

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електромеханіки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

в.о. завідувача кафедри

_____ М.А. Коваленко
підпис ініціали, прізвище

“25” травня 2026 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

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

освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

на тему: **Виявлення дефектів міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя електричних машин**

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕМ-41мн

_____ Павленко Сергій Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ Доцент, к.т.н., Коваленко М.А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____ Зав. каф. АЕМС-ЕП, д-р.т. наук, доцент Ковбаса С. М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Факультет Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра Електромеханіки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

«29» вересня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: двигун типу СДН-2-17-26-16, потужність - 630 кВт, напруга - 6000 В, кількість фаз - 3, кількість полюсів - 16, синхронна частота обертання - 375 об/хв, ККД - 92,9%.

4. Зміст магістерської дисертації (перелік завдань, які потрібно розробити): літературний пошук за темою дисертаційного дослідження; дослідження методів контролю стану магнітопроводу та розробка чисельної математичної моделі для діагностики дефектів міжлистової ізоляції магнітного осердя статора двигуна СДН-2-17-26-16; розробка геометричної моделі шихтованого осердя в AutoCAD; налаштування параметрів мультифізичного моделювання в COMSOL Multiphysics для розрахунку локальних магнітних полів; дослідження чутливості запропонованого методу до виявлення дефектів різного типу; Висновки по роботі. Подана до публікації стаття на тему «Діагностування асинхронних двигунів за аналізом вібраційних характеристик» до випуску журналу № 2 (2026): Електротехніка та Електроенергетика.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація за матеріалами магістерської дисертації (10 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 05.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення проблеми. Аналіз літературних джерел щодо деградації міжлистової ізоляції. Постановка задачі діагностики активної сталі статора.	05.09.2025-28.01.2026	
2	Дослідження засобів проведення методу діагностики. Освоєння роботи датчиків потенціалу магнітного поля.	29.01.2026-16.02.2026	
3	Проектування геометричної моделі двигуна. Побудова детального креслення осердя статора. Методика пошуку несправностей.	17.02.2026-15.03.2026	
4	Комп'ютерне моделювання в COMSOL Multiphysics. Створення скінченноелементної моделі, налаштування фізичних параметрів сталі та симуляція магнітних полів у зонах дефектів.	16.03.2026-01.04.2026	

5	Обробка отриманих результатів, аналіз та порівняння результатів.	02.04.2026-10.04.2026	
6	Формування методики впровадження методу у систему технічного обслуговування на основі даних комп'ютерного моделювання.	11.04.2026-02.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки і подача на захист	03.05.2026-15.05.2026	

Студент

(підпис)

Павленко С. Ю.

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

М.А. Коваленко

_____ (ініціали, прізвище)

Реферат

Магістерська дисертація присвячена актуальній темі: вдосконаленню методів діагностики та оцінки технічного стану магнітних систем синхронних двигунів серії СДН за допомогою методу електромагнітного контролю дефектів.

В роботі досліджено теоретичні основи виникнення локальних дефектів міжлистової ізоляції шихтованого пакета сталі та їх вплив на експлуатаційну надійність великих електричних машин. Проаналізовано переваги методу низькоенергетичного магнітного збудження. Розроблено та реалізовано алгоритм побудови геометрії статора двигуна СДН-2-17-26-16 у середовищі AutoCAD з наступною інтеграцією у програмному середовищі COMSOL Multiphysics.

Проведено серію комп'ютерних симуляцій моделі пакета сталі з керованими дефектами. Це дозволило встановити закономірності розподілу магнітних потоків розсіювання та продемонструвати чутливість датчиків до штучно створених замикань. На основі отриманих даних розроблено практичні рекомендації щодо впровадження методу у систему технічного обслуговування для переходу до ремонтів за фактичним станом.

Робота містить чотири розділи, 91 сторінок та 43 рисунків.

Ключові слова: Синхронний двигун СДН; метод EL CID; міжлистова ізоляція; магнітопровід; COMSOL Multiphysics; AutoCAD; діагностика активної сталі; дефекти магнітопроводу.

Abstract

The master's thesis is devoted to a topical topic: improving methods for diagnosing and assessing the technical condition of magnetic systems of synchronous motors of the SDN series using the method of electromagnetic defect monitoring.

The paper investigates the theoretical foundations of the occurrence of local defects in the interlayer insulation of a stacked steel package and their impact on the operational reliability of large electrical machines. The advantages of the low-energy magnetic excitation method are analyzed. An algorithm for constructing the geometry of the SDN-2-17-26-16 motor stator is developed and implemented in the AutoCAD environment with subsequent integration in the COMSOL Multiphysics software environment.

A series of computer simulations of a steel package model with controlled defects were conducted. This allowed us to establish the patterns of distribution of magnetic fluxes of scattering and demonstrate the sensitivity of sensors to artificially created short circuits. Based on the data obtained, practical recommendations for implementing the method into the maintenance system for the transition to repairs according to the actual condition were developed.

The work consists of four sections, 91 pages and 43 figures.

Keywords: Synchronous motor SDN; EL CID method; inter-sheet insulation; magnetic core; COMSOL Multiphysics; AutoCAD; diagnostics of active steel; magnetic core defects.

Зміст

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів	9
Вступ.....	10
Розділ 1 Огляд існуючих методів та засобів діагностування магнітного осердя та їх ушкоджень	14
1.1 Огляд існуючих методів діагностування	15
1.2 Конструкції шихтованих магнітних осердь та роль міжлистової ізоляції у забезпеченні надійності електричних машин	21
1.3 Аналіз наслідків пошкодження ізоляції та їх вплив на експлуатаційний ресурс.....	25
1.4 Фізична природа та механізми виникнення дефектів ізоляції	27
1.5 Концепція крайових задирок як причина міжшарових дефектів.....	29
1.6 Висновок до розділу 1	31
Розділ 2 Теоретичні основи та математичне моделювання електромагнітних процесів у шихтованих магнітних осердях з дефектами міжлистової ізоляції.....	33
2.1 Математична постановка задачі моделі шихтованого осердя за наявності короткозамкнених пластин.....	34
2.2 Розподіл вихрових струмів у зоні дефекту міжлистової ізоляції.....	37
2.3 Результати чисельного розрахунку електромагнітного поля для візуалізації зон розсіювання потоку в місцях пошкоджень.....	39
2.4 Математична модель дефектів магнітного осердя	47
2.5 Висновки до розділу 2	49
Розділ 3 Розробка методу та алгоритму виявлення дефектів	51
3.1 Обґрунтування вибору інформативних параметрів	52
3.2 Опис запропонованого методу та пристрою діагностування.....	54
3.3 Розробка алгоритму автоматизованої обробки сигналів для ідентифікації місця та ступеня пошкодження.....	56

