоток з круглого проводу можна не враховувати і повздовжню ємність K через її значно нижче значення у порівнянні з поперечною C .

Активний опір обмотки R_m з урахуванням ефекту витіснення струму

Активний опір обмотки постійному струму (омічний) визначається матеріалом провідника (його електропровідністю), геометрією та його температурою. Зміну опору через зміну температури можна врахувати температурним коефіцієнтом опору для даного матеріалу, або наскільки змінюється провідність при зміні температури на 1°C .

Таке визначення опору можливе для кіл постійного струму, але для кіл змінного струму, особливо високої частоти, з'являється ще одна річ, що суттєво впливає на значення опору, а саме явище витіснення струму. Для кіл промислової частоти коли поперечний перетин провідника є незначний струм проникає на всю глибину, і впливом цього ефекту можна знехтувати. Але за великих перетинів проводу, або за підвищених частот він має дуже суттєвий вплив, і при частотах сотні кілогерц фактично струм проходить лише по поверхні проводу обмотки. Опір для таких значень частоти майже повністю визначається провідністю поверхневого шару певної товщини, і може бути дуже суттєво вищим омічного.

Значення активної складової повного опору можна визначити або експериментально безпосередньо з отриманих частотних характеристик, або розрахувати теоретично за умови, що відомі всі необхідні обмотувальні дані. Зробити це можна за наступною формулою:

$$R_m = \frac{\rho_m \cdot L_1}{\left(\pi \cdot \left(\frac{d_{г.п}}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_{г.п}}{2} - \delta \right)^2 \right)}$$

де – L_1 довжина фази обмотки; ρ_m – питомий опір міді, $d_{г.п}$ – діаметр проводу без ізоляції.

Глибина проникнення струму:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу провідника (для міді $0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), μ – відносна магнітна проникність матеріалу провідника, ω – кутова частота струму $\omega = 2\pi f$.

Ця формула для визначення опору працює тільки якщо глибина проникнення менше за радіус провідника. Для тих частот, на яких вона більше за радіус активний опір такий самий, як для постійного струму. Відповідно до цих формул можна побудувати графік залежності активного опору від частоти для круглого проводу різного діаметру на 100 метрів довжини, який наведено на рис. 1.4.

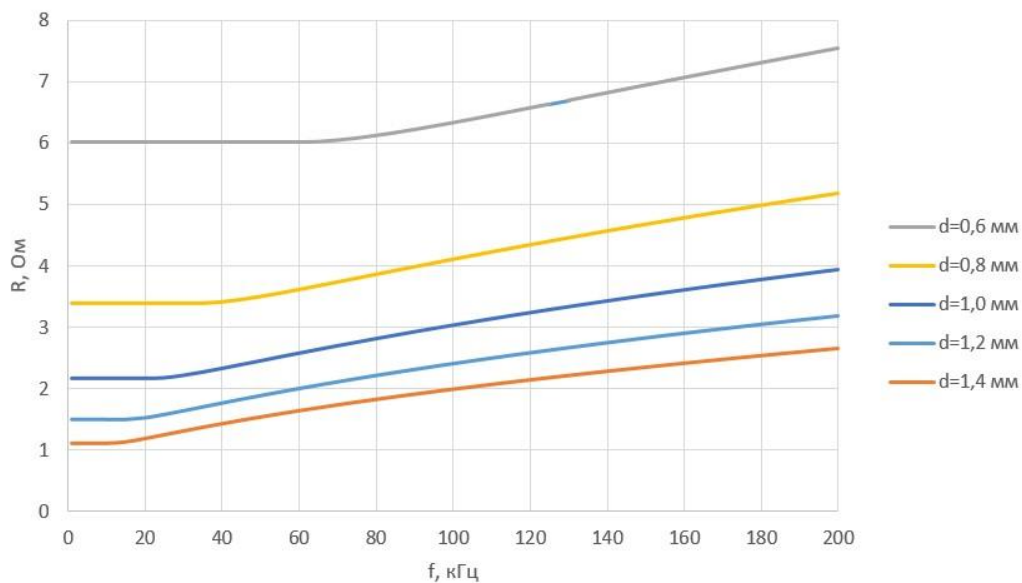


Рисунок 1.4 – Залежність активного опору від частоти та діаметру провідника.

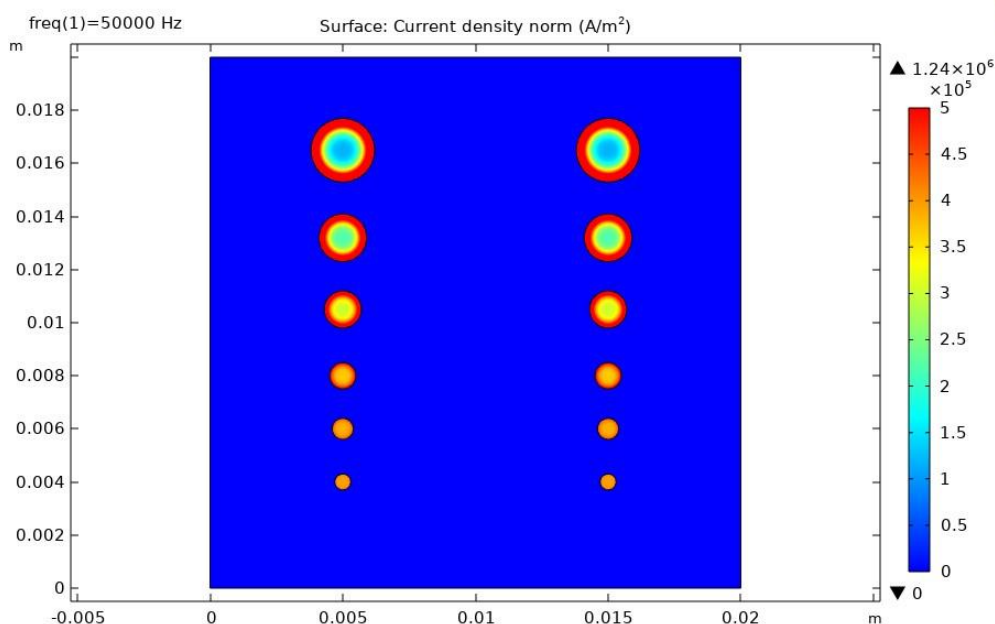


Рисунок 1.5 – Розподіл щільності струму у провідниках різного діаметру при частоті 50 кГц.

Окрім цього як було зазначено раніше на значення опору впливає температура. У багатьох випадках для більш простих та практичних експериментів і досліджень цим можна знехтувати через несуттєву величину утвореної похибки за кімнатних значень температури. Але при суттєвій зміні температури навколишнього середовища чи обмотки розрахувати зміну опору можна за формулою, наведеною нижче.

$$R_{\theta} = R_{25^{\circ}}(1 + a \cdot (\theta - 25))$$

де R_{θ} – невідомий опір за необхідної температури, $R_{25^{\circ}}$ – опір при температурі навколишнього середовища 25°C , θ – температура, до якої треба привести опір, a – температурний коефіцієнт опору (для міді 0,0043).

Повздовжній активний опір R пов'язаний з втратами у сталі

Даний параметр суттєво впливає на вигляд частотної характеристики у діапазоні частот близьких до резонансної і частково впливає на інших частотах. Повний опір при резонансі майже повністю дорівнює R. Він суттєво залежить від частоти, в основному через ефект витіснення струму. Для більш точних розрахунків та побудови точнішої моделі необхідно враховувати цю залежність. Наближений її вигляд зображено рис. 1.6. Втрати на гістерезис або перемагнічування оцінити важко, бо струми що протікають через обмотку та відповідно магнітні потоки і індукція на такій частоті дуже малі. Через це в певному наближенні впливом цих втрат можна знехтувати.

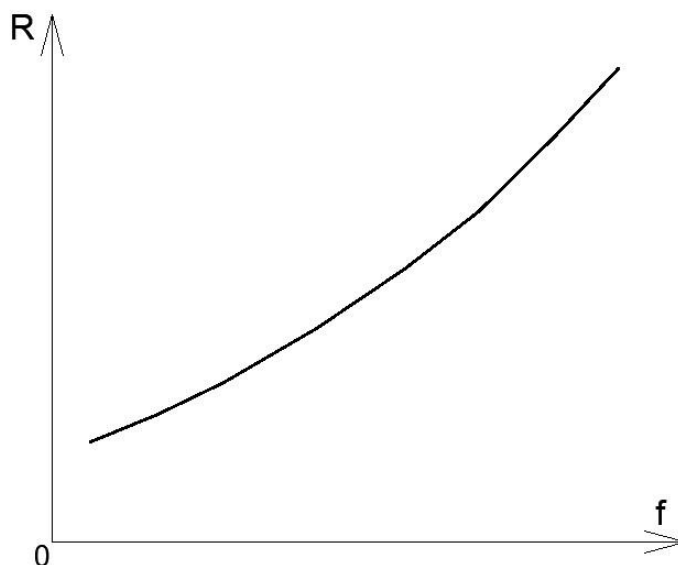


Рисунок 1.6 – Залежність параметру R від частоти.

Індуктивність розсіювання обмотки при високих частотах

Значення індуктивного опору розсіювання для обмоток статорів двигунів серії 4А відомі та їх можна знайти у довідниках [4]. Але ці значення відповідають лише частоті 50 герц. Для інших значень частот розрахунок потрібно проводити окремо. Варто зазначити, що за інформацією з літератури [5] індуктивність розсіювання асинхронних двигунів малої потужності з висипною обмоткою знижується при підвищенні частоти. Це пов'язано з зниженням відповідних потоків розсіювання, які замикаються на ротор та стінки пазу. Умовно можна уявити, що при високих частотах потік розсіювання замикається майже повністю у провіднику та майже не відгладжується у електротехнічну сталь статора і ротора. Окрім того змінюється також і взаємодія між сусідніми провідниками у одному пази. З експериментальних досліджень було отримано наступний загальний вигляд залежності індуктивності від частоти на рис. 1.7.

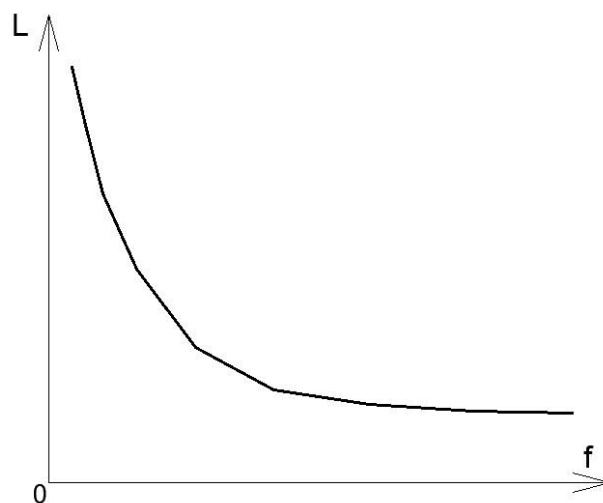


Рисунок 1.7 – Залежність індуктивності обмотки L від частоти.

Відповідно до цього можуть бути декілька підходів до визначення індуктивності розсіювання обмотки. Перший варіант, це експериментальним шляхом подаючи на обмотку напругу амплітудою 5-10 В та частотою десятки кілогерц. Для визначення індуктивності цим способом необхідно знайти резонансну частоту обмотки, з якої розрахувати індуктивність, а потім додати паралельно додатковий конденсатор для того, що посунути точку резонансну у бік нижчих частот. Таким чином можна отримати декілька значень індуктивності для різних частот.

Другий шлях полягає у використанні існуючих у літературі залежностей індуктивності обмотки від частоти. Спочатку проводиться розрахунок для частоти 50 Герц, а після цього за відповідними графіками відбувається перерахунок для потрібної частоти.

Третій найскладніший спосіб, це проведення повноцінного розрахунку магнітного кола у зубцевій зоні, і за отриманим значенням сумарного потоку визначати індуктивності розсіювання обмотки. Проводити розрахунок цим способом може бути зручно лише з використанням обчислювальної техніки та спеціальних програм для моделювання магнітних полів. У даній роботі цей спосіб розглядатись не буде.

Об'ємна ємність трифазної обмотки до корпусу.

Значення ємності до корпусу обмотки електричної машини залежить від декількох складових, а саме від ємності між провідниками, що прилягають до стінок пазу і внутрішньою поверхнею пазу, ємність через повітряний проміжок до поверхні ротора, ємність лобової частини до корпусу. Найвагомішою складовою є перша складова, яку для спрощення опису можна назвати пазова ємність до корпусу.

Ємність між внутрішніми стінками пазу та провідниками розташованими вздовж стінок залежить від площі поверхні бічних та нижньої сторін пазу та від товщини і діелектричної проникності корпусної ізоляції між цими двома поверхнями. Окрім того необхідно враховувати нерівність поверхні обкладинки, що відповідає провідникам, які мають круглий перетин. Враховуючи все це наближено ємність фази до корпусу можна розрахувати за формулою:

$$C_{\phi} = k_2 \frac{Z_1}{6} C_c$$
$$C_c = \frac{2 \cdot \epsilon_0 \epsilon_r S_{\text{пов.п}}}{d_{\text{із}} k_{\text{зб.від}} k_{\text{зм.е}}} \cdot k_{\text{дод.ем}}$$

де C_c – ємність однієї секції до корпусу, Z_1 – кількість зубців статора, k_2 – коефіцієнт, який враховує відкриття пазу, ϵ_0 , ϵ_r – діелектричні проникності повітря та пазової ізоляції відповідно, $S_{\text{пов.п}}$ – площа внутрішньої поверхні пазу,

яка контактує з провідниками, d_{iz} – товщина корпусної ізоляції, $k_{зб.від}$ – коефіцієнт збільшення відстані між пазовою частиною котушок і стінками пазу пов'язаний з нерівністю поверхні через круглий перетин провідників, $k_{дод.ем}$ – коефіцієнт збільшення ємності від лобових частин та ротора.

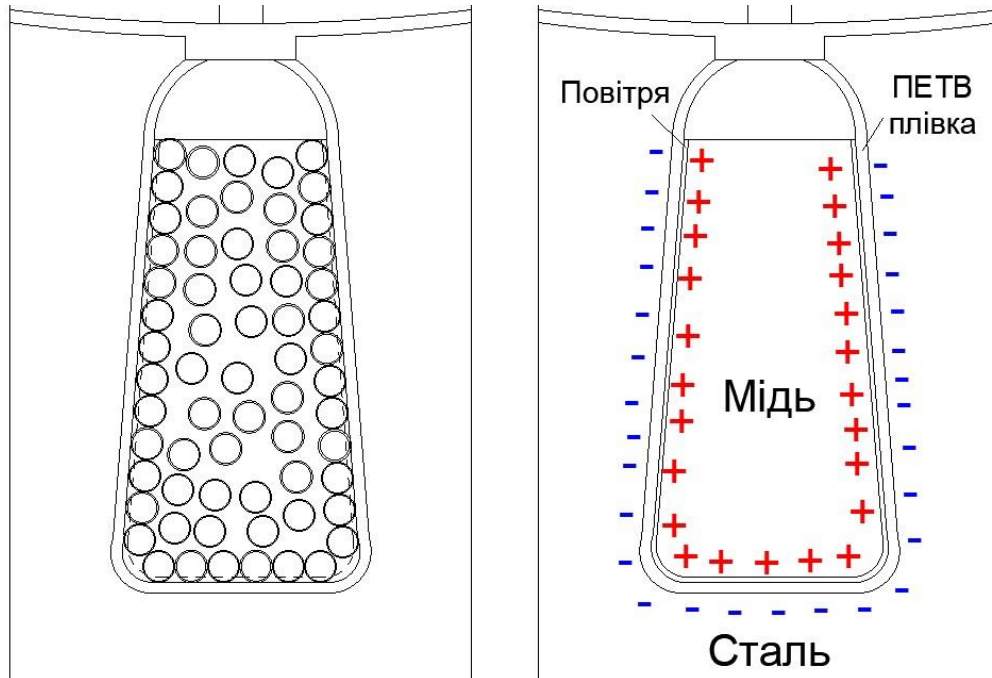


Рисунок 1.8 – Пазова ємність обмотки для одного паза.