3.4 Результати розрахунку електромагнітного поля в зоні дефектів магнітного осердя.....	57
3.5 Висновки до розділу 3	67
Розділ 4 Чисельні імітаційні дослідження дефектів магнітного осердя.....	68
4.1 Досліджувані дефекти шихтованого осердя	68
4.2 Результати моделювання дефектів магнітного осердя.....	72
4.3 Оцінка чутливості та похибки запропонованого методу до виявлення дефектів	78
4.4 Розробка практичних рекомендацій щодо впровадження методу в систему технічного обслуговування електричних машин.....	81
4.5 Висновки до розділу 4	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
Перелік посилань.....	86

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

СМ - синхронна машина;

ЕМ - електрична машина;

ЕД - електродвигун;

КЗ - коротке замикання;

EL CID - Electromagnetic Core Imperfection Detection;

ККД - коефіцієнт корисної дії;

МП - магнітне поле;

МСЕ - метод скінченних елементів;

МРС - магніторушійна сила;

ЕП - електропривод;

ЧС - частота струму.

Вступ

У сучасному промисловому секторі потужні електричні машини є фундаментом енергозабезпечення та механізації виробничих процесів. Високовольтні синхронні двигуни, зокрема серії СДН, відіграють стратегічну роль у приводі насосних агрегатів, компресорів та вентиляційних установок на об'єктах критичної інфраструктури. Надійність роботи таких машин безпосередньо залежить від стану їхньої електромагнітної системи, яка в процесі тривалої експлуатації піддається інтенсивному впливу термічних, механічних та електричних факторів.

Одним із найскладніших аспектів старіння електричних машин є деградація міжлистової ізоляції активної сталі статора. Як свідчать результати досліджень, багаторазові капітальні ремонти, пов'язані з перештампуванням або заміною обмоток, призводять до незворотних змін властивостей сталевих пакетів. Замикання кромки листів електротехнічної сталі спричиняє зростання втрат на вихрові струми, що порушує тепловий режим машини. Це не лише знижує коефіцієнт корисної дії, а й може призвести до катастрофічних наслідків, відомих як пожежа в залізі, що робить подальшу експлуатацію двигуна неможливою.

Вирішальним етапом у забезпеченні довговічності потужних машин є вдосконалення методів їхньої діагностики. Традиційні випробування на кільцеве намагнічування вимагають значних енерговитрат та створюють ризик перегріву статора під час самого тесту. У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є впровадження методу виявлення електромагнітних дефектів осердя (Electromagnetic Core Imperfection Detection [1]). Ця технологія дозволяє виявляти локальні дефекти при низьких рівнях магнітного збудження, що забезпечує безпеку обладнання та високу точність локалізації пошкоджень ще на ранніх стадіях їх виникнення.

Актуальність теми дослідження обумовлена зростаючою потребою в забезпеченні надійної та безаварійної експлуатації потужних електродвигунів, які є ключовими елементами енергетичного та промислового комплексу

України. Дефекти міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя є однією з поширених і небезпечних прихованих несправностей. Вони призводять до локальних перегрівів, зростання втрат енергії, зниження ККД та можуть спричинити важкі аварії. Традиційні методи діагностики вимагають високих енергозатрат і створюють додаткові ризики для обладнання. Тому розробка та вдосконалення сучасних, точних і неінвазивних методів діагностики, зокрема на основі електромагнітного контролю є важливим кроком до впровадження стратегії технічного обслуговування за фактичним станом, підвищення надійності критичного обладнання та зниження експлуатаційних витрат.

Сучасна інженерна практика потребує інтеграції методів фізичної діагностики з цифровими технологіями моделювання. Використання програмних комплексів, таких як AutoCAD та COMSOL Multiphysics, дозволяє створити точні цифрові прототипи магнітопроводів та дослідити поведінку електромагнітного поля в зонах прихованих дефектів. Такий підхід дає змогу верифікувати результати діагностики без проведення дороговартісних натурних експериментів, що є особливо важливим для машин великої потужності, дані про конструктивні особливості яких можуть бути частково втрачені або застарілі.

Об'єктом дослідження є магнітна система синхронного двигуна серії СДН-2-17-26-16 та процеси виникнення вихрових струмів у його активній сталі.

Предметом дослідження є методологія ідентифікації дефектів міжлистової ізоляції статора за допомогою електромагнітного контролю та комп'ютерного моделювання.

Мета роботи полягає у підвищенні надійності роботи потужного електромеханічного обладнання та ефективності діагностики шихтованого магнітного осердя сталі потужних електродвигунів шляхом аналізу чутливості індукційного методу до різних типів дефектів через чисельне імітаційне моделювання.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити низку взаємопов'язаних завдань, що охоплюють як теоретичні, так і прикладні аспекти дослідження:

- Провести літературний пошук за темою дисертаційного дослідження;
- Дослідити існуючі методи контролю стану магнітопроводу та розробити чисельну математичну модель для діагностики дефектів міжлистової ізоляції магнітного осердя статора;
- Розробити геометричну модель шихтованого осердя статора;
- Задати параметри для мультифізичного моделювання в COMSOL Multiphysics для розрахунку локальних магнітних полів та вихрових струмів у зонах дефектів;
- Виконати дослідження чутливості запропонованого методу електромагнітного контролю до дефектів різного типу та локалізації;
- Розробити практичні рекомендації щодо впровадження методу в систему технічного обслуговування електричних машин;
- Сформулювати загальні висновки за результатами дослідження.