Ємність між ротором та ємність лобових частин є значно меншими, тому їх можна врахувати для розрахунку загальної ємності однієї фази певними коефіцієнтами збільшення ємності. При цьому ємності у лобових частинах відповідають міжфазним, та у випадку з'єднання фаз паралельно вони замикаються накоротко та ємність фази до корпусу зменшується.

На відміну від двох попередніх параметрів ємність майже не змінюється при зміні частоти. Але залишається вплив на значення ємності температури та вологості. Через те, що при нагріванні відбувається теплове розширення та зміна стану ізоляції ємність також змінюється. При цьому від значення цього параметру резонансна частота залежить, і тому при суттєвих змінах умов навколишнього середовища це необхідно враховувати для проведення більш точного розрахунку.

1.3. Частотні залежності одноланкової і багатоланкової схеми заміщення при інтегральній і локальній зміні параметрів

Обмотку статора асинхронного двигуна з КЗ ротором можна представити у вигляді одноланкової високочастотної схеми заміщення та багатоланкової. При цьому відмінність буде полягати у точності та відповідності моделі реальному двигуну. Як показали практичні дослідження без врахування взаємної індуктивності між секціями одної фази багатоланкова схема заміщення суттєво відрізняється від реальної обмотки при наявності дефектів. Тому було прийнято рішення використовувати одноланкову схему.

Багатоланкова схема заміщення складається з певної кількості пасивних чотиріполюсників. Одна з переваг, це можливість вимірювати струм та напругу у кожній секції окремо. Багатоланкову схему заміщення зображено на рис. 1.1.

Одноланкова схема заміщення зображена вище на рис. 1.1. Але враховуючи несуттєвий вплив активного опору обмотки R_m , активної провідності G та повздовжньої ємності K можна її спростити до вигляду на рис. 1.9. Ця схема заміщення з достатньою точністю моделює реальну обмотку, але не враховує залежність від частоти частини параметрів. Окрім того у такій схемі заміщення не враховано індуктивні та ємнісні зв'язки з іншими фазами, через що за допомогою неї можна отримувати достовірні частотні характеристики тільки при підключеній одній фазі.

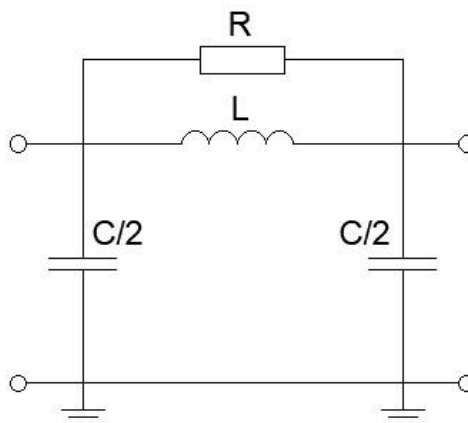


Рисунок 1.9 – Одноланкова схема заміщення.

Однією з потенційних можливостей, яку надають отримані частотні характеристики є можливість діагностування стану ізоляції обмотки та

виявлення дефектів не розбираючи машину та без під'єднання до мережі. Тому важливим є розуміти, як саме зміна стану обмотки впливає на параметри, та як зміна параметрів впливає на частотні характеристики, а саме на скільки змінюється резонансна частота та значення повного опору. Від цього залежить в тому числі формування подальших вимог до необхідної точності проведення вимірювань для перевірки на наявність дефектів.

При наявності коротко замкнутої однієї або декількох секцій частотні характеристики змінюються суттєво, що проілюстровано на рис. 1.8. Але варто відміти що подібні серйозні дефекти можна виявити і звичайними вимірювальними приладами без зняття частотних характеристик. Наприклад за допомогою мультиметра можна виміряти опори всіх фаз, і при наявності коротко замкнутих секцій опір пошкодженої фази буде суттєво відрізнятися від цілих. Так само можна виявити і замикання на корпус та обриви.

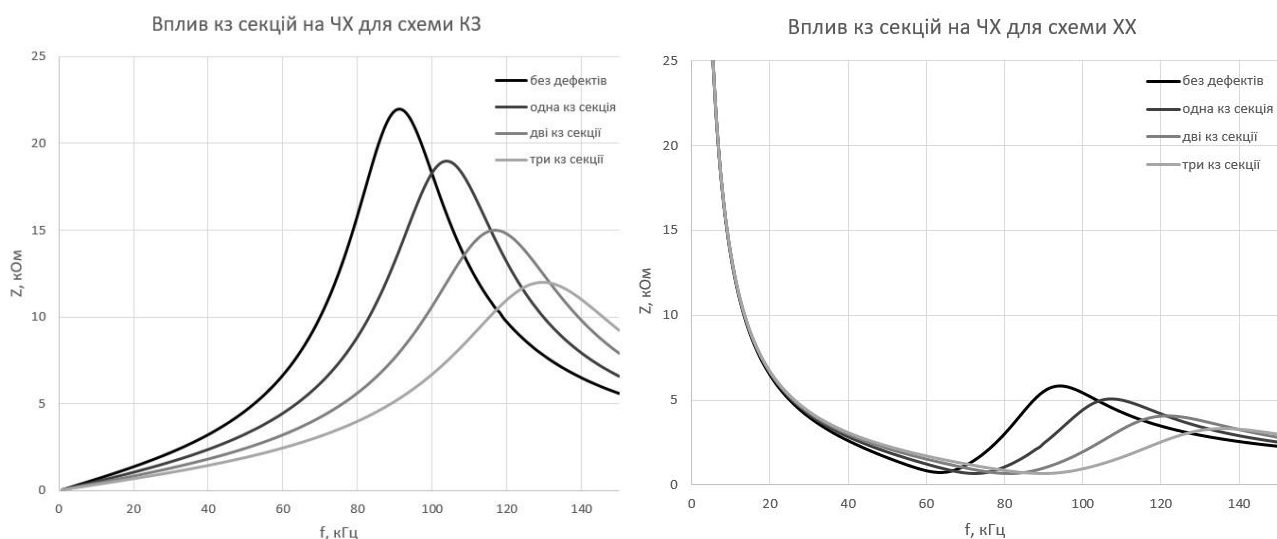


Рисунок 1.10 – Частотні характеристики за різного стану обмотки ($N=6$).

Проте є такі дефекти, які не можна виявити звичайними більш простими методами. При їх наявності двигун може працювати і навіть майже не мати ніяких відхилень енергетичних показників від номінальних. Але з часом вони можуть розвинутих і стати причиною більш серйозних пошкоджень та навіть виходу з ладу обладнання. Одним з прикладів є виткові замикання. Зміну частотних характеристик при зміні кількості КЗ витків зображено на рис. 1.11. З цієї залежності можна зробити висновок, що при наявності достатньо точного обладнання, можливо виявити виткові замикання у обмотках АД.

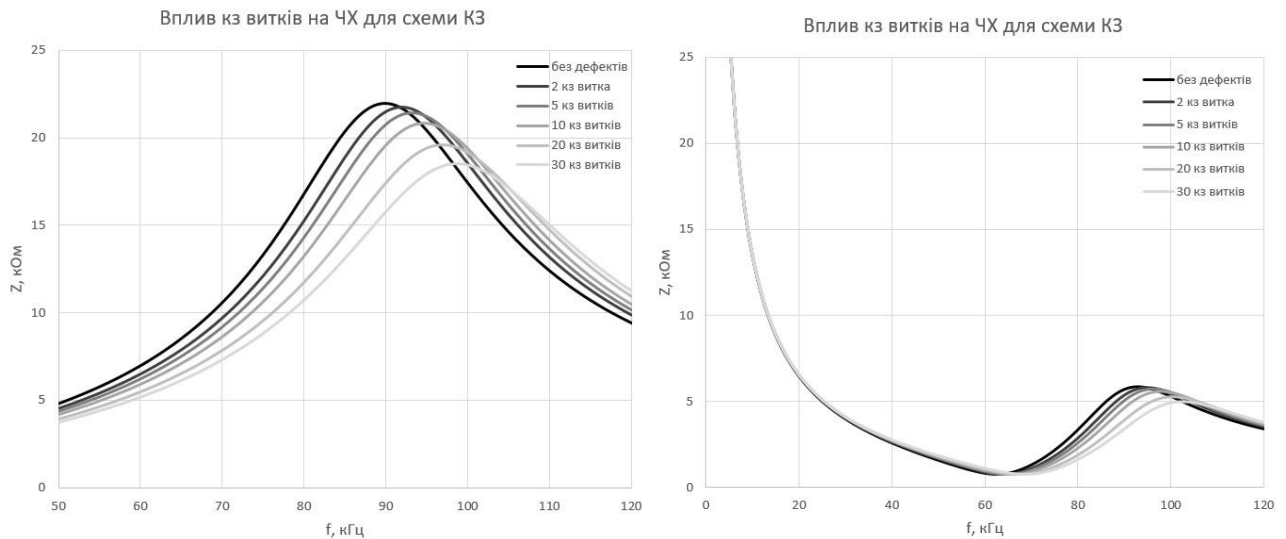


Рисунок 1.11 – Частотні характеристики при наявності виткових замикань (кількість провідників у пазу 60, $N=6$).

На сучасному етапі розвитку цифрової електроніки та обчислювальної техніки є можливим створення таких приладів, які дозволяють з дуже високою точністю проводити такі вимірювання. Окрім того за допомогою них можна отримувати не просто залежність повного опору від частоти, а і здійснювати порівняння з очікуваними значеннями та одразу виводити користувачу у зручному вигляді багато різної корисної інформації. Такий підхід потенційно може суттєво спростити та пришвидшити процес діагностування різного електротехнічного обладнання де використовуються багатовиткові обмотки.

1.4. Вимірювання високочастотних параметрів за допомогою спеціалізованого обладнання

Наразі на ринку вимірювальної техніки представлено багато так званих LCR-метрів дуже різної цінової категорії та різних класів точності та діапазонів частот і вимірюваних величин. Майже всі вони є цифровими. Існують прилади які можуть просто вимірювати значення активного опору та ємності і індуктивності для якоїсь одної частоти. Окрім цього існують і такі, які можуть вимірювати параметри R , L , C та Z для декількох значень частоти, а також можуть визначати різні вторинні параметри. А існують і такі, які можуть визначати параметри для певного діапазону частот з певним кроком та навіть автоматично будувати залежність Z від f . Далі буде наведено декілька прикладів таких цифрових приладів. Також такі більш складні прилади називають аналізаторами імпедансу.

Вимірювач LCR ET432

Даний пристрій є портативним компактним простим у використанні вимірювачем параметрів різних електронних і не тільки компонентів та обладнання. Його найвища частота вимірювання становить 100 кГц. Також є можливість ступінчастого регулювання напруги вимірювання (середньоквадратичне значення 1 В, 0,6 В, 0,3 В, 0,1 В). Він може вимірювати повний опір Z та кут зсуву за фазою θ , що дуже важливо саме для дослідження частотних характеристик. Загальні характеристики приладу наведені нижче.[6]

- Частота вимірювання: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 40 кГц, 100 кГц.
- Базова точність 0,3 %.
- Головні вимірювані параметри: L/C/R/Z
- Вторинні вимірювані параметри: X/D/Q/ θ /ESR
- Діапазон вимірювань: L: 0,000мкГн – 2000Гн, C: 0,000пФ – 20,000мФ, R: 0,0001Ом – 20 МОм.
- Напруга вимірювання: 1 В, 0,6 В, 0,3 В, 0,1 В (діюче значення).

Вимірювач LCR GW Instek LCR-821

Серія LCR-800 – це високоякісні цифрові вимірювачі LCR для перевірки різних компонентів, а також може бути застосований для різної науково-дослідної діяльності. Може вимірювати та виводити на екран пов'язані параметри, такі як R/Q, C/D, C/R, L/Q, L/R, Z/ θ . Максимальна частота вимірювання 200 кГц.[7]

- Діапазон частоти вимірювання: 12 Гц – 200 кГц (кількість кроків 504).
- Базова точність: 0,05 %.
- Швидкість вимірювання: 68 мс.
- Рівень напруги тестування: 5 мВ – 1,275 В (крок 5 мВ).
- Діапазони вимірювання: R: 0,00001Ом – 99999кОм; C: 0,00001пФ – 99999мкФ; L: 0,00001мГн – 99999Гн; Q: 0,0001 – 9999; D: 0,0001 – 9999; |Z|: 0,00001Ом – 99999кОм; θ : -180,00° – 180,00°.
- Режими вимірювання: R/Q, C/D, C/R, L/Q, L/R, Z/ θ .

Вимірювач-аналізатор імпедансу Hioki IM3570

Даний прилад поєднує у собі багато різних функцій та режимів вимірювання у одному корпусі та замінює вимірювальний комплекс для високочастотних досліджень обладнання.[8] В тому числі він та інші подібні прилади використовуються для зняття частотних характеристик обмоток асинхронних двигунів загальнопромислового виконання [9,10,11,12,13,14]. Його перевагою є дуже широкий діапазон частот вимірювання, прецизійна точність та можливість побудови залежності повного опору Z від частоти з високою швидкістю.

- Частота вимірювання: від 4 Гц до 5 МГц (крок від 10 мГц до 100 Гц).
- Базова точність вимірювання: Z : $\pm 0,08\%$, θ : $\pm 0,05^\circ$.
- Режими вимірювання: режим LCR, режим аналізатора (розгортка з частотою вимірювання і рівень вимірювання), режим безперервного вимірювання.
- Вимірювані параметри: Z , Y , θ , R_s (ESR), R_p , R_{dc} (опір постійному струму), X , G , B , C_s , C_p , L_s , L_p , D ($\tan\delta$), Q .
- Діапазон зміни напруги тестування: від 50 мВ до 5 В, крок 1 мВ (до 1 МГц), від 10 мВ до 1 В, крок 1 мВ (більше 1 МГц).



Рисунок 1.12 – Приклади існуючих цифрових вимірювачів LCR.

1.5. Висновки

Схема заміщення складається з повздовжніх і поперечних R , L , C параметрів, частину з яких можна вважати умовно не залежними від частоти, а частину залежними. Найбільше впливають на частотні характеристики залежності від частоти індуктивності розсіювання обмотки та активного опору пов'язаного із втратами в сталі.

За допомогою частотних характеристик можна виявляти як локальні, так і інтегральні дефекти ізоляції. Можна отримувати інформацію не тільки про тип дефекту, а і в певних випадках місце розташування та іншу інформацію, таку як кількість короткозамкнених витків, значення опору до корпусу пошкодженої ділянки.

Визначення параметрів обмотки є складною задачею і теоретично розрахувати їх досить складно. Отримати справжні їх значення для конкретного двигуна теоретичним шляхом не можливо через відсутність інформації про його стан та точної геометрії обмотки, яка змінюється в певних допустимих межах у різних машин. Тому з практичної точки зору єдиним доцільним способом є зняття амплітудно та фазочастотної характеристик для схем КЗ і ХХ з подальшим розрахунком на їх основі. При цьому чим вищою є точність вимірювань (приладу), тим правильніше можна визначити ці параметри.

II. РОЗРАХУНОК ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З РІЗНОЮ СХЕМОЮ УКЛАДАННЯ ОБМОТОК

Розрахунок високочастотних процесів в обмотках електричних машин є складною та об'ємною задачею. Для проведення подібних розрахунків зручно використовувати сучасні програми за допомогою яких можна спростити та частково автоматизувати процес розрахунку. Враховуючи потребу у багато ітераційному розрахунку буде використано одну з таких програм, а саме Mathcad.

2.1. Типові варіанти обмоток асинхронних двигунів потужністю до 5.5 кВт та кількістю полюсів $2p=4$ і $2p=6$

Всипні обмотки з мідного проводу круглого перетину відрізняються кількістю пазів на полюс і фазу, кількістю пар полюсів, кількістю шарів та розташуванням у просторі лобових частин. Основні типи обмоток асинхронних двигунів за кількістю шарів у пазу поділяються на одношарові та двошарові. Бувають також і обмотки з більшою кількістю шарів у пазу, але для АД загальнопромислового виконання вони майже не застосовуються.

Одношарові обмотки можуть бути концентричними, шаблонними (або рівнокотушковими), врозвалку. Приклади одношарових чотириполюсних обмоток наведені на рис. 2.1-2.2. З точки зору високочастотних параметрів у одношарових обмоток значно нижчі значення взаємних індуктивності та ємності між фазами порівняно з двошаровими. При цьому їх значення повністю концентруються у лобових частинах та залежать від кількості пар полюсів, схеми обмотки. Для машин з кількістю полюсів $2p = 2$ характерні масивні лобові частини та велика кількість розподілених по пазах котушок у котушковій групі. Через це ємність між двома фазами такої обмотки буде більше ніж ємність аналогічної багатополюсної обмотки через більшу площу контакту між секціями різних фаз. Так само і взаємна індуктивність буде більшою. Кількість пар полюсів також за однакової кількості пазів статора суттєво впливає на взаємні індуктивності між секціями одної фази.

Окрім кількості пар полюсів на взаємні параметри також впливає і розташування лобових частин. Для однакових концентричної та обмотки врозвалку взаємні ємність та індуктивності також будуть відрізнятись через різну кількість та площу контактувань секцій різних фаз.

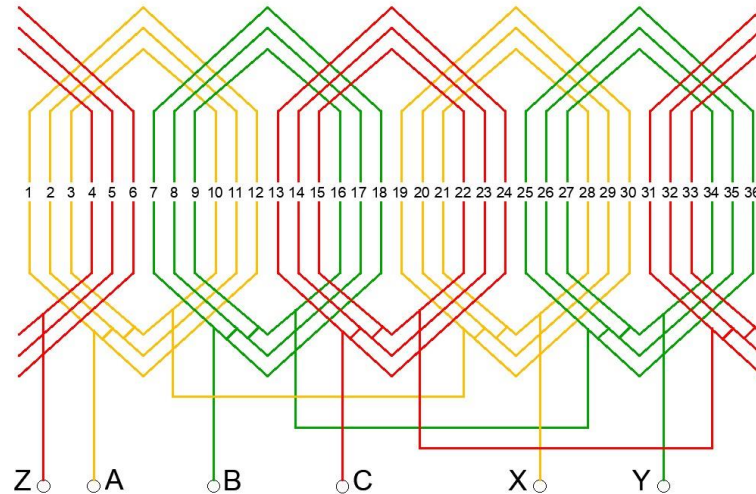


Рисунок 2.1 – Концентрична обмотка з $2p=4$. (схема для двигуна 4A80A4)[7].

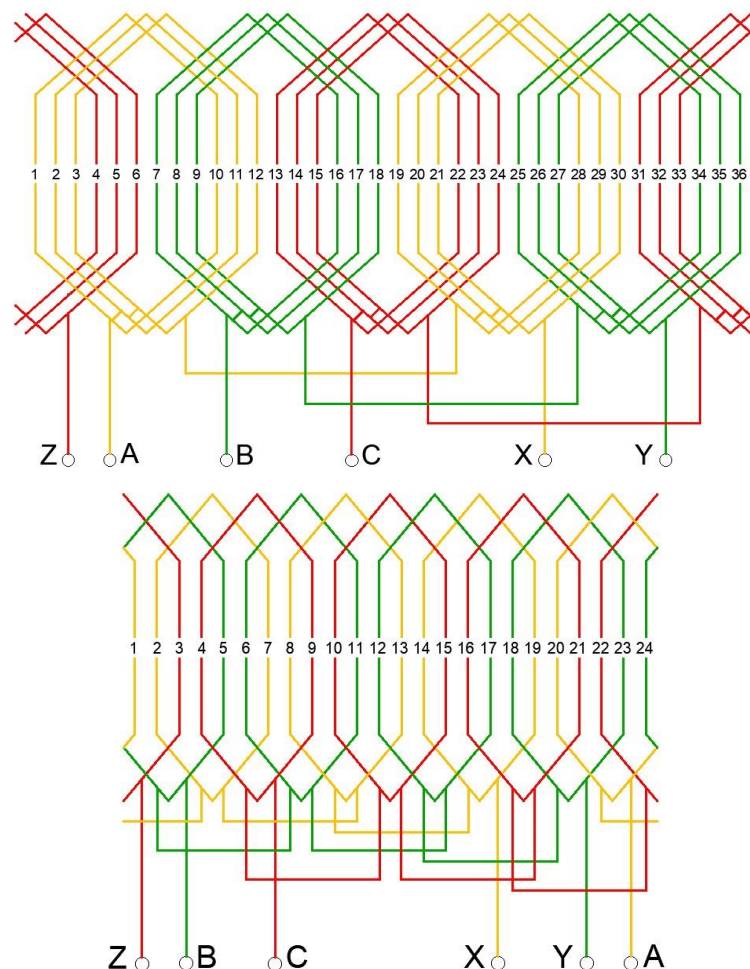


Рисунок 2.2 – Шаблонна (рівнокотушкова) обмотка та врозвалку з $2p=4$.

Двошарові обмотки застосовуються як правило у машинах потужністю від 15 кВт. Але можуть бути укладені у пази і машин меншої потужності. У цього типу обмоток з'являється можливість укорочення кроку, що позитивно впливає на форму кривої ЕРС, а саме знижуються амплітуди вищих гармонік, особливо п'ятої та сьомої. Але через це зменшується і амплітуда першої основної гармоніки, через що з'являється необхідність при розрахунках додавати коефіцієнт укорочення, який на відміну від одношарової буде менше одиниці. Приклади двошарових обмоток наведені на рис. 2.3 та 2.4.

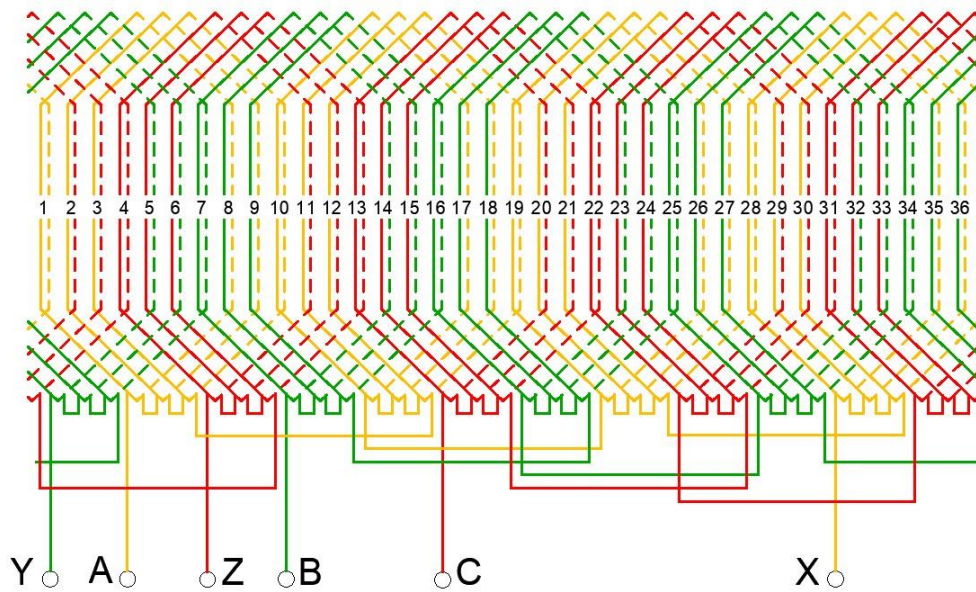


Рисунок 2.3 – Двошарова обмотка з кроком $y=7$ та $2p=4$.

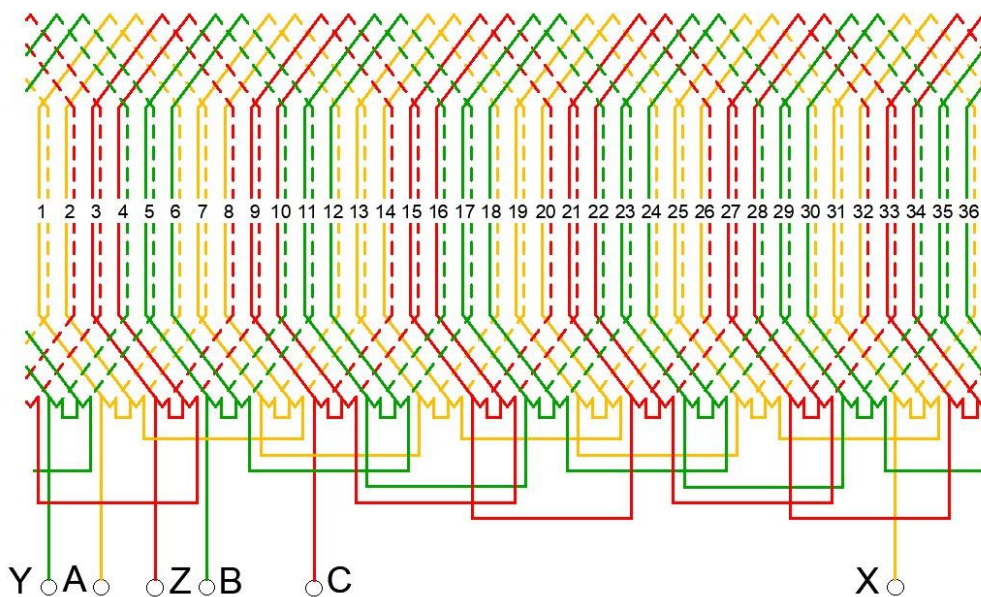


Рисунок 2.4 – Двошарова обмотка з $y=5$, $\beta=0,83$ та $2p=6$.

Порівнюючи з одношаровими є одна суттєва відмінність, це дуже великий індуктивний та ємнісний зв'язки між секціями різних фаз. Це пов'язано з розташуванням у одному пазу сторін різних секцій, через що між ними утворюється трансформаторний зв'язок. Також за рахунок щільного прилягання верхнього та нижнього шарів один до одного у пазу зростає міжфазна ємність.

Для кращого розуміння розташування обмотки у пазах також було зроблено для двошарової та одношарової обмотки з $2p=4$ поперечний переріз статора досліджуваного двигуна з укладеними у його пази двома варіантами обмотки. На рис. 2.5 та 2.6 позначені сторони котушок різних фаз та їх взаємне розташування. Також відмічені фазні зони підписами та відповідним кольоровим маркуванням.

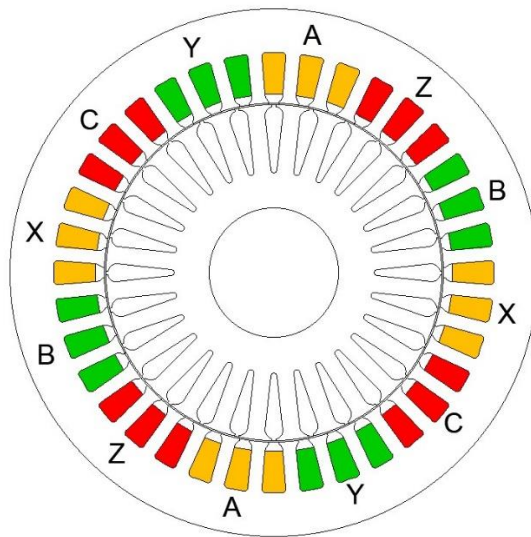


Рисунок 2.5 – Торцевий вигляд одношарової обмотки АД 4А80А4

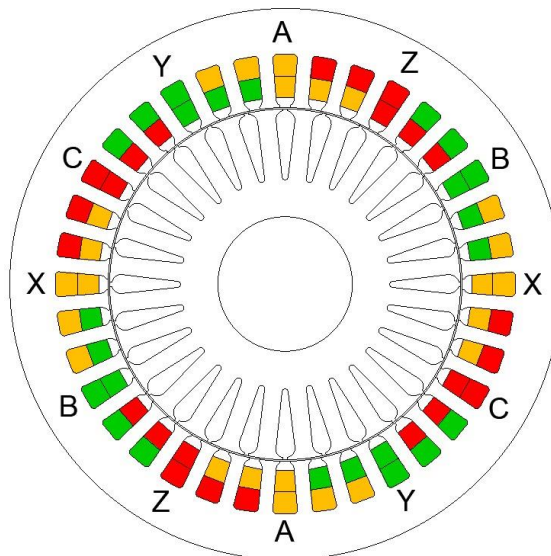


Рисунок 2.6 – Торцевий вигляд двошарової обмотки ($2p=4$).

2.2. Розрахунок високочастотних процесів у обмотці при врахуванні лише власних параметрів однієї фази

Найбільш зручною та одночасно достатньо точною є ланцюгова схема заміщення обмотки, яка складається з чотириполісників, які є П-подібними схемами заміщення кожної котушки однієї фази. Окремо ділення секції на витки не здійснюється, бо вони лежать разом у одних і тих самих пазах і у такому випадку доцільно замінити їх всіх сумарними зосередженими параметрами. Така схема заміщення обмотки зображена на рис. 1.1. П-подібна схема наведена так само у першому розділі на рис. 1.2.

Розрахунок високочастотних параметрів та частотних характеристик для двигуна 4A80A4

Довідникові дані на досліджуваний двигун 4A80A4

Для розрахунку високочастотних характеристик двигуна необхідно знати значення всіх його активних та реактивних параметрів. Для цього необхідно визначити поперечну ємність, значення індуктивності розсіювання обмотки, значення активного опору. Попереочною активною провідністю ізоляції у даному випадку можна знехтувати, так як за таких низьких значень напруги опір ізоляції буде вимірюватись у сотнях мегаомів і ніяк не буде впливати на частотні характеристики.

Щоб провести розрахунок частотних характеристик необхідно мати технічні дані двигуна з яких можна визначити частину параметрів. У даному випадку ними слугуватиме довідникова інформація на 4A80A4. У табл. 2.1 наведено вхідні номінальні параметри двигуна. Геометричні розміри активної частини та розміри пазу статора наведені у табл. 2.2. Обмотувальні дані у табл. 2.3.

Таблиця 2.1 – Номінальні дані 4A80A4.

P_{2H} , Вт	U_{1H} , В	f_H , Гц	η_H	$\cos\varphi_H$	p	m	I_{1H} , А
1100	220	50	0,75	0,81	2	3	2,74

Таблиця 2.2 – Геометричні розміри активної частини та пазу статора.

D_1 , м	l_1 , м	Z_1	b_1 , мм	b_2 , мм	$h_{п1}$, мм
0,131	0,078	36	4,4	6	12,1

Таблиця 2.3 – Обмотувальні дані.

$d_{\text{із.п}}, \text{ мм}$	$d_{\text{г.п}}, \text{ мм}$	$R_{1\phi}, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ м}$	w_1	$u_{\text{п}}$	$X'_1, \text{ в.о.}$	q
0,73	0,67	7,15	144	366	61	0,078	3

Індуктивний опір розсіювання обмотки:

$$X_1 = \frac{U_{1\text{н}}}{I_{1\text{н}}} \cdot X'_1 = \frac{220}{2,74} \cdot 0,078 = 6,255 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки для номінальної частоти:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{6,255}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,02 \text{ Гн}$$

Наведених даних буде достатньо для проведення подальшого розрахунку параметрів схеми заміщення обмотки.

Розрахунок параметрів схеми заміщення

Діапазон частот, у якому розраховується частотна характеристика

$$f_{\text{роз}} = 1000 \dots 110000 \text{ Гц}$$

Для прикладу буде наведено розрахунок для одного значення 1 кГц. Для всіх інших значень всі формули та дії будуть такими самими.

Розрахунок активних опорів

Активний опір постійному струму фази вже відомий з табл. 2.3. Тепер необхідно оцінити вплив явища витіснення струму для провідника заданого перетину. Для початку було взято частоту 40 кГц. Якщо на такій частоті глибина проникнення буде більша за радіус провідника, тоді цим явищем можна знехтувати, так як воно не суттєво буде впливати на опір лише на кінцевій ділянці частотної характеристики. Глибина проникнення струму для проводу без ізоляції діаметром 0,67 мм дорівнює

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}} \cdot \omega_{\text{Г}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,017}{1 \cdot 251327}} = 0,000368 \text{ м} = 0,368 \text{ мм}$$

$$\omega_{\text{Г}} = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 40000 = 251327$$

Таким чином можна побачити, що глибина проникнення струму на частоті 40 кГц більша за радіус провідника, а це означає що струм проникає на всю його глибину. Тому активний опір фази $R_{\text{м}}$ для всіх значень частоти приймаємо

$$R_M = R_{1\phi} = 7,15 \text{ Ом}$$

Активний повздовжній опір R пов'язаний з втратами в сталі було визначено в залежності від частоти для 4A80A4 експериментальним шляхом. При $f = 1 \text{ кГц}$

$$R = 5000 \text{ Ом}$$

Поперечним активним опором до корпусу у даному випадку можна знехтувати, так як він майже не впливає на частотні характеристики у діапазоні частот до 100 кГц .