На базі розробленої геометрії планується проведення серії віртуальних експериментів у програмному комплексі COMSOL Multiphysics для ідентифікації широкого спектра поверхневих та прихованих дефектів магнітопроводу. Це дозволить кількісно та якісно оцінити чутливість методу діагностики до семи різних типів локалізації замикань, виявивши найбільш складні для фіксації зони. Підсумковим етапом стане розробка практичних рекомендацій щодо впровадження отриманих результатів у систему технічного обслуговування електричних машин, що сприятиме підвищенню надійності їх експлуатації.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз літературних джерел, геометричне моделювання статора двигуна СДН-2-17-26-16 в AutoCAD, чисельне моделювання електромагнітних процесів методом скінченних елементів у COMSOL Multiphysics [2], віртуальні експерименти з сімома

типами контрольованих дефектів міжлистової ізоляції, порівняльний аналіз результатів моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- удосконалено чисельну скінченно-елементну модель магнітного осердя потужного електродвигуна з урахуванням реальної геометрії зубцево-пазової зони, яка дозволила кількісно оцінити чутливість індукційного методу до різних типів дефектів міжлистової ізоляції магнітного осердя;
- в рамках розробленої чисельної імітаційної моделі враховано наявність основних типів пошкодження магнітопроводу, що виникають у процесі його експлуатації;
- виконано системний аналіз впливу локалізації та розміру дефектів на чутливість методу.

Практична значущість отриманих результатів полягає в розробці рекомендацій щодо впровадження методу у систему технічного обслуговування потужних електродвигунів. Це дає можливість перейти до ремонтів за фактичним станом, використовувати дані моделювання як приклад для перевірки працездатності обладнання, підвищити безпеку діагностики, знизити ризик пошкоджень та скоротити витрати на ремонти завдяки точній локалізації дефектів без енергоємних випробувань.

Постановка мети та завдань проведені разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у роботі, одержано студентом особисто під керівництвом доц. кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н. Коваленко М.А.

Розділ 1

Огляд існуючих методів та засобів діагностування магнітного осердя та їх ушкоджень

Шихтоване магнітне осердя (або магнітопровід) є ключовим елементом електричних машин, таких як трансформатори, генератори та двигуни. Воно складається з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного для зменшення втрат на вихрові струми. Ушкодження осердя, такі як міжлистові замикання, бурси (задирки), пошкодження ізоляції чи механічні деформації, можуть призводити до локального перегріву, зниження ефективності, вібрацій та навіть аварійних ситуацій. Діагностика осердя важлива для забезпечення надійності та подовження терміну служби машин. Існуючі методи діагностики поділяються на офлайн (під час простою) та онлайн (під час роботи), а також на деструктивні та неруйнівні. Нижче наведено огляд основних методів та засобів, базований на сучасних дослідженнях.

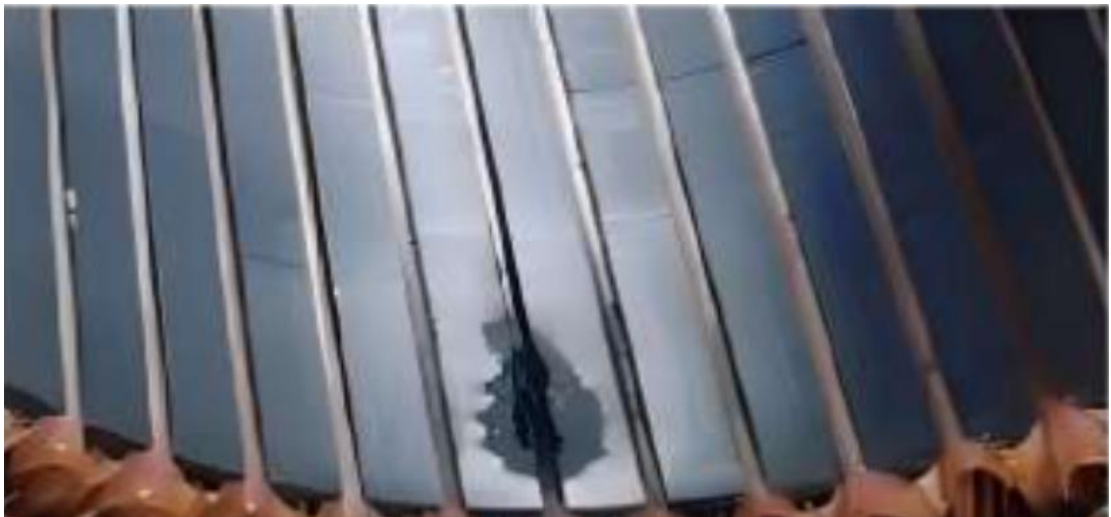


Рисунок 1.1. - Ушкодження внаслідок пробою

Перед оглядом методів діагностики варто зазначити типові ушкодження магнітопроводу. Найпоширенішими є міжлистові замикання, які виникають через пошкодження ізоляції між листами сталі та призводять до електричного контакту, появи вихрових струмів і локального перегріву. Також часто трапляються бурси та механічні пошкодження, спричинені фреттингом (тертям), забрудненнями або виробничими дефектами. Значну роль відіграють

термічні пошкодження, пов'язані з перегрівом і наступною деградацією ізоляції. Крім того, можливі ексцентриситет та асиметрія через неправильне вирівнювання ротора відносно статора, а також корозія та забруднення, що розвиваються під впливом вологи, пилу чи агресивних хімічних речовин.



Рисунок 1.2. - Механічні ушкодження

Ці ушкодження можуть ескалувати, наприклад, від локальних гарячих точок до повного руйнування осердя. [3]

1.1 Огляд існуючих методів діагностування

Існуючі методи діагностування дефектів міжлистової ізоляції шихтованих магнітних осердь електричних машин можна умовно розділити на руйнівні та неструктивні. Руйнівні методи, такі як пряме вимірювання міжлистового опору за стандартами ASTM A937 або IEC 60404, застосовуються переважно на етапі виробництва окремих листів сталі та не підходять для готових пакетів осердя або обладнання в експлуатації. Тому в практиці виробництва та обслуговування перевагу надають неструктивним методам, які дозволяють виявляти локальні короткі замикання між листами без розбирання машини.

Методи діагностики можна класифікувати за принципом дії: електромагнітні, термічні, акустичні, вібраційні та комбіновані.