Розрахунок реактивних опорів

Наступним кроком є розрахунок значення загальної ємності C однієї фази обмотки та визначення ємності фази до корпусу $C_{ф-к}$. Ця задача ускладнена тим, що активна частина машини має досить складну геометрію, та котушки різних фаз є на практиці не ідеально однаковими, так само як і просторове розташування їх провідників у різних пазах може відрізнятись. Тому теоретичний розрахунок ємності можна провести лише наближено для ідеалізованої обмотки з прийняттям ряду припущень. Одним з таких припущень є те, що провідники біля стінок пазу щільно прилягають до корпусної ізоляції та розташовані впритул один за одним вздовж зовнішньої поверхні котушки. Другим припущенням є рівність всіх розмірів всіх котушок обмотки.

Діелектрична проникність вакууму та відносна діелектрична проникність пазової ізоляції

$$\varepsilon_r = 2,7; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

Площа внутрішньої поверхні пазу

$$\begin{aligned} S_{\text{пов.п}} &= l_1 \cdot \left(b_2 + 2 \cdot \left(\sqrt{h_{\text{п1}}^2 + \left(\frac{b_2 - b_1}{2} \right)^2} \right) \right) \cdot 10^{-3} = \\ &= (0,078 \cdot (6 + 2 \cdot (12,13))) \cdot 10^{-3} = 0,00236 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Товщина пазової ізоляції та ряд необхідних для розрахунку коефіцієнтів

$$d_{\text{із}} = 0,00025$$

$$k_{зб.від.} = 1 + \frac{0,5d_{г.п} - \frac{0,5d_{г.п}}{\sqrt{2}}}{d_{із} \cdot 10^3} = 1 + \frac{0,5 \cdot 0,67 - \frac{0,5 \cdot 0,67}{\sqrt{2}}}{0,25} = 1,392$$

$$k_{зм.ε} = 1 + ε_r \frac{d_{із}(k_{зб.від.} - 1)}{d_{із}} = 1 + 2,7 \cdot \frac{0,00025 \cdot (1,392 - 1)}{0,00025} = 2,06$$

$$k_{дод.ε} = 1,02$$

Вище наведені відповідно коефіцієнт збільшення відстані $k_{зб.від.}$ до стінок пазу через круглу форму провідників та нерівність поверхні котушки, коефіцієнт зміни середньої діелектричної проникності ізоляції $k_{зм.ε}$ до корпусу у зв'язку з наявністю повітряних проміжків між провідниками та внутрішньою поверхнею пазу та коефіцієнт додаткової ємності $k_{дод.ε}$ від лобових частин та ротора.

Ємність однієї секції до корпусу

$$C_c = \frac{2 \cdot ε_0 ε_r S_{пов.п}}{d_{із} k_{зб.від} k_{зм.ε}} \cdot k_{дод.ε} = \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,7 \cdot 0,00236}{0,00025 \cdot 1,392 \cdot 2,06} \cdot 1,02 = 0,1604 \text{ нФ}$$

Ємність фази С дорівнює

$$C = k_2 \frac{Z_1}{6} C_c = 1,05 \cdot \frac{36}{6} \cdot 0,1604 = 1,011 \text{ нФ}$$

де k_2 – дорівнює 1,05 для машин з напівзакритими пазами.

Значення ємності фази до корпусу залежить від ємності С та величини ємності між фазами $C_{ф-ф}$. З отриманих практичним шляхом даних дорівнює

$$C_{ф-к} = 1,15 \text{ нФ}$$

Як можна побачити її величина є трохи більшою аніж ємність С за рахунок наявності додаткової ємності між фазами. Повздовжньою ємністю К через її не суттєве значення (декілька десятків пікофарад) можна знехтувати.

Індуктивність фази в залежності від частоти так само як і активний опір R було отримано експериментальним шляхом. При частоті 1 кГц отримуємо

$$L = 30 \text{ мГн}$$

Індуктивний реактивний опір

$$X_L = 2\pi f_{роз} L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = j188,5 \text{ Ом}$$

Ємнісний реактивний опір

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_{\text{роз}} C_{\phi-\kappa}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 1,15 \cdot 10^{-9}} = -j138400 \text{ Ом}$$

Розрахунок ЧХ для різних варіантів під'єднання до обмотки

Електричне коло, що є еквівалентною одноланковою схемою заміщення для однієї фази одношарової обмотки без урахування взаємних міжфазних параметрів наведено на рис. 2.7. Воно складається з активних та реактивних опорів, кожний з яких відповідає відповідному повздовжньому або поперечному параметру розрахованому раніше.

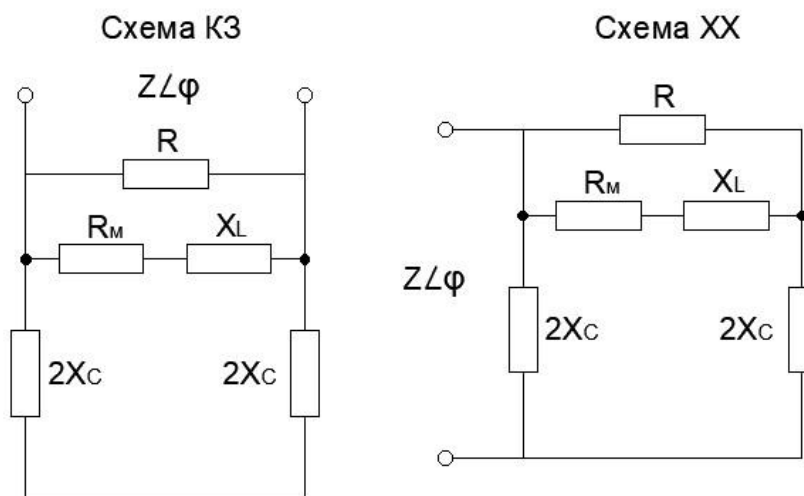


Рисунок 2.7 – Еквівалентні електричні кола для різних варіантів підключення.

Розрахунок для схеми при під'єднанні до початку обмотки та нейтралі

Відповідно до схеми при під'єднаних обох виводах до початку і кінця обмотки можна для початку розрахувати еквівалентний опір послідовного з'єднання $2X_C$ опорів

$$X_{C_{\text{заг}}} = 2X_C + 2X_C = 2 \cdot -j138400 + 2 \cdot -j138400 = -j553600 \text{ Ом}$$

Повний опір послідовного з'єднання R_m з X_L за частоти 1 кГц

$$Z_{RmL} = R_m + X_L = 7,15 + j188 \text{ Ом}$$

Еквівалентний повний опір обмотки, а також його модуль і кут зсуву за фазою φ

$$Z_K = \frac{1}{\frac{1}{Z_{RmL}} + \frac{1}{X_{C_{\text{заг}}}} + \frac{1}{R}} = \frac{1}{\frac{1}{7,15 + j188} + \frac{1}{-j553600} + \frac{1}{5000}} = 14,22 + j187,8 \text{ Ом}$$

$$\varphi_K = \arctan\left(\frac{X_K}{R_K}\right) = \arctan\left(\frac{187,8}{14,22}\right) = 85,4^\circ$$

$$Z_K = \sqrt{X_K^2 + R_K^2} = \sqrt{187,8^2 + 14,22^2} = 188,3 \text{ Ом}$$

Розрахунок для схеми під'єднання до початку обмотки та корпусу

Всі значення опорів такі самі, як у попередньому випадку, тому їх можна просто виписати

$$R = 5000 \text{ Ом}$$

$$R_M = 7,15 \text{ Ом}$$

$$X_L = j188,5 \text{ Ом}$$

$$X_C = -j138400 \text{ Ом}$$

У даному випадку для знаходження еквівалентного повного опору для прийнятого діапазону частот необхідно здійснити ряд спрощень. По-перше можна замінити пвздовжі опори одним

$$Z_{\text{повзд}} = \frac{Z_{RML} \cdot R}{Z_{RML} + R} = \frac{(7,15 + j188) \cdot 5000}{7,15 + j188 + 5000} = 14,2 + j187,7 \text{ Ом}$$

Наступним спрощенням є знаходження опору послідовного з'єднання $Z_{\text{повзд}}$ та $2X_C$

$$Z_{\text{пар}} = Z_{\text{повзд}} + 2 \cdot X_C = 14,2 + j187,7 + 2 \cdot -j138400 = 14,2 - j276600 \text{ Ом}$$

В результаті отримуємо повний опір обмотки для даного способу підключення, який дорівнює

$$Z_x = \frac{Z_{\text{пар}} \cdot 2 \cdot X_C}{Z_{\text{пар}} + (2 \cdot X_C)} = \frac{(14,2 - j276600) \cdot 2 \cdot -j138400}{(14,2 - j276600) + (2 \cdot -j138400)} = 3,554 - j138300$$

$$\varphi_x = \arctan\left(\frac{X_x}{R_x}\right) = \arctan\left(\frac{-138300}{3,554}\right) = -89,99^\circ$$

$$Z_x = \sqrt{X_x^2 + R_x^2} = \sqrt{138300^2 + 3,554^2} = 138300 \text{ Ом}$$

Для всіх інших значень частоти розрахунок проводиться так само і його результатом є табл. 2.4 та побудовані графіки на рис. 2.8.

Таблиця 2.4 – Отримані результати для двох варіантів під'єднання обмотки.

f , кГц	R_m , Ом	R , кОм	L , мГн	$C_{ф-к}$, нФ	Z_k , кОм	φ_k , °	Z_x , кОм	φ_x , °
1	7,15	5	30	1,15	0,188	85,7	138,3	-89,99
5	7,15	5,8	27,3	1,15	0,854	81,05	27,47	-89,93
10	7,15	6,5	25,3	1,15	1,585	75,62	13,46	-89,58
15	7,15	7,2	23,3	1,15	2,219	71,85	8,701	-88,86
20	7,15	8,7	21	1,15	2,763	71,31	6,269	-87,97
25	7,15	10,1	19,1	1,15	3,279	70,89	4,769	-86,77
30	7,15	12,1	18,2	1,15	3,976	70,67	3,69	-84,88
35	7,15	14	17,4	1,15	4,745	70,05	2,868	-81,89
40	7,15	15,7	16,8	1,15	5,662	68,72	2,202	-76,51
45	7,15	16,8	16,3	1,15	6,743	66,19	1,677	-66,07
50	7,15	17,6	15,7	1,15	7,93	63,07	1,344	-48,09
55	7,15	18,4	15,2	1,15	9,421	59,04	1,309	-22,3
60	7,15	19,2	14,7	1,15	11,23	54,02	1,65	-1,207
65	7,15	20	14,1	1,15	13,26	48,2	2,235	8,859
70	7,15	20,5	13,5	1,15	15,5	40,59	2,993	10,48
75	7,15	21	12,9	1,15	17,88	31,26	3,85	7,07
80	7,15	21,5	12,2	1,15	19,9	21,67	4,625	1,325
85	7,15	22	11,4	1,15	21,33	13,19	5,208	-4,53
86	7,15	22,1	11,2	1,15	21,5	12,27	5,274	-5,079
87	7,15	22,2	11,1	1,15	21,8	9,597	5,416	-7,238
88	7,15	22,3	11	1,15	22,04	6,902	5,546	-9,448
89	7,15	22,35	10,9	1,15	22,19	4,186	5,652	-11,74
90	7,15	22,4	10,9	1,15	22,31	-0,44	5,796	-15,82
95	7,15	22,65	10,7	1,15	21,36	-18,74	5,971	-32,1
100	7,15	22,9	10,6	1,15	18,73	-34,83	5,589	-46,56
105	7,15	23,1	10,5	1,15	15,93	-46,2	5,018	-56,68
110	7,15	23,2	10,4	1,15	13,58	-54,03	4,475	-63,5

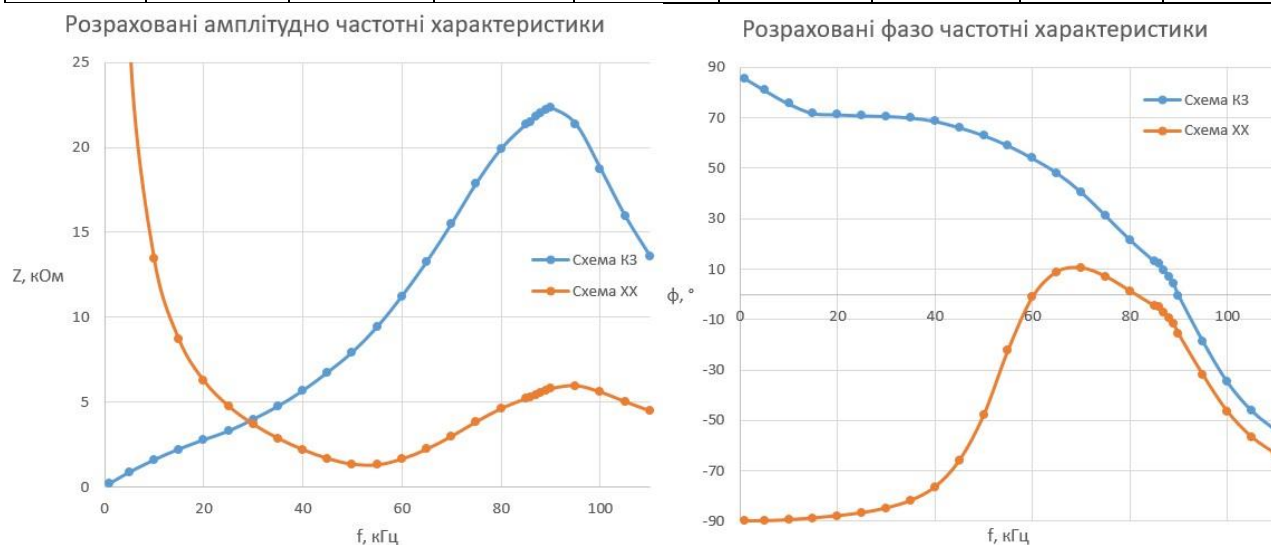


Рисунок 2.8 – Розраховані частотні характеристики для схем XX і КЗ.

2.3. Розрахунок високочастотних процесів з урахуванням індуктивних зв'язків між сусідніми елементами обмоток

Вплив зв'язків між сусідніми елементами буде проявлятися лише при під'єднанні одночасно декількох фаз до генератора або при наявності дефектів у не під'єднаних фазах. Тому для отримання іншої ЧХ порівняно з просто під'єднаною одною фазою, розрахунок якої наведено у попередньому підрозділі, потрібно розраховувати схему з під'єднаними всіма трьома фазами взятими паралель та за умови симетричності шляхом ділення повного опору у кожній точці на три отримати змінений взаємною індуктивністю та ємністю між фазами графік. Схема електричного кола така сама, як на рис. 2.7, тільки реактивні опори мають інші значення.

Діапазон частот залишається таким самим, і так само як приклад буде наведено розрахунок для однієї частоти 1 кГц.

$$f_{\text{роз}} = 1000 \dots 110000 \text{ Гц}$$

Теоретичний розрахунок взаємних параметрів $M_{\text{ф-ф}}$ та $C_{\text{ф-ф}}$ є дуже складною задачею. Тому з метою спрощення будуть взяті наближено практично виміряні їх значення, які наведено нижче.

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = 2,5 \text{ мГн}$$

$$C_{ab} = C_{bc} = C_{ac} = 0,084 \text{ нФ}$$

Значення активних опорів

$$R = 5000 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{м}} = 7,15 \text{ Ом}$$

Враховуючи зміни потрібно перерахувати значення залежних від взаємних зв'язків реактивних параметрів. Нове значення індуктивності L дорівнює:

$$L_{\text{зм}} = L - M_{ab} = 30 - 2,5 = 27,5 \text{ мГн}$$

Ємність фази до корпусу ($C_{\text{ф}} \approx C = 1,011 \text{ нФ}$)

$$C_{\text{ф}} = C_{\text{ф-к}} - C_{ab} - \frac{C_{ab}}{2} = 1,15 - 0,084 - 0,042 = 1,024 \text{ нФ}$$

Індуктивний реактивний опір

$$X_{L_{\text{зм}}} = 2\pi f_{\text{роз}} L_{\text{зм}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 27,5 \cdot 10^{-3} = j172,8 \text{ Ом}$$

Ємнісний реактивний опір

$$X_{C_{3M}} = \frac{1}{2\pi f_{роз} C_{\phi}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 1,024 \cdot 10^{-9}} = -j155424 \text{ Ом}$$

Розрахунок варіанту під'єднання початок-нейтраль

Алгоритм розрахунку такий самий, лише реактивні опори X_C та X_L у всіх формулах замінюються на $X_{C_{3M}}$ та $X_{L_{3M}}$ відповідно. Загальний ємнісний реактивний опір для частоти 1 кГц дорівнює

$$X_{C_{3\text{заг}}} = 2X_{L_{3M}} + 2X_{C_{3M}} = 2 \cdot -j155424 + 2 \cdot -j155424 = -j621700 \text{ Ом}$$

Повний опір послідовного з'єднання R_M з X_L

$$Z_{RML} = R_M + X_{L_{3M}} = 7,15 + j172,8 \text{ Ом}$$

Повний комплексний опір обмотки та його модуль і кут зсуву за фазою φ

$$Z_K = \frac{1}{\frac{1}{Z_{RML}} + \frac{1}{X_{C_{3\text{заг}}}} + \frac{1}{R}} = \frac{1}{\frac{1}{7,15 + j173} + \frac{1}{-j621700} + \frac{1}{5000}} = 13,1 + j172,1 \text{ Ом}$$

$$\varphi_K = \arctan\left(\frac{X_K}{R_K}\right) = \arctan\left(\frac{172,1}{13,1}\right) = 85,65^\circ$$

$$Z_K = \sqrt{X_K^2 + R_K^2} = \sqrt{169,6^2 + 12,91^2} = 172,6 \text{ Ом}$$

Розрахунок варіанту під'єднання початок-корпус

Значення всіх опорів розраховані вище, тому їх просто переписуємо

$$R = 5000 \text{ Ом}$$

$$R_M = 7,15 \text{ Ом}$$

$$X_{L_{3M}} = j172,8 \text{ Ом}$$

$$X_{C_{3M}} = -j155424 \text{ Ом}$$

У даному випадку для знаходження еквівалентного повного опору для прийнятого діапазону частот необхідно здійснити ряд спрощень. По-перше можна замінити пвздовжі опори одним

$$Z_{\text{повзд}} = \frac{Z_{RML} \cdot R}{Z_{RML} + R} = \frac{(7,15 + j172,8) \cdot 5000}{7,15 + j172,8 + 5000} = 13,1 + j172,1 \text{ Ом}$$

Наступним спрощенням є знаходження опору послідовного з'єднання $Z_{\text{повзд}}$ та $2X_C$

$$Z_{\text{пар}} = Z_{\text{повзд}} + 2 \cdot X_{C_{3M}} = 13,1 + j172,1 + 2 \cdot -j155424 = 13,1 - j310700 \text{ Ом}$$

В результаті отримуємо повний опір обмотки для даного способу підключення, який дорівнює

$$Z_x = \frac{Z_{\text{пар}} \cdot 2 \cdot X_{C_{3M}}}{Z_{\text{пар}} + (2 \cdot X_{C_{3M}})} = \frac{(13,1 - j310700) \cdot 2 \cdot -j155424}{(13,1 - j310700) + (2 \cdot -j155424)} = 3,3 - j155400$$

$$\varphi_x = \arctan\left(\frac{X_x}{R_x}\right) = \arctan\left(\frac{-155400}{3,3}\right) = -89,99^\circ$$

$$Z_x = \sqrt{X_x^2 + R_x^2} = \sqrt{155400^2 + 3,3^2} = 155400 \text{ Ом}$$

Для всіх інших значень частоти розрахунков проводиться так само і його результатом є табл. 2.5 та побудовані графіки на рис. 2.9.

Таблиця 2.5 – Частотні характеристики та параметри змінні впливом взаємної індуктивності та ємності.

f, кГц	R, кОм	M _{аб} , мГн	L _{зм} , мГн	C _{ф-к} , нФ	Z _к , кОм	φ _к , °	Z _х , кОм	φ _х , °
1	5	2,5	27,5	1,024	0,173	85,65	155,4	-89,99
5	5,8	2,29	25,01	1,024	0,783	81,72	30,89	-89,95
10	6,5	2,13	23,17	1,024	1,451	76,8	15,19	-89,69
15	7,2	1,96	21,34	1,024	2,026	73,44	9,877	-89,16
20	8,7	1,76	19,24	1,024	2,508	73,1	7,174	-88,54
25	10,1	1,6	17,5	1,024	2,953	72,84	5,516	-87,74
30	12,1	1,53	16,67	1,024	3,539	72,84	4,343	-86,55
35	14	1,46	15,94	1,024	4,166	72,54	3,461	-84,82
40	15,7	1,41	15,39	1,024	4,889	71,7	2,752	-81,99
45	16,8	1,37	14,93	1,024	5,712	69,98	2,168	-76,97
50	17,6	1,32	14,38	1,024	6,575	67,9	1,701	-68,7
55	18,4	1,28	13,92	1,024	7,614	65,4	1,352	-54,1
60	19,2	1,24	13,46	1,024	8,82	62,5	1,2	-31,93
65	20	1,18	12,92	1,024	10,13	59,4	1,307	-9,31
70	20,5	1,13	12,37	1,024	11,57	55,5	1,648	5,628
75	21	1,08	11,82	1,024	13,18	50,1	2,133	13,13
80	21,5	1,03	11,17	1,024	14,7	46,6	2,628	16,1
85	22	0,96	10,44	1,024	16	43,02	3,061	17,12
90	22,4	0,92	9,98	1,024	18,06	35,9	3,774	14,09
95	22,65	0,91	9,79	1,024	20,84	22,44	4,828	4,18
99	22,8	0,9	9,7	1,024	22,46	8,38	5,605	-7,7
100	22,9	0,89	9,71	1,024	22,74	3,99	5,789	-11,54
101	22,9	0,89	9,71	1,024	22,8	-0,226	5,91	-15,32
102	23,0	0,89	9,71	1,024	22,83	-4,417	6,021	-19,03
103	23,0	0,89	9,62	1,024	22,76	-6,384	6,047	-20,7
105	23,1	0,88	9,62	1,024	22,26	-14,6	6,109	-28,2
110	23,2	0,87	9,53	1,024	19,99	-30,1	5,836	-42,2

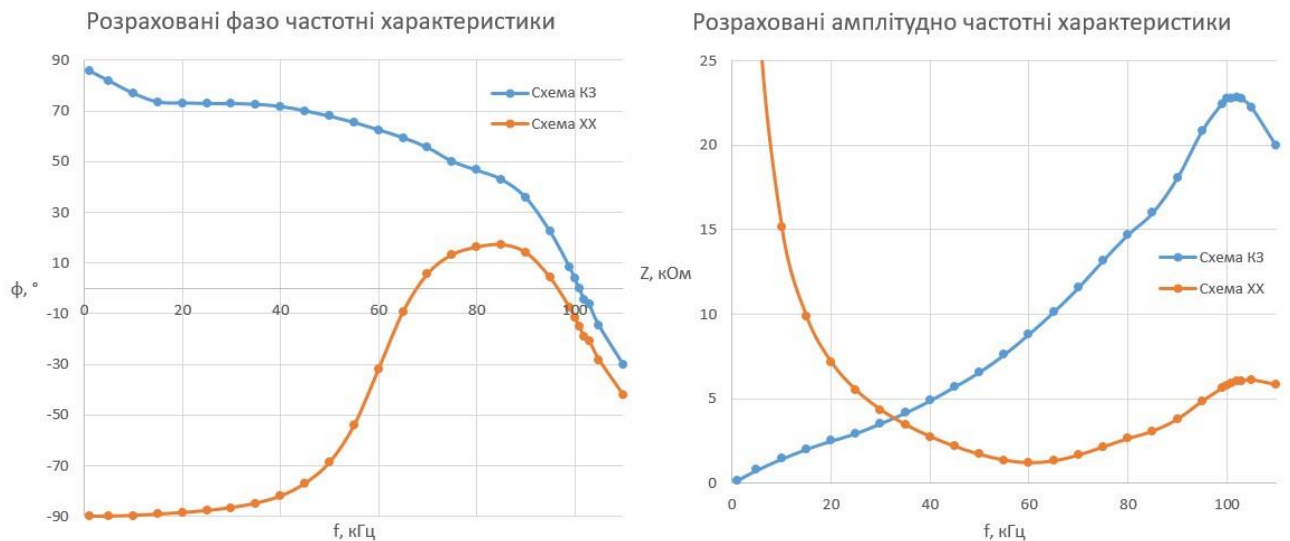


Рисунок 2.9 – Розраховані частотні характеристики з впливом взаємних параметрів.

Після розрахунку обидвох характеристик (підрозділи 2.2, 2.3) можна проаналізувати відмінності між ними та відповідно вплив цих самих параметрів $M_{\phi-\phi}$ та $C_{\phi-\phi}$, особливо у області резонансу. В результаті резонансна частота для схеми підключення до нейтралі збільшилась з 90 до 102 кГц. Це пов'язано зі зниженням індуктивності при підключених двох фазах паралельно та одночасно зниженням ємності через закорочування між фазних при паралельному з'єднанні. При цьому як і можна було очікувати значення резонансного опору майже не змінилось, бо зміна реактивних опорів безпосередньо не призводить до зміни активних. Значення Z_p дорівнює 22,31 та 22,83 кОм відповідно. Несуттєва зміна пов'язана з збільшенням параметру R при збільшенні частоти. На рис. 2.10 подано різницю між Z_p для двох розглянутих випадків у відсотках, за допомогою якої можна з'ясувати на яких частотах відхилення є найбільшим, та відповідно зрозуміти коли спостерігається найбільший вплив зв'язків між фазами.

У діапазоні низьких частот можна побачити, що значення відхилення прямують до усталених для обох графіків та відповідають відхиленню індуктивного опору розсіювання при підключенні затискачів безпосередньо до двох кінців обмотки, та у другому випадку зміні значення ємності і ємнісного опору до корпусу обмотки. Це пояснюється майже повністю індуктивним та ємнісним характерами навантаження за частоти 1 кГц, що також можна побачити на рис. 2.9 на фазочастотній характеристиці.

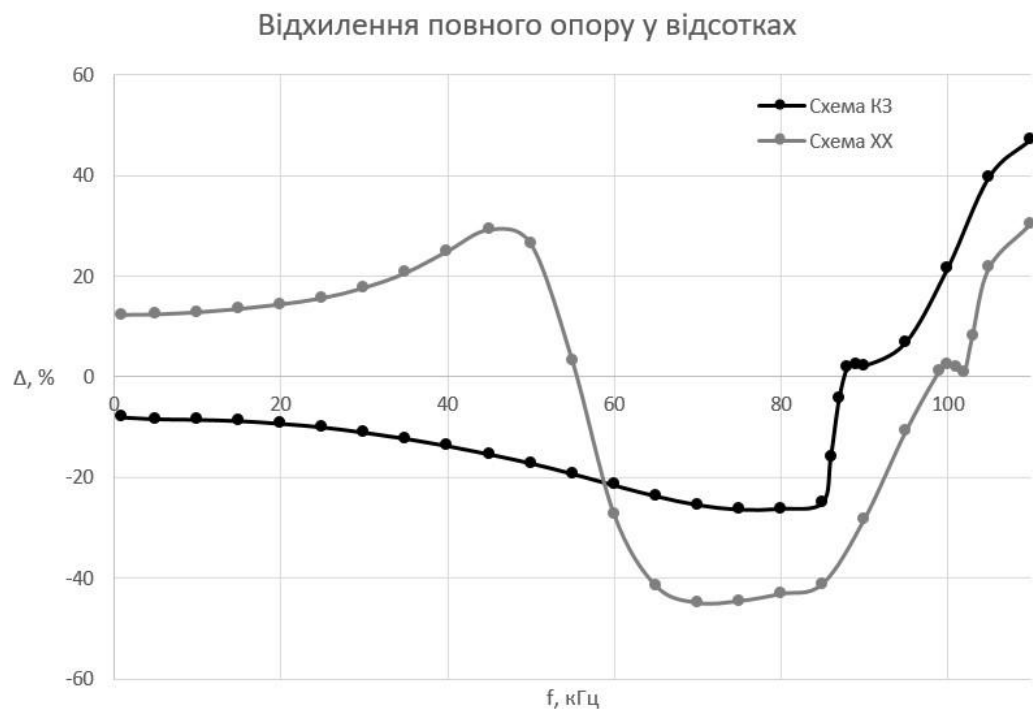


Рисунок 2.10 – Відхилення повного опору при паралельному з'єднанні трьох фаз для обох розрахованих варіантів під'єднання.

2.4. Висновки

Існує багато способів укладки багатофазної обмотки у пази. В основному різні схеми відрізняються або просторовим розташуванням лобових частин, або кількістю сторін різних котушок у одному пазу (кількість шарів). Чим більша площа контакту лобових частин різних секцій, тим більший між ними буде індуктивний та ємнісний зв'язок. Збільшення кількості шарів у пазах також призводить до дуже суттєвого збільшення взаємних параметрів.

У результаті проведеного розрахунку та даних зображених на рис. 2.11, 2.12 за певних схем з'єднання обмотки взаємні параметри дуже суттєво впливають на значення резонансної частоти. Тому для можливості практичного використання діагностики стану ізоляції високочастотною напругою необхідно враховувати їх значення, бо наприклад якщо суттєвий дефект з'явився у іншій фазі, то частотна характеристика зміниться, але причиною цієї зміни є інша непід'єднана фаза.

Враховуючи отримані результати та проведені до цього практичні дослідження можна стверджувати, що при правильному визначенні всіх параметрів одноланкова схема заміщення з достатньою точністю моделює реальну асинхронну електричну машину загальнопромислового виконання при живленні напругою високої частоти. Тому у першому наближенні можна не проводити розрахунки та моделювання для багатоланкової схеми заміщення. Окрім того якщо вже розглядати багатоланкову схему, то необхідно враховувати не тільки власні параметри кожної секції, а і взаємні між секціями своєї та чужих фаз, що дуже суттєво ускладнює таку модель, особливо враховуючи що в залежності від обмотувальних даних ці взаємні параметри між різними секціями будуть різними.

III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ІНДУКТИВНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ СМІЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ОБМОТОК

Експериментальні дослідження проводились на спеціальному стенді, який складається з асинхронного трифазного двигуна з короткозамкненим ротором 4А80А4 потужністю 1,1 кВт з укладеною у його пази спеціальною обмоткою з відпайками у різних точках фази А та виведеними всіма кінцями обмотки назовні. За допомогою цього стенду можна досліджувати вплив на частотні характеристики різних дефектів ізоляції. Проводити дослідження як усталених, так і перехідних процесів.

3.1. Високочастотна схема заміщення двигуна 4А80А4 з урахуванням взаємоіндуктивних зв'язків

В результаті проведеного аналізу та розрахунків було отримано схему заміщення зображену на рис. 3.1. На цій схемі позначено елементи які залежать від частоти у їх підписі додаванням (f) та фіолетовим кольором.