У наукових дослідженнях і промисловості також розвиваються високочастотні індукційні методи. Вони ґрунтуються на тому, зі збільшенням частоти зростає інтенсивність вихрових струмів і пов'язаних із ними електромагнітних втрат, що підвищує чутливість методу до дефектів міжлистової ізоляції. При збудженні осердя високою частотою (від кількох сотень Гц до кількох кГц) навіть невеликі дефекти ізоляції викликають помітні зміни амплітуди та форми сигналу у вимірювальній обмотці завдяки прояву поверхневого ефекту. Такі методи дозволяють створювати компактні портативні пристрої для швидкої діагностики. [4]

Одним із найбільш поширених традиційних методів є кільцевий магнітний тест. Він полягає у намагнічуванні всього осердя статора допоміжною обмоткою на промисловій частоті (50/60 Гц) з індукцією, близькою до номінальної. Після стабілізації температури осердя фіксують тепловізором або контактними датчиками локальні зони перегріву. Різниця температур понад 5-10 °С вважається ознакою дефекту міжлистової ізоляції. Метод добре виявляє розвинені дефекти, але вимагає значного часу, високої потужності живлення та часткового розбирання машини, що обмежує його застосування під час експлуатації.

Високочастотний вплив (ватметровий метод) - цей метод базується на вимірюванні втрат потужності при високочастотному намагнічуванні для виявлення дефектів ізоляції. Головні переваги - висока чутливість до локальних дефектів та повна неруйнівність контролю. Серед недоліків - потреба в спеціальному обладнанні. Застосовується переважно для діагностики статорів турбогенераторів та синхронних двигунів.

Ще одним напрямком є вимірювання магнітних втрат. Осердя або його частини намагнічують і визначають загальні втрати на перемагнічування за допомогою ватметрів або цифрових систем. Збільшення втрат порівняно з нормативними значеннями вказує на наявність коротких замикань між листами. Для підвищення чутливості цей метод часто поєднують з тепловізійним контролем або аналізом на різних частотах.

Тепловізійний контроль (інфрачервона термографія) полягає у виявленні гарячих точок за допомогою ІЧ-камери під час індукції потоку (high flux ring test) на рівні 80-100% номінального потоку. Його перевагами є пряме виявлення нагріву та наочна візуалізація дефектів, тоді як до недоліків належать дуже високі вимоги до джерела живлення (до 1 МВА), підвищена небезпека проведення випробувань і обмежена ефективність у виявленні підповерхневих дефектів; метод застосовується переважно в тестах великих генераторів, часто у поєднанні з високопотокowymi випробуваннями, а також доповнюється допоміжними підходами, такими як тепловізійна діагностика в робочому режимі або під навантаженням, аналіз спектра вібрацій і шуму, а також сучасні методи на основі частотного аналізу імпедансу (FRA - Frequency Response Analysis) і алгоритмів машинного навчання для автоматизованої

Електромагнітна детекція дефектів осердя - це низькопотокowy метод контролю, при якому намагнічування осердя здійснюється на рівні приблизно 2-5% від номінальної індукції, а виявлення дефектів виконується за допомогою спеціальних сенсорів (зокрема датчика Чаттока), що реєструють локальні магнітні поля розсіювання, спричинені вихровими струмами в зонах порушення міжлистової ізоляції. До переваг методу належать висока чутливість до міжлистових коротких замикань, безпечність, відносно швидке проведення та низьке енергоспоживання, оскільки відсутній значний нагрів, тоді як недоліками є обмежена чутливість до глибоких або слабо виражених дефектів і необхідність використання моделей або досвіду оператора для точної локалізації пошкоджень; метод широко застосовується для діагностики осердь статора великих генераторів і електродвигунів, особливо під час ремонтів.



Рисунок 1.3. - Застосування методу електромагнітної детекції дефектів осердя

Віброакустичні методи - метод ґрунтується на аналізі вібрацій та шуму для виявлення асиметрії або дефектів осердя. Основна перевага - можливість моніторингу під час роботи, особливо в комбінації з MCSA (Motor Current Signature Analysis). Недоліки - висока чутливість до зовнішніх перешкод та потреба в попередніх базових даних. Застосовується переважно для діагностики індукційних моторів, зокрема для виявлення ексцентриситету.

Інжекція магнітного потоку (Flux Injection Probe, FIP) - це локальний метод діагностики, що полягає у введенні магнітного потоку в обмежену ділянку осердя за допомогою спеціального зонду з подальшим вимірюванням втрат, змін імпедансу або полів розсіювання для виявлення міжлистових дефектів. Зазвичай використовується С- або U-подібний магнітний зонд із обмоткою збудження, який локально намагнічує або навіть частково насичує досліджувану область без необхідності збудження всього осердя. До переваг методу належать висока точність локалізації дефектів, чутливість до ранніх стадій пошкоджень і можливість оцінки якості магнітного матеріалу (зокрема зерноорієнтованої сталі), тоді як основними недоліками є потреба у фізичному доступі до осердя та відносно невелика зона контролю за один вимір. Метод

застосовується для діагностики трансформаторів і електричних машин, особливо у випадках, коли потрібна детальна локальна оцінка стану осердя.[5]