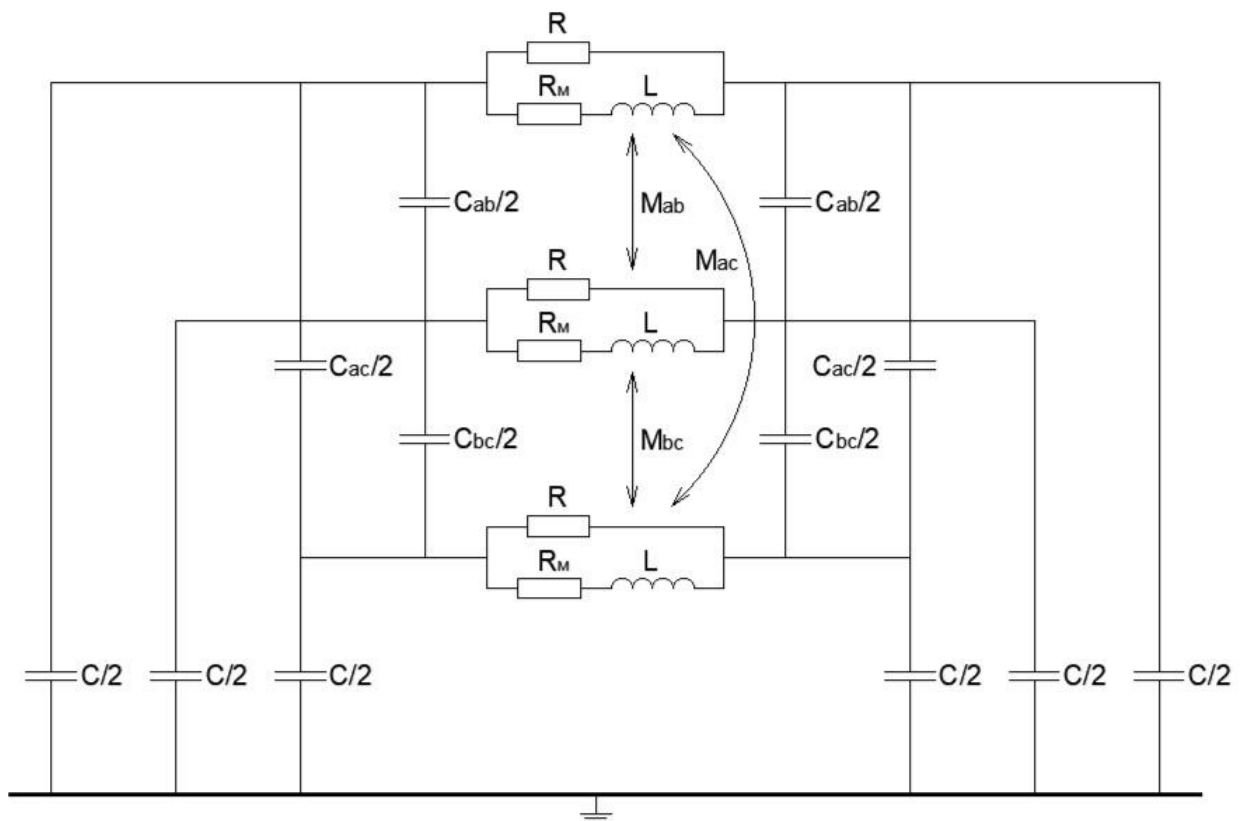


Рисунок 3.1 – Високочастотна схема заміщення двигуна 4А80А4.

Дана схема є уточненою та складається не тільки з параметрів фази, а і з тих параметрів, що характеризують зв'язок між ними. Таким чином така схема повинна більш точно моделювати процеси при будь-яких способах підключення до генератора.

З ціллю перевірки було проведено цілий ряд практичних дослідів зі зняттям частотних характеристик, за допомогою яких шляхом порівняння можна з певною точністю визначити правильність отриманих параметрів та адекватність побудованої моделі.

Відповідно до П-подібної схеми заміщення, якщо активний опір провідників обмотки є досить високим (що справедливо для двигунів малої потужності), його можна досить точно виміряти за допомогою мультиметра UTM161C у режимі вимірювання низьких опорів. На рис. 3.2 зображено такий прилад з значенням опору на екрані, який відповідає активному опору R_m однієї фази обмотки. Враховуючи опір вимірювальних проводів та контактів можна прийняти 8,1 Ом. Порівнявши отримане значення з вказаним у довіднику 7,15 Ом відхилення складає 11,7%. Для більшої точності потрібно враховувати також температуру.



Рисунок 3.2 – Активний опір провідників фази А досліджуваного двигуна.

Наступним параметром для визначення можна обрати індуктивність L . Значення цього параметру суттєво залежить від частоти, тому безпосередньо його виміряти можна лише для певного значення частоти. А щоб отримати залежність від частоти потрібно провести ряд вимірювань за різного її значення та отримати відповідну криву. З ціллю оцінки та визначення цього параметру при більш низькій частоті було проведено відповідне вимірювання, результати якого

зображені на рис. 3.3. Також L було виміряно за допомогою мосту змінного струму на частоті 1 кГц, за результатами якого отримано значення 30 мГн.

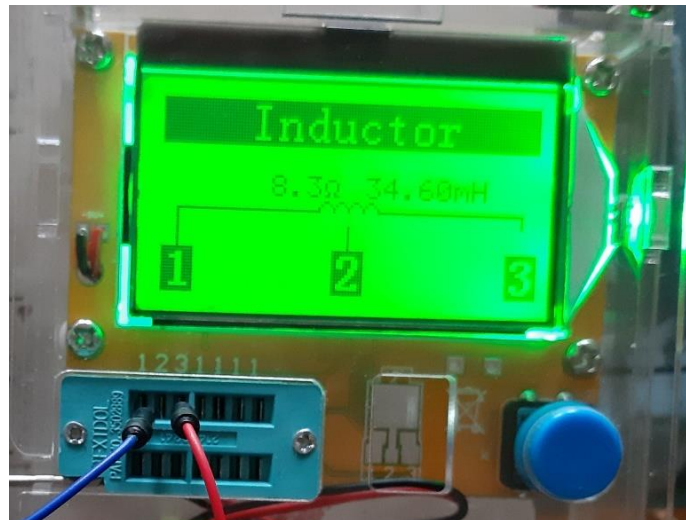


Рисунок 3.3 - Отримане значення індуктивності L на екрані вимірювача LCR.

Для отримання значення індуктивності при різних частотах було знято ряд точок резонансу струму при різному значенні додаткової ємності. Вважаючи ємність C не змінною за отриманими точками було розраховано значення L за формулою:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot \left(\frac{C}{4} + C_{\text{дод}}\right)}$$

Окрім того так як при резонансі характер навантаження суто активний наближено він дорівнює $Z_p \approx R$. В результаті отримуємо криві на рис. 3.4.

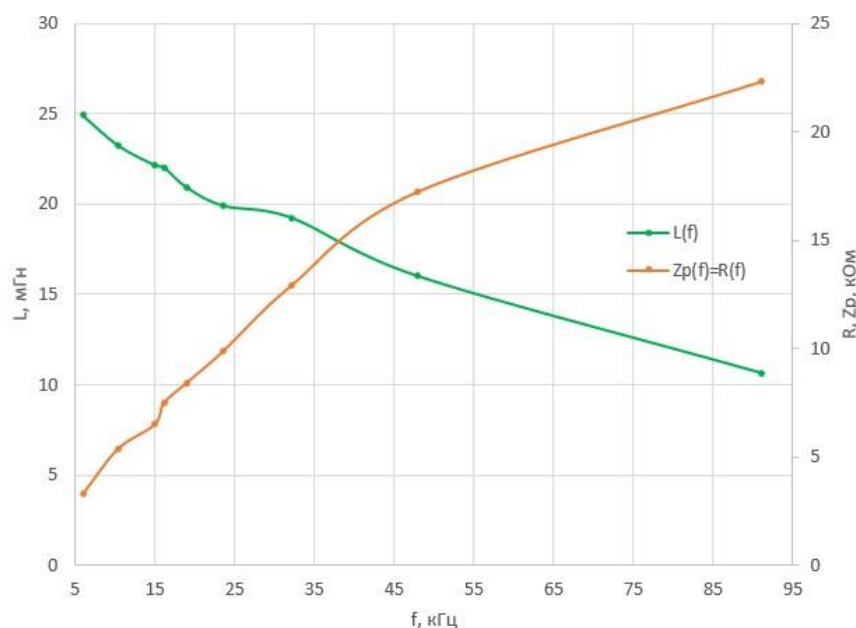


Рисунок 3.4 – Залежності Z_p , R , L від частоти з різною додатковою ємністю.

За допомогою того самого приладу, який зображено на рис. 3.3 було виміряно ємність однієї фази до корпусу $C_{\phi-k} = 1,15$ нФ та ємність між двома фазами $C_{\phi-\phi} = 0,645$ нФ. З отриманих значень шляхом розв'язання системи рівнянь наведеної нижче розраховується ємність $C = 1,037$ нФ та ємність $C_{ab} = C_{bc} = C_{ac} = 0,084$ нФ.

$$\begin{cases} C_{\phi-\phi} + \frac{1}{\frac{1}{C_{\phi-\phi}} + \frac{1}{C_{\phi-\phi}}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{\phi-k}} + \frac{1}{C_{\phi-k}}} = 0,645 \text{ нФ} \\ C_{\phi-k} + \frac{1}{\frac{1}{C_{\phi-k}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{\phi-\phi}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{\phi-\phi}} + \frac{1}{C_{\phi-\phi}}}}} = 1,150 \text{ нФ} \end{cases}$$

Варто зазначити, що для спрощення однакові параметри різних фаз приймаються рівними. Насправді вони трохи відрізняються для кожної фази, але як показали вимірювання обмотка досить симетрична та відмінності дуже не суттєві. Тому всі параметри приймаються однаковими для різних фаз.

Останнім кроком залишилось визначення взаємної індуктивності між двома фазами. Так само її не можна виміряти безпосередньо, тому для визначення було обрано наступний підхід, спочатку вимірюється індуктивність для однієї під'єднаної до вимірювача-LCR фази, а потім під'єднуються дві з'єднані паралельно. Таким чином помноживши значення індуктивності для другого досліду на два та віднявши його від індуктивності з першого досліду отримуємо значення взаємної індуктивності $M_{ab} = L_a - 2L_{ab} = 34,7 - 2 \cdot 15,9 = 2,9$ мГн для частоти 50 Гц. Інформації про те, як саме залежить цей параметр від частоти у літературі не знайдено. Тому для спрощення можна прийняти такий самий характер зміни як для параметру L . Відповідно якщо поділити отриману взаємну індуктивність на L отримаємо 0,084, або 8,4 %. Тобто для кожного значення частоти M_{ab} буде дорівнювати 8,4% від L_a . Результати експериментального дослідження параметрів високочастотної схеми заміщення трифазної обмотки наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментально визначені параметри високочастотної схеми заміщення асинхронного двигуна 4А80А4.

f, кГц	R _м , Ом	L, мГн	R, кОм	C, нФ	C _{аб} , нФ	M _{аб} , мГн
1	8,1	30	5	1,037	0,084	2,5
5	8,1	27,3	5,8	1,037	0,084	2,29
10	8,1	25,3	6,5	1,037	0,084	2,13
15	8,1	23,3	7,2	1,037	0,084	1,96
20	8,1	21	8,7	1,037	0,084	1,76
25	8,1	19,1	10,1	1,037	0,084	1,6
30	8,1	18,2	12,1	1,037	0,084	1,53
35	8,1	17,4	14	1,037	0,084	1,46
40	8,1	16,8	15,7	1,037	0,084	1,41
45	8,1	16,3	16,8	1,037	0,084	1,37
50	8,1	15,7	17,6	1,037	0,084	1,32
55	8,1	15,2	18,4	1,037	0,084	1,28
60	8,1	14,7	19,2	1,037	0,084	1,24
65	8,1	14,1	20	1,037	0,084	1,18
70	8,1	13,5	20,5	1,037	0,084	1,13
75	8,1	12,9	21	1,037	0,084	1,08
80	8,1	12,2	21,5	1,037	0,084	1,03
85	8,1	11,4	22	1,037	0,084	0,96
90	8,1	10,9	22,4	1,037	0,084	0,92
95	8,1	10,7	22,65	1,037	0,084	0,9
100	8,1	10,6	22,9	1,037	0,084	0,89

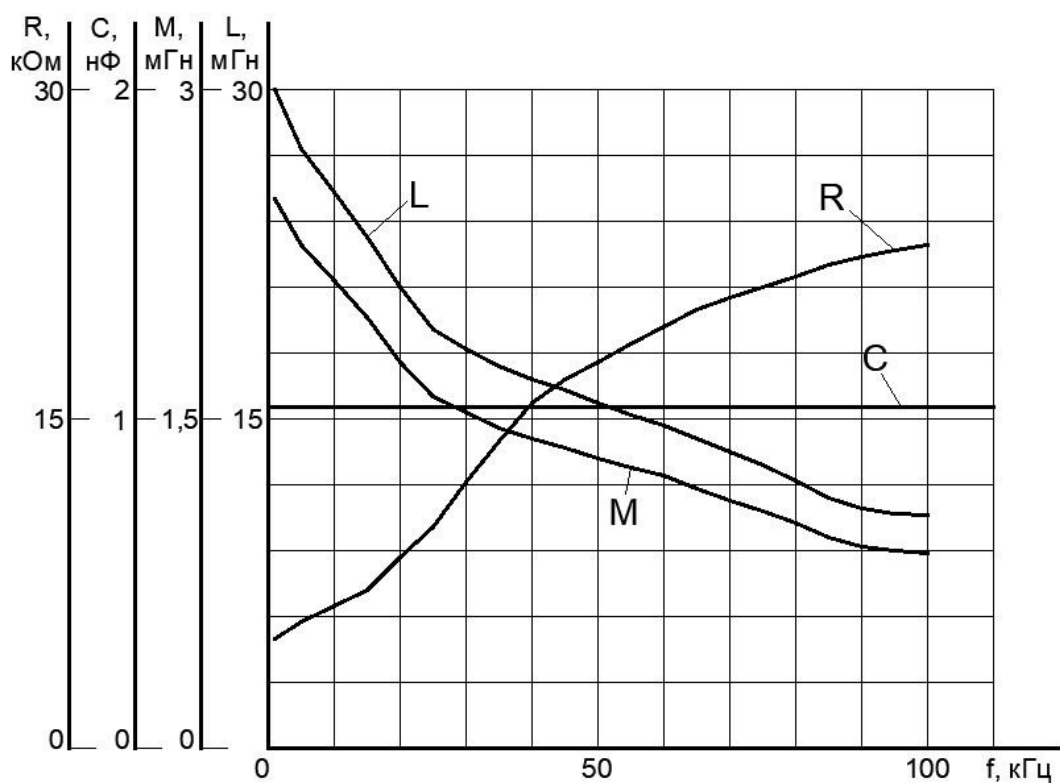


Рисунок 3.5 – Уточнені параметри асинхронного двигуна 4А80А4.

3.2. Експериментальне дослідження високочастотних процесів двигуна 4A80A4 з визначенням вхідного опору та резонансної частоти

Дослідження за допомогою двоканального осцилографа з вбудованим генератором

Першим варіантом отримати залежність повного опору від частоти є вимірювання за допомогою осцилографа значення струму та напруги при поданій напрузі певної частоти. Напряга може бути виміряна безпосереднім під'єднанням щупів одного з каналів до обмотки. Струм можна визначити додавши у коло резистор певного відомого опору, тобто вимірюючи значення напруги на шунті та перераховуючи за законом Ома у значення струму що протікає у колі. До переваг даного методу можна віднести можливість змінювати частоту в дуже широкому діапазоні (до герца для простого генератора), порівняно висока точність вимірювання Z яка залежить лише від точності вимірювання амплітуди синусоїди осцилографом ($\pm 2\%$). До недоліків однозначно можна віднести великі часові витрати для отримання детальної залежності з великою кількістю точок та необхідність додаткових розрахунків для визначення повного опору. Для досліджень цим методом було використано наступне обладнання та елементи схеми:

- Цифровий двоканальний осцилограф DSO2512G від компанії ZEEWEEI з діапазоном вимірюваних частот у двоканальному режимі до 60 МГц та вбудованим генератором сигналів з частотою сигналу синусоїдної форми до 10 МГц з мінімальним кроком зміни частоти 10 герц.
- Конденсатор плівковий СВВ21 10 мкФ, 400 В, $\pm 10\%$.
- Резистор вивідний опором 1000 Ом, 1%, потужність 0,25 Вт.

Схему досліджень в загальному вигляді зображено на рис 3.6. У якості навантаження у нашому випадку виступає обмотка під'єднана різними способами. За допомогою такого підходу було знято та побудовано ЧХ фази А на рис. 3.7. для так званих схем КЗ і ХХ.

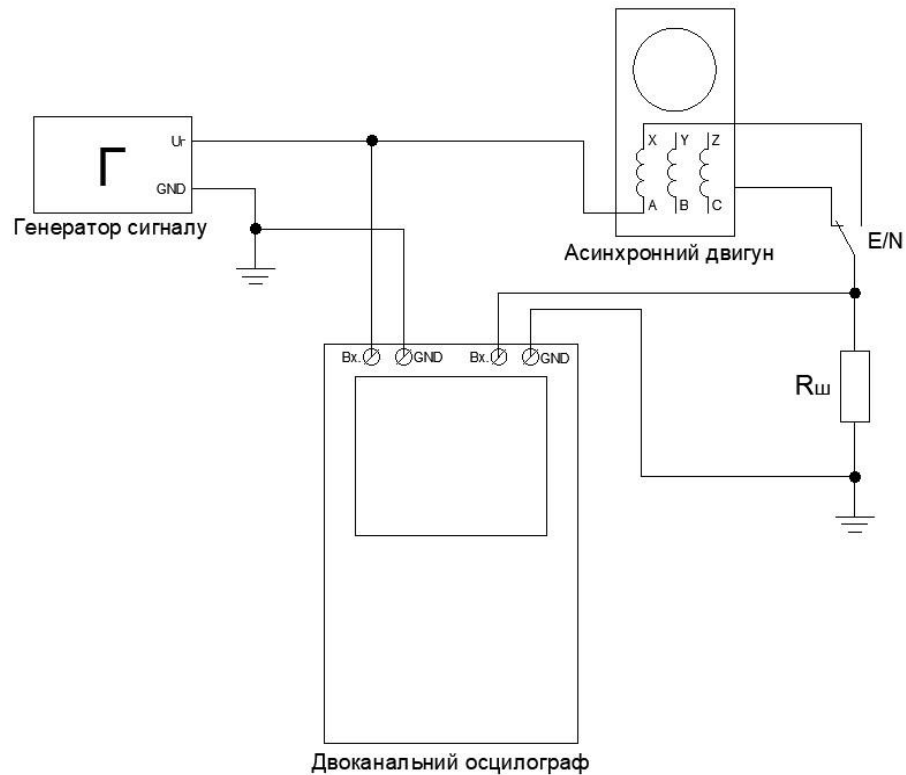


Рисунок 3.6 – Спрощена схема лабораторної установки.

Для фази А

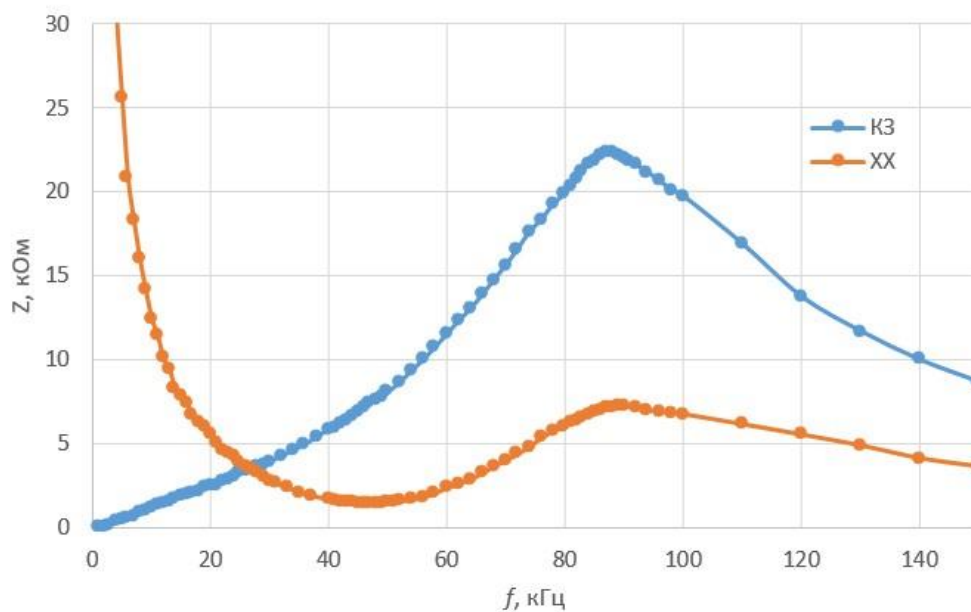


Рисунок 3.7 – Отримані залежності повного опору від частоти.

Як можна побачити дослідження проводились з кроком 1-2 кГц до частоти 100 кГц та з кроком 10 кГц до частоти 150 кГц. Далі проводити дослідження на вищих значеннях не було сенсу через відсутність там явно виражених резонансів.

Таким самим шляхом було отримано характеристики і для двох інших фаз В та С. Доцільним є порівняти отримані залежності для оцінки стану обмотки досліджуваного АД. Отримані результати зображені на рис. 3.8.

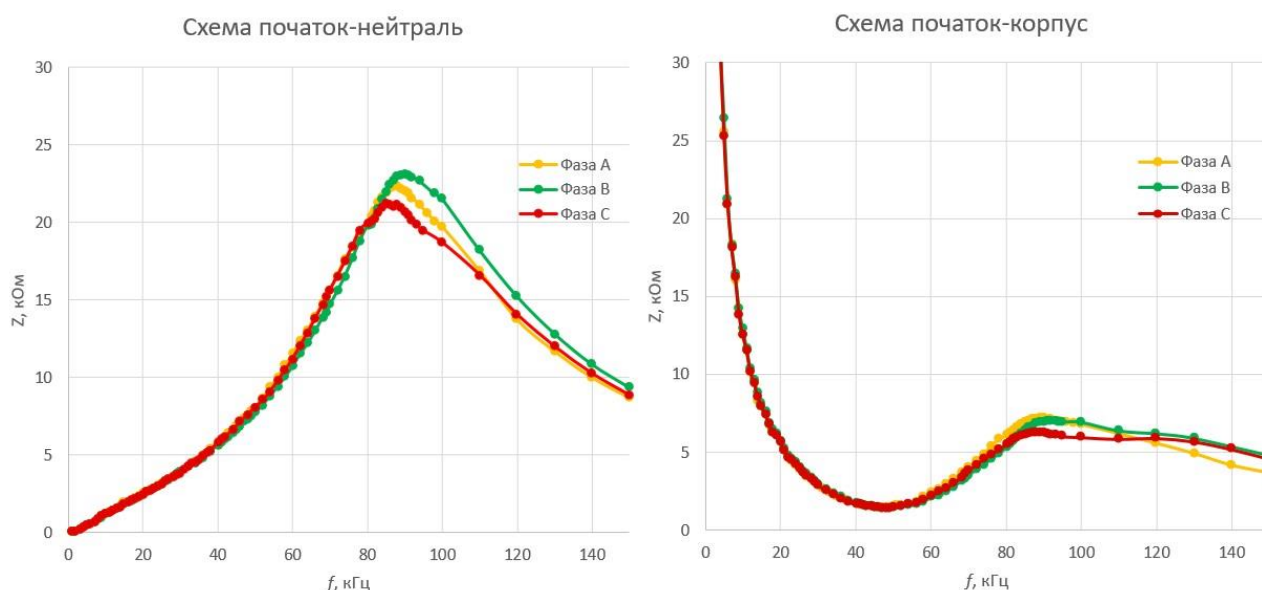


Рисунок 3.8 – Частотні характеристики всіх трьох фаз.

Порівнюючи отримані результати для всіх трьох фаз можна зробити висновок, що відхилення між їх частотними характеристиками є досить суттєвими, що свідчить про не симетрію фаз причиною якої в тому числі може бути старіння ізоляції, або навіть наявність локальних її дефектів. Можна помітити, що найбільша різниця між фазою А та С. Резонансна частота фази С знижується, що свідчить про більшу ємність до корпусу фази С, або про наявність виткових замикань у фазі А. Окрім того суттєва різниця між резонансними опорами двох фаз може свідчити про гірший стан ізоляції між пластинами магнітопроводу у області розташування фази С. Звичайно є також і певні відхилення пов'язані з недосконалістю технології виготовлення та допустимою не симетрією фаз.

Останнім було проведено дослідження високочастотних процесів при з'єднанні всіх трьох фаз паралельно та підключенні до генератора. Результати наведені на рис. 3.9. З них можна зробити висновок, що з'єднання всіх трьох фаз паралельно призвело до зниження повного опору наближено у три рази у кожній точці та зсуву точки резонансу у бік вищих частот, що пояснюється зниженням індуктивного опору розсіювання та одночасно зниженням ємності для однієї

фази. Або іншими словами загальна індуктивність трьох фаз зменшилась більше ніж в три рази, а ємність збільшилась менше ніж в три рази.

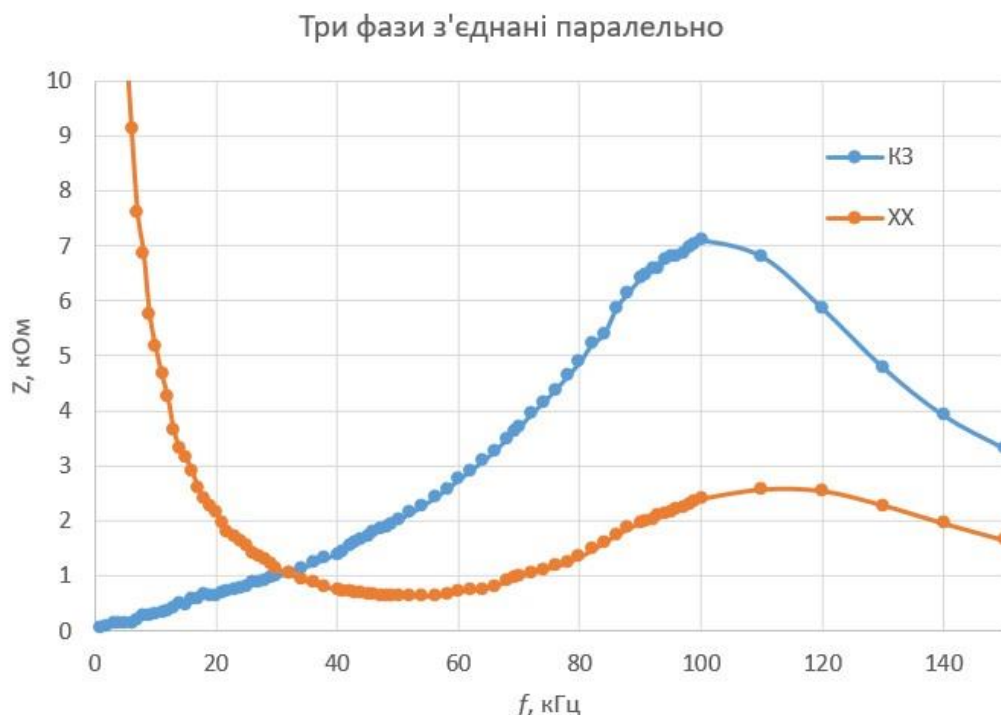


Рисунок 3.9 – Частотні характеристики при паралельному з'єднанні трьох фаз.

Дослідження з використанням спеціального приладу для вимірювання залежності повного опору від частоти

В результаті великої кількості проведених досліджень частотних характеристик вище описаним способом виявився цілий ряд недоліків такого способу зняття частотних власноруч точка за точкою. Першим та найочевиднішим є дуже велика кількість часу, який необхідно витрати на зняття хоча б декількох детальних кривих з кількістю точок наприклад 100. Окрім того довгим процес робить необхідність використання не зовсім зручного способу вимірювання струму за допомогою осцилографа та шунта, через що при суттєвих змінах значення струму потрібно змінювати ціну клітинки по вертикалі на екрані у вольтах або іншими словами масштаб вертикальної розгортки, а також через зміну значення частоти змінювати масштаб за часом. В результаті на зняття одної характеристики витрачалось не менше 30 хвилин.

Через це провівши десятки годин за зняттям частотних характеристик виникає очевидне бажання або навіть потреба якось автоматизувати та пришвидшити цей процес, без чого не можливо використовувати даний спосіб

для справжньої діагностики та оцінки стану ізоляції обмоток різних електричних машин. Як і майже не можливо, або дуже важко провести більш ґрунтовні дослідження, зняти не одну окрему, а цілі сімейства характеристик при внесенні тих чи інших змін у електричне коло. Тому під час роботи над практичною частиною, яка висвітлена у третьому розділі було створено прототип такого приладу для зняття частотних характеристик та подальшого експортування отриманих точок у Excel. Зовнішній вигляд цього прототипу наведено на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Дослідний зразок приладу для вимірювання залежності повного опору від частоти під'єднаний до комп'ютера.

За допомогою вище наведеного приладу було проведено цілий ряд досліджень, до яких можна віднести дослідження зміни характеру ЧХ при наявності додаткової ємності різного номіналу, вплив різного роду дефектів, таких як виткові замикання, замикання секцій, наявність додаткового опору на корпус на різних ділянках обмотки. З отриманих кривих на рис. 3.11 можна побачити та спрогнозувати подальший характер їх зміни та виявити фундаментальні залежності параметрів, які є моделлю різних фізичних явищ, від частоти.

За допомогою отриманих точок резонансу за різного значення ємності було розраховано залежність індуктивності від частоти та з використанням апроксимації було отримано криву на рис. 3.5. При збільшенні значення ємності значення резонансної частоти зсувається у бік менших частот, а резонансний опір знижується. Така поведінка повторюється для всіх асинхронних двигунів різної потужності та різної кількості фаз, які було досліджено. Це вказує на те, що пов'язаний з втратами в сталі активний опір R будь-якого АД при зменшенні частоти буде зменшуватись через зменшення впливу явища витіснення струму та збільшення глибини проникнення струму. При цьому також необхідно відзначити, що для всіх асинхронних двигунів з різними схемами обмоток та різною кількістю провідників у пазу індуктивність зменшується при підвищенні частоти та прямує до певного усталеного значення. Так само такий характер залежності параметру L є загальним для всіх АД з короткозамкненим ротором та магнітопроводом статора і ротора з електротехнічної сталі.

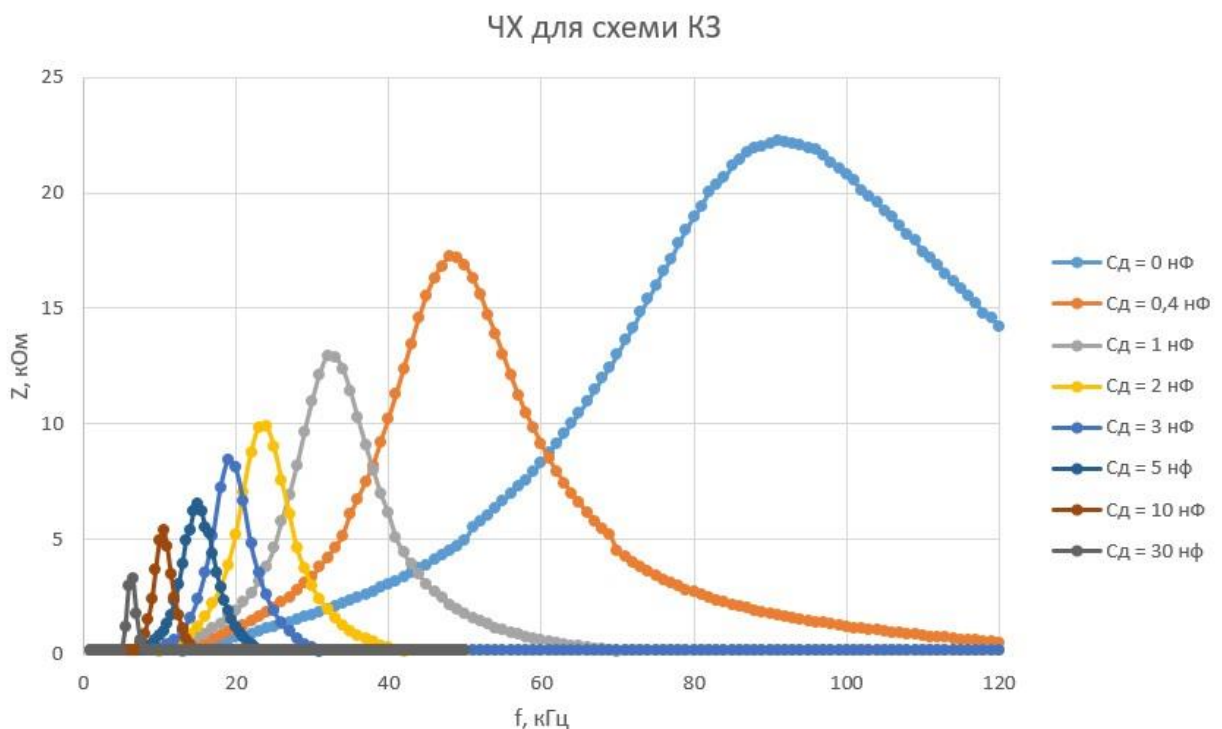


Рисунок 3.11 – Частотні характеристики з додатковою ємністю.