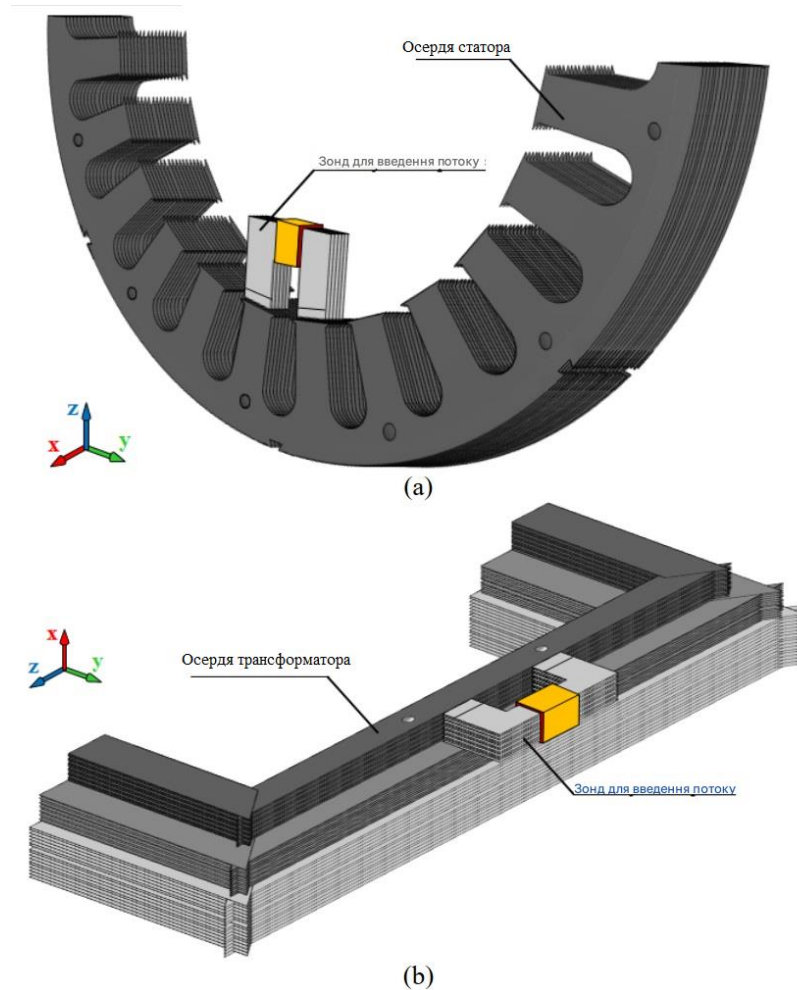


Рисунок 1.4. - Перспективний вигляд (а) осердя статора та (б) осердя трансформатора, що випробовуються зондом інжекції потоку

Аналіз струму (MCSA) та зовнішнього потоку - метод включає спектральний аналіз струму статора або зовнішнього магнітного поля для виявлення асиметрії. Серед переваг - неінвазивний характер. Недоліки - нижча чутливість до дефектів ізоляції та потреба в складних алгоритмах (часто з використанням ШП). Застосовується для індукційних моторів, добре працює в комбінації з віброакустичним аналізом.

Математичне моделювання (FE-методи) - це використання 3D-скінчено-елементних моделей для прогнозування розподілу струмів у дефектах та оцінки глибини пошкоджень. Перевага - висока точність прогнозування та допомога в інтерпретації даних від сенсорів. Недоліки - велика обчислювальна складність.

Застосовується для великих електричних машин, особливо при оцінці аксіальних зсувів фаултів.

Частотний аналіз (FRA, DFR) - метод базується на аналізі частотної характеристики для виявлення деформацій осердя. Перевага - дуже висока чутливість до структурних змін. Недоліки - потреба в еталонних (базових) вимірах. Найчастіше застосовується для діагностики трансформаторів і контролю стану ізоляції.

Кожен із розглянутих методів має свої переваги та обмеження. Традиційні методи (Ring Flux, Core Loss) забезпечують хорошу інтегральну оцінку, але малочутливі до ранніх дефектів і трудомісткі. Локальні зондові методи та високочастотні техніки пропонують високу точність і можливість локалізації пошкоджень, проте потребують спеціального обладнання та кваліфікованого персоналу. У більшості випадків найкращі результати дає комплексне застосування кількох методів.

Сучасні дослідження фокусуються на покращенні інформативності діагностики, наприклад, шляхом комбінації методів (електромагнітні та термічні) чи використання AI для аналізу даних. Для синхронних двигунів пропонуються способи оцінки пресування осердя на основі аксіальних характеристик. У високочастотних режимах акцент на виявленні дефектів зерноорієнтованої сталі.

Діагностика шихтованого осердя електричних машин є комплексним процесом, що поєднує традиційні та сучасні методи для запобігання аварій. Вибір методу залежить від типу машини, режиму роботи та доступності обладнання. Рекомендується регулярний моніторинг для раннього виявлення ушкоджень, що підвищує надійність та ефективність.[6]

Таким чином, огляд існуючих методів показує, що попри значний прогрес у діагностиці дефектів міжлистової ізоляції, залишається потреба в розробці більш універсальних, швидких, точних і недорогих рішень, придатних як для виробництва, так і для експлуатації електричних машин різної потужності.

1.2 Конструкції шихтованих магнітних осердь та роль міжлистової ізоляції у забезпеченні надійності електричних машин

Надійність та ефективність роботи електричних машин значною мірою визначається технічним станом їх основних конструктивних елементів, серед яких важливе місце займає магнітне осердя. У більшості сучасних електричних машин використовуються шихтовані магнітні осердя, що виготовляються з тонких листів електротехнічної сталі. Основною метою такого конструктивного рішення є зменшення втрат енергії на вихрові струми. Для цього кожен лист покривається ізоляційним шаром, який перешкоджає протіканню струмів між листами. Однак у процесі експлуатації ця ізоляція може пошкоджуватися, що призводить до погіршення характеристик машини. Саме тому питання виявлення дефектів міжлистової ізоляції є актуальним і важливим для забезпечення надійної роботи електричних машин.

Шихтоване магнітне осердя являє собою пакет тонких сталевих листів, товщина яких зазвичай становить від 0,3 до 0,5 мм. Кожен лист покривається спеціальним ізоляційним матеріалом, таким як лак або оксидна плівка. Завдяки цьому значно зменшуються вихрові струми, які виникають при змінному магнітному полі. Такі струми без ізоляції могли б вільно циркулювати в масивному осерді, викликаючи значні теплові втрати. Шихтування дозволяє розділити провідний матеріал на окремі ізольовані шари, тим самим підвищуючи енергоефективність і знижуючи нагрівання. Водночас якість міжлистової ізоляції є критичним фактором, що визначає ефективність цього процесу.

Циліндричне осердя статора електричних машин виконують з пазовими канавками для обмоток. Листи штампують з отворами під пази, шихтують у пакет і фіксують у корпусі (клепкою, зварюванням або клеєм). У сучасних електричних двигунах листи можуть мати складну геометрію для оптимізації магнітного потоку.

Осердя ротора виконують аналогічно статору, але часто з короткозамкненими обмотками (білчача клітка) або постійними магнітами. У великих машинах - шихтовані сегменти для зменшення маси та покращення охолодження.

Матеріал: холоднокатана електротехнічна сталь з 1-4 % кремнію (Si). Кремній підвищує питомий опір і зменшує втрати на гістерезис. Листи покривають міжлистовою ізоляцією ще до шихтування.

Міжлистова ізоляція - це тонке (1-5 мкм) діелектричне покриття на поверхні кожного листа: органічний лак (карбоксилатний, фенольний); неорганічне (фосфатне, оксидне); комбіноване (С-3, С-5 за стандартами ASTM).

Без ізоляції магнітне осердя поводить себе як суцільний провідник. Змінний магнітний потік індукує вихрові струми, які замикаються в об'ємі всього осердя. Втрати пропорційні квадрату товщини/ Втрати потужності на вихрові струми розраховують за формулою:

$$P_e = k_e \cdot f_2 \cdot B_m^2 \cdot t^2 \cdot V \quad (1.1)$$

Де:

f_2 - частота,

B_m - максимальна індукція,

t - товщина листа,

V - об'єм,

k_e – коефіцієнт.

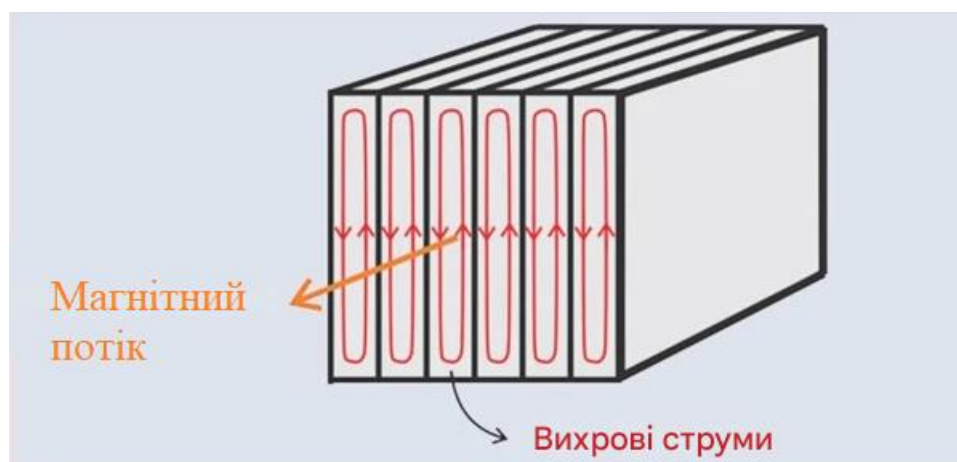


Рисунок 1.5 – Фізичні процеси в осерді

Міжлистова ізоляція відіграє ключову роль у забезпеченні надійної та довговічної роботи електричних машин. Насамперед вона суттєво знижує теплові втрати в магнітному осерді. Завдяки цьому температура осердя не перевищує допустимих меж (зазвичай 130-180 °С залежно від класу ізоляції). Це особливо важливо, адже перегрів обмоток є однією з головних причин передчасного виходу електричних машин з ладу.

Крім того, якісна міжлистова ізоляція підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД) машини на 2-5 %. Для потужних промислових двигунів і трансформаторів навіть таке, на перший погляд невелике, зростання ККД має велике економічне значення.[7]

Ізоляція надійно запобігає виникненню локальних коротких замикань між окремими листами. У разі пошкодження покриття між листами з'являються електричні мостики, по яких починають протікати значні вихрові струми. Це призводить до локального перегріву, оплавлення металу та поступового руйнування осердя.

Добре виконане шихтоване осердя з якісною міжлистовою ізоляцією має вищу механічну міцність і довговічність. Воно значно краще витримує вібрації, електродинамічні зусилля при коротких замиканнях та численні термічні цикли протягом усього терміну експлуатації.

Додатковими перевагами є зниження рівня шуму та вібрацій машини (через зменшення впливу магнітострикції та вихрових струмів), а також захист сталі від корозії, особливо завдяки фосфатним покриттям.

Якщо міжлистова ізоляція пошкоджена або неякісна, наслідки проявляються досить швидко. У трансформаторах різко зростають струми холостого ходу. Обмотки починають перегріватися, що прискорює старіння їхньої ізоляції. У результаті ресурс машини може зменшитися в 2-3 рази. У найважчих випадках це призводить до міжвиткових замикань в обмотках або навіть до повного руйнування магнітного осердя.

Таким чином, стан міжлистової ізоляції є одним із вирішальних факторів надійності та довговічності будь-якої електричної машини. Причинами виникнення дефектів міжлистової ізоляції є механічні пошкодження листів під

час складання або ремонту машини, природне старіння ізоляційного покриття, тривалий вплив високих температур, вібрації під час роботи, корозія металу, а також електричні перевантаження. Під дією цих факторів ізоляційний шар руйнується, внаслідок чого між окремими листами електротехнічної сталі виникають електричні контакти, що призводить до локальних міжлистових замикань.

Наслідки дефектів міжлистової ізоляції можуть бути досить серйозними. Порушення ізоляції між листами призводить до різкого збільшення вихрових струмів, що викликає локальний перегрів осердя, підвищення втрат потужності та зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) електричної машини. Крім того, відбувається прискорене старіння ізоляції обмоток, а в запущених випадках - ризик аварійного виходу машини з ладу. Особливо небезпечними вважаються локальні дефекти, які важко виявити на ранніх стадіях, але вони здатні спричинити значні температурні перевантаження в окремих ділянках магнітопроводу.

Для виявлення дефектів міжлистової ізоляції застосовують кілька сучасних методів діагностики. Метод магнітного потоку полягає у вимірюванні розподілу магнітного поля, при цьому наявність дефектів проявляється локальними викривленнями магнітного потоку. Тепловізійний контроль дозволяє за допомогою тепловізорів оперативно виявляти зони локального перегріву, що відповідають місцям пошкодження ізоляції. Метод струмових втрат базується на вимірюванні додаткових втрат енергії, які значно зростають при появі міжлистових замикань. Вихрострумовий метод ґрунтується на аналізі змін електромагнітного поля, спричинених вихровими струмами в дефектних ділянках. Вібраційна діагностика фіксує зміни вібраційних характеристик машини, що виникають через пошкодження осердя. Метод імпульсного намагнічування дає змогу оцінювати локальні дефекти за характером реакції матеріалу на імпульсне магнітне поле. [8]

У сучасних умовах діагностика дефектів міжлистової ізоляції активно використовує передові технології. До них належать комп'ютерне моделювання дефектів, системи онлайн-моніторингу в реальному часі, цифрова обробка

сигналів, а також застосування штучного інтелекту для глибокого аналізу даних. Завдяки цим підходам вдається значно підвищити точність діагностики та надійно виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку, що дозволяє вчасно запобігати серйозним пошкодженням і аварійним зупинкам обладнання.

Дефекти міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя є серйозною проблемою, що впливає на ефективність і надійність електричних машин. Їх своєчасне виявлення дозволяє уникнути аварій, зменшити втрати енергії та продовжити термін служби обладнання. Використання сучасних методів діагностики, зокрема тепловізійного контролю, вихрострумових методів і цифрових технологій, значно підвищує ефективність контролю технічного стану осердя.

Шихтовані магнітні осердя - це точно спроектована система, де кожен лист і кожне мікронне покриття міжлистової ізоляції безпосередньо впливають на енергоефективність і надійність усієї електричної машини. Сучасні технології (лазерне різання, прогресивне штампування, нано-покриття) дозволяють ще більше зменшити втрати та підвищити ресурс до 30-40 років безвідмовної роботи. Правильний вибір і контроль якості міжлистової ізоляції - один з найважливіших факторів при проектуванні та експлуатації електричних машин. [9]

1.3 Аналіз наслідків пошкодження ізоляції та їх вплив на експлуатаційний ресурс

Пошкодження міжлистової ізоляції (лаку, фосфатного або оксидного покриття) є однією з найнебезпечніших несправностей шихтованих магнітних осердь. Воно порушує електричну роз'єднаність між листами сталі, перетворюючи пакет на суцільний або частково з'єднаний провідник. У результаті різко зростають вихрові струми, з'являються локальні струмові петлі та концентровані теплові втрати.

У справному осерді вихрові струми замикаються лише в межах одного листа товщиною $t = 0,23 \dots 0,5$ мм. [10]

При пошкодженні ізоляції окремі листи електрично з'єднуються в групи по n штук. Ефективна товщина зростає до $n \cdot t$, а втрати - у n^2 разів. Навіть при $n = 5 \dots 10$ (що трапляється часто) додаткові втрати можуть становити 25-100 % від номінальних. Додатково з'являються втрати від великих струмових контурів між пакетами, що ще більше підвищує загальне тепловиділення.

Додаткові втрати не розподіляються рівномірно, а концентруються в зонах пошкодження. Утворюються гарячі точки, де температура може перевищувати середню температуру осердя на 50-150 °C і більше. Локальний перегрів посилюється поганою теплопровідністю сталі в поперечному напрямку та обмеженим охолодженням у глибині пакета.

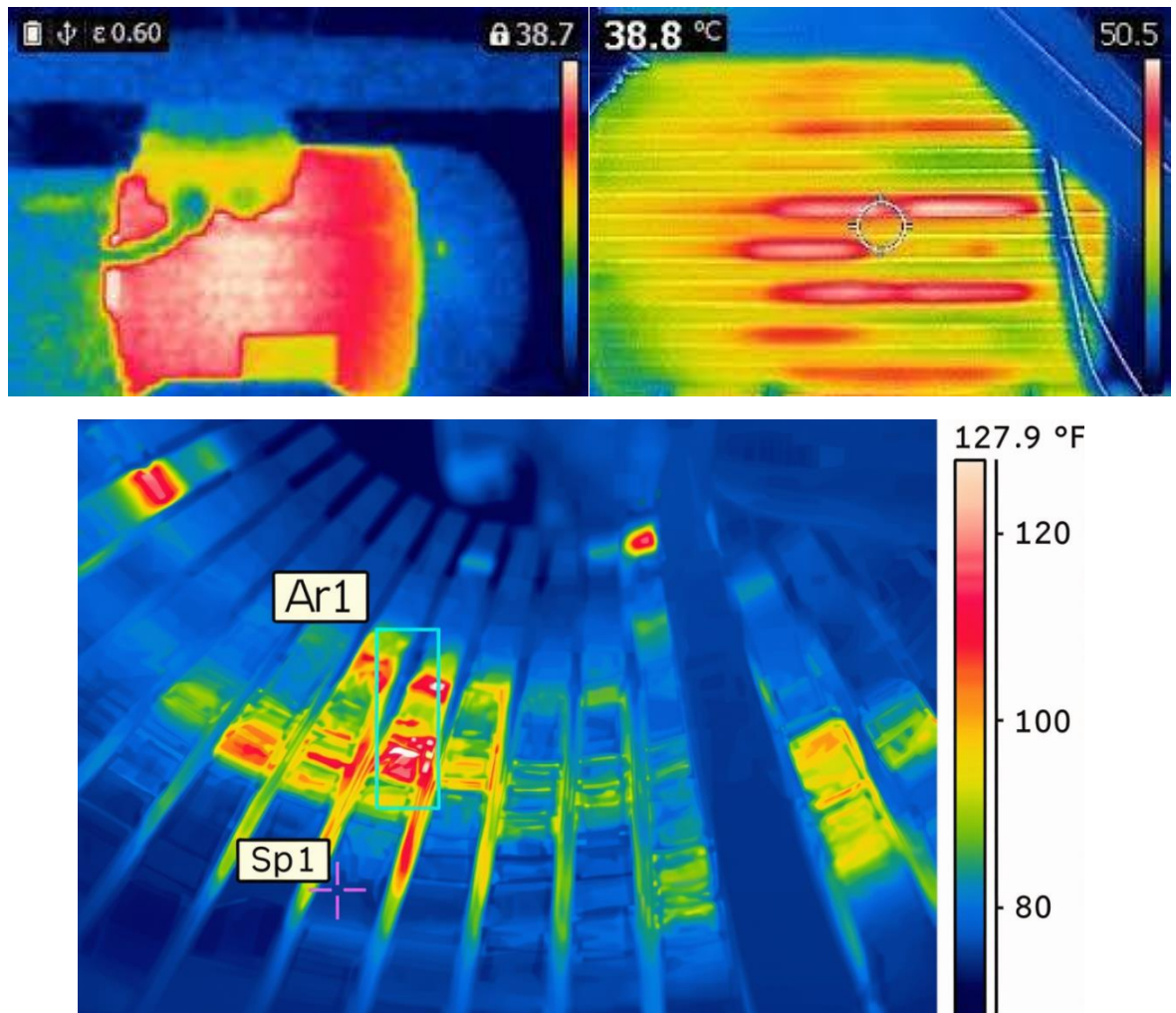


Рисунок 1.6 – Зони локального перегріву

На тепловізійних знімках такі зони чітко видно як яскраві плями на поверхні осердя або кожуха трансформатора. Локальний перегрів прискорює

окислення сталі, руйнування ізоляції обмоток і навіть може призвести до оплавлення листів. [11]

Експлуатаційний ресурс електричних машин визначається переважно станом ізоляції обмоток і магнітного осердя. Згідно з емпіричним правилом Монтсінгера (підтвердженим моделлю Арреніуса) ресурс ізоляції приблизно подвоюється/скорочується вдвічі при зміні температури на ± 10 °C.

При середньому підвищенні температури осердя на 10-20 °C ресурс зменшується в 2-4 рази. При локальних гарячих точках (+50...100 °C) ресурс може скоротитися в 8-32 рази в зоні пошкодження. Загальний ресурс машини (зазвичай 20-40 років) падає до 5-15 років, а в критичних випадках - до кількох місяців.

Додаткові наслідки, що прискорюють знос: Зростання струмів холостого ходу (на 20-100 % і більше) це додаткове навантаження на мережу живлення; Прискорене старіння ізоляції обмоток через підвищену температуру; Збільшення вібрацій і шуму (магнітострикція та електродинамічні сили); Корозія та механічна деформація осердя.

У реальних випадках пошкодження ізоляції призводить до видимого обвуглення та розшарування пакетів сталі

Пошкодження міжлистової ізоляції - це каскадна несправність: додаткові втрати, локальні перегріву, прискорене старіння, передчасний вихід машини з ладу. Навіть незначне пошкодження на 5-10 % площі осердя може скоротити ресурс у кілька разів і призвести до аварійного зупинення обладнання. Тому при ремонті та діагностиці (тепловізія, вимірювання струмів холостого ходу, випробування на міжлистові замикання) контролю стану ізоляції приділяють особливу увагу. Своєчасне виявлення дозволяє уникнути дорогого капітального ремонту або повної заміни електричної машини.[12]

1.4 Фізична природа та механізми виникнення дефектів ізоляції

Фізична природа дефектів пов'язана з деградацією діелектричних властивостей покриття під впливом сукупності факторів, які діють протягом

усього життєвого циклу осердя: від виготовлення до експлуатації. Основні механізми виникнення дефектів можна класифікувати так:

Механічні пошкодження (найпоширеніша причина на етапі виробництва та монтажу) - під час штампування, шліфування, пресування або шихтування виникають задири, мікротріщини та механічні пошкодження лакового шару. Особливо критичними є краї листів та отвори під стяжні шпильки. Механічні напруження під час пресування пакета (надмірне стиснення) або транспортування викликають деформацію покриття. У процесі експлуатації вібрація та електродинамічні зусилля (при коротких замиканнях) призводять до тертя листів один об одного, руйнування ізоляції та утворення короткозамкнутих контурів. Механічні дефекти часто проявляються як локальні контакти, що збільшують вихрові струми в 5-10 разів у дефектній зоні.

Термічне старіння та перегрів - підвищена температура (понад 120-150 °C для органічних лаків) прискорює термоокислювальні процеси, призводить до полімеризації, розтріскування та втрати діелектричної міцності покриття. Локальний перегрів через вже існуючі дефекти створює позитивний зворотний зв'язок: більші вихрові струми, ще сильніший нагрів, подальше руйнування ізоляції. Термічне старіння характерне для машин, що працюють у режимах перевантаження або з поганою вентиляцією. У трансформаторах перегрів може спричинити пожежу сталі - вигорання частини листів осердя.

Електричні фактори та часткові розряди - у змінному магнітному полі при наявності мікроефектів виникають локальні електричні поля високої напруженості, що призводять до часткових розрядів. Вони руйнують молекулярну структуру покриття, утворюють провідні канали (карбонізація) та мікротріщини. Гармоніки в живильній напрузі та перехідні процеси посилюють цей ефект. У великих машинах додаткові втрати від міжлистових струмів можуть сягати значних величин, особливо при анізотропних сталях.

Корозія та хімічне руйнування - волога, що конденсується або проникає у вигляді водомасляної емульсії (у трансформаторах), разом з киснем і продуктами окислення масла викликає корозію сталі та деламінацію покриття. Кислотне середовище (підвищена кислотність масла) прискорює гідроліз і

окислення органічних компонентів лаку. У промислових умовах забруднення (хімічні речовини, пил) також сприяють хімічній деградації. Корозія часто починається з країв пакетів або зон контакту зі стяжними елементами.

Комбіновані та експлуатаційні фактори - ослаблення пресування пакета (розболчування, вібрація), вільне колювання листів, механічне стирання ізоляції. Порушення технології заземлення магнітопроводу або ізоляції стяжних шпильок/балок, утворення додаткових короткозамкнутих контурів. Термічні цикли (нагрів-охолодження), різна теплова розширення сталі та покриття, мікротріщини.[13]

Виробничі дефекти: погане знежирення перед нанесенням лаку, нерівномірність покриття, включення металевих пилю.

Наслідки розвитку дефектів міжлистової ізоляції: Зростання втрат холостого ходу (на 10-50 % і більше в зоні дефекту); Локальне підвищення температури осердя (на 20-50 °C і вище); Збільшення вібрації та шуму; Прискорене старіння ізоляції обмоток через перегрів; Ризик аварійного виходу обладнання з ладу (пожар сталі).

За даними експлуатаційної статистики, дефекти міжлистової ізоляції становлять 20-30 % від загальної кількості відмов магнітопроводів електричних машин і трансформаторів. Процес деградації має кумулятивний характер: початковий мікродефект під впливом експлуатаційних факторів швидко прогресує, що підкреслює необхідність ранньої неаструктивної діагностики.

Таким чином, фізична природа дефектів міжлистової ізоляції є багатфакторною і включає механічні, термічні, електричні та хімічні механізми, які взаємодіють і посилюють один одного. Розуміння цих механізмів є основою для вибору ефективних методів діагностики та запобігання ушкодженням.[14]

1.5 Концепція крайових задирок як причина міжшарових дефектів

При виготовленні магнітних осердь штампування та різання електротехнічної сталі до необхідних розмірів можуть викликати