Також було проведено дослідження впливу різних пошкоджень, результати якого наведено на рис. 3.12. З отриманих результатів чітко видно суттєві зміни при наявності таких дефектів як коротке замикання секції та наявність додаткового опору 10 кОм до корпусу. При цьому як і можна було очікувати три

коротких замиканнях секцій відбувається зміна як активних, так і реактивних опорів схеми заміщення. При наявності додаткового опору змінюються лише активні опори та відповідно тільки активна складова повного опору. Чим ближче дефект до початку або кінця обмотки, тим більш він яскраво виражений. Як і при будь-якому вимірюванні є певна похибка, яка для цього приладу може мати досить високі значення у діапазоні низьких опорів. Головну увагу варто приділяти ділянці біля резонансу.

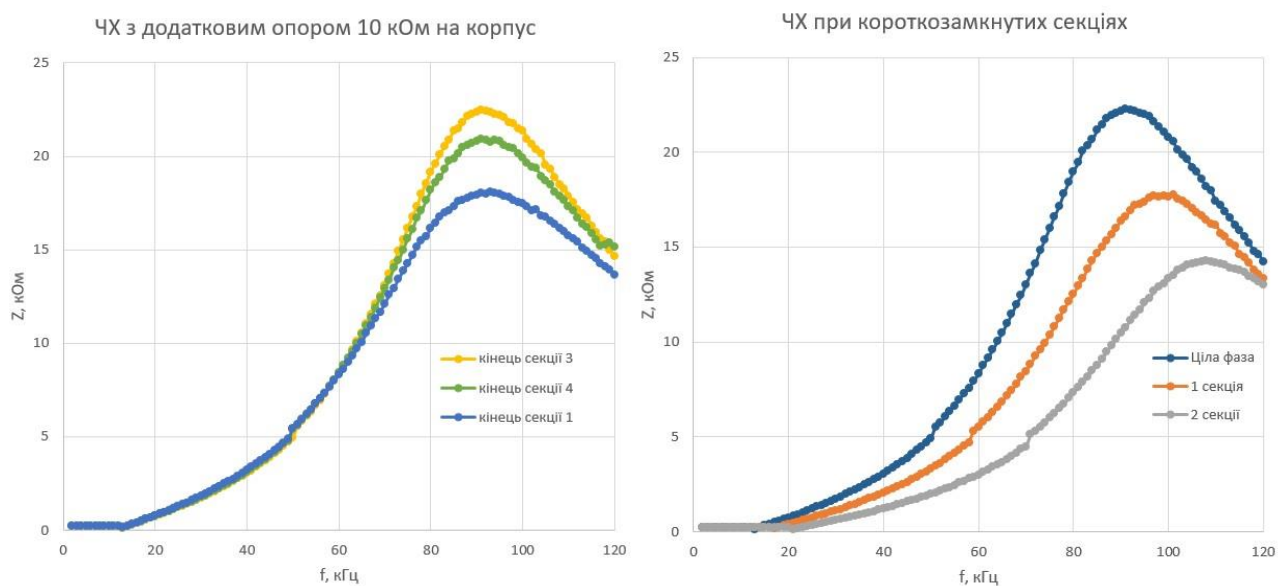


Рисунок 3.12 – Частотні характеристики при наявності різних дефектів ізоляції.

На суттєві локальні дефекти даний пристрій реагує дуже добре, що в принципі і очікувалося. Але за допомогою частотних характеристик можна виявляти і більш непомітні пошкодження, такі як виткові замикання. На рис. 3.13 зображено частотні характеристики фази без дефекту та з п'ятьма короткозамкненими витками. Зміна в такому випадку вже не така відчутна, але вона є і її цілком можливо зафіксувати, що підтверджує працездатність обраного методу для виявлення різних дефектів, а також що дуже важливо встановлення його типу і в певних випадках навіть місця розташування. Також було проведено ряд таких самих досліджень, але з додатковою ємністю, які показали, що чутливість при цьому збільшується не суттєво.

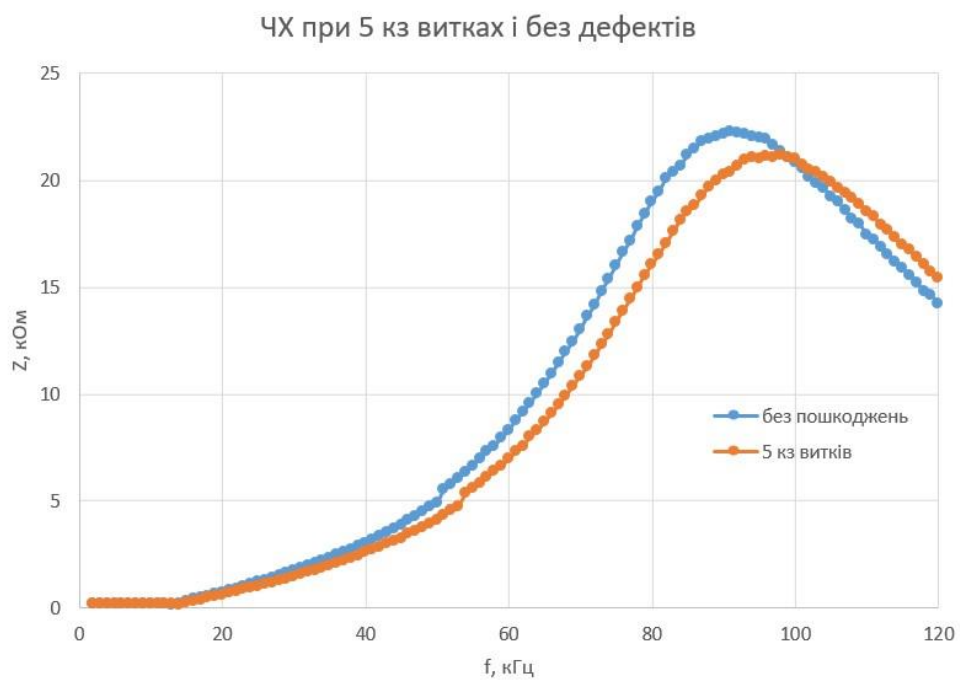


Рисунок 3.13 – Частотні характеристики обмотки з витковими замиканнями.

3.3. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів

Порівнюючи результати отримані у другому та третьому розділі можна відмітити досить високу відповідність між теоретично та експериментально отриманою залежністю повного опору від частоти. Для кращого порівняння та аналізу зробимо графік, на якому зобразимо теоретичну та експериментальну криві, а також відхилення повного опору розрахунку від експерименту. Такий графік для фази А наведено на рис. 3.14.

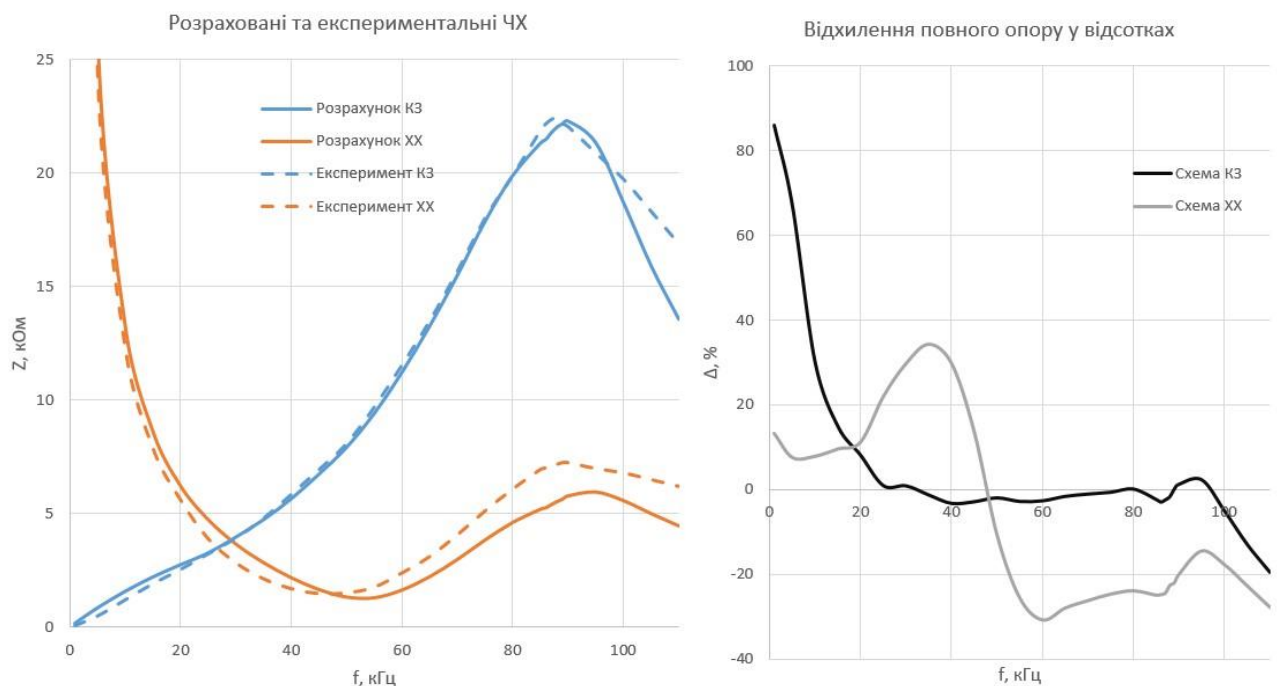


Рисунок 3.14 – Порівняння теоретично розрахованих та експериментально знятих частотних характеристик.

Варто також зазначити, що обрана схема заміщення та проведений розрахунок є справедливим та достатньо точним лише для частот до 100 кГц. Щоб точно розрахувати повний опір для вищих значень частоти необхідно вносити зміни у залежності від частоти інших параметрів (в тому числі враховувати збільшення опору обмотки R_m через явище витіснення струму), а також змінювати схему додаванням нових параметрів та складових, які будуть проявлятися на вищих значеннях частоти.

Аналізуючи отриманий результат на рис. 3.14 можна зробити ряд висновків. По-перше для обох варіантів під'єднання до обмотки при збільшенні частоти вище 100 кГц спостерігається суттєве відхилення яке прямує до збільшення при

прямуванні у бік вищих частот, що вказує на те, що обраний підхід не підходить для розрахунку та дослідження процесів коли частота вимірюється у сотнях кілогерц і вище. По-друге для схеми КЗ у діапазоні від 20 до 100 кГц спостерігається висока відповідність теоретичної та дослідної кривих, а при зниженні частоти нижче 20 кГц поступово зростає відхилення, що може бути пов'язано з низькою точністю вимірювання малих значень повного опору обраним способом проведення досліджень. По-третє відхилення для другого варіанту під'єднання генератора має значно більші значення. Частково це знову ж таки пов'язано зі зниженням точності вимірювання при зниженні опору, але також з характеру зміни двох кривих порівнюючи їх можна помітити, що резонансна частота у цьому випадку суттєво змінюється, а експериментальна крива досліду XX зсунута по відношенню до розрахованої у бік менших частот. Це можна пояснити більшим впливом різниці у ємності на характеристику для схеми початок-корпус.

3.4. Висновки

За результатами виконання експериментальних досліджень та обробки отриманих даних було уточнено високочастотні параметри асинхронного двигуна 4А80А4. Визначено, що з власних параметрів фази при зміні частоти суттєво змінюються повздовжні параметри, такі як індуктивність L та активний опір R . З взаємних параметрів разом з індуктивністю змінюється і взаємна індуктивність. Отримані графіки з значеннями всіх параметрів за різного значення частоти наведені на рис. 3.5.

Було безпосередньо експериментально досліджено зміну повного опору обмотки Z від частоти. Знято такі криві для всіх трьох фаз за допомогою двоканального портативного осцилографа і генератора сигналів. Здійснено аналіз отриманих графіків, за результатами якого можна зробити висновок про високу достовірність і якість отриманих результатів.

Для більш швидкого зняття частотних характеристик створено прототип приладу для вимірювання повного опору. За допомогою нього проведено цілий ряд досліджень, та суттєво покращено розуміння тої інформації, яку несуть у собі

частотні характеристики та те як вони будуть змінюватись при тих чи інших впливах на двигун та його ізоляцію. З отриманих результатів стає зрозумілою можливість використання обраного підходу для діагностики електрообладнання та аналізу його стану.

ВИСНОВКИ

З самого початку роботи над поставленим завданням було зрозуміло складність даної тематики та такого роду досліджень. В умовах суттєвих технічних обмежень та порівняно невеликої кількості інформації у відкритих джерелах провести необхідні дослідження та уточнити частотні параметри досліджуваного двигуна 4A80A4 є непростю задачею, проте на мою думку вона виконана.

В результаті визначено залежності індуктивності обмотки L та активного опору R від частоти. Визначено не тільки основні параметри, а і значення ємності між двома фазами та взаємної індуктивності між фазами. Характер зміни індуктивності L та активного опору R відповідають наведеним у літературі аналогічним кривим для інших асинхронних двигунів, що вказує на адекватність отриманих результатів.

За отриманими параметрами було проведено розрахунок амплітудно і фазочастотних характеристик одноланкової схеми заміщення за різних варіантів під'єднання до обмотки. Порівнюючи отримані результати з виміряними на рис. 3.14 можна зробити висновок про досить високу відповідність і відповідно правильність проведеного розрахунку. Певні відхилення пов'язані з похибкою вимірювання повного опору а також похибкою визначення самих параметрів. Окрім того частково відхилення пов'язані з недосконалістю самої одноланкової схеми заміщення, яка лише наближено моделює обмотку.

Проведено цілий ряд досліджень високочастотних процесів за допомогою цифрового двоканального осцилографа DSO2512G з вбудованим генератором сигналів. В результаті здійснено порівняння всіх трьох фаз, в результаті якого виявлену певну розбіжність між їх резонансними частотою та повним опором. Відмінність є не суттєвою і може бути пов'язана з наявними невеликими локальними дефектами ізоляції та не симетрією фаз.

Було створено пристрій для швидкого та зручного зняття частотних характеристик, за допомогою якого проведено цілий ряд експериментальних досліджень та отримано ґрунтовні результати. Вони вказують по-перше на

можливість ідентифікації залежних від частоти параметрів шляхом додавання паралельно обмотці ємності, а по-друге на можливість діагностування стану ізоляції обмотки шляхом порівняння частотних характеристик до і після появи дефекту.

Звісно охопити всі питання та провести всі можливі дослідження в межах однієї роботи неможливо, тому було зроблено лише основні. Аналізуючи всю пророблену роботу можна однозначно зробити висновок про великий потенціал та актуальність даної тематики. При наявності відповідного високоточного вимірювального обладнання та якісної і точної моделі обмотки можна отримати дуже багато різної корисної інформації про стан електричної машини та зробити відповідні правильні висновки і за потреби вчасно відреагувати та здійснити обслуговування обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В. І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.
2. Теоретичні основи електротехніки : підручник / В. С. Маляр. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 416 с.
3. Удосконалена високочастотна модель асинхронного двигуна / В.В. Чумак, О.В. Вишневський, А. С. Стулішенко, Є. С. Ігнатюк // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2018. - № 3 (53). – С. 151-156. – Бібліогр.: 6 назв.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А 90 А.Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 248 с.
6. LCR Handheld Bridge Instruction for Use, URL: <https://www.easttester-cn.com/uploads/ET430-HANDHELD-NEW-COMPACT-LCR-METER-USER-MANUAL.pdf> (дата звернення 06.06.2024).
7. High Precision Instek LCR-821 Datasheet, URL: https://www.artisanng.com/info/instek_lcr_821_datasheet.pdf (дата звернення 06.06.2024).
8. IM3570 Impedance Analyzer, URL: <https://www.hioki.com/download/33068> (дата звернення 06.06.2024).
9. 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.
10. 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.

11. G. Grandi, D. Casadei, and A. Massarini, "High frequency lumped parameter model for AC motor windings," in Proc. EPE Conf., Trondheim, Norway, 1997, vol. 2, pp. 578-583.
12. Bi C., Jia K., Wu Y., Dong L., Li H., Yao W. Liu G., and Zhang H., "High-frequency electric-motor modelling for conducted CM current prediction in adjustable speed drive system," 2018.
13. A.Boglietti, E.Carpaneto, Induction Motor High Frequency Model, IEEE Industry Applications Conference, 1999.
14. Electromagnetic Transients in transformer and Rotating Machine Windings. Charles, Q. Su, 2007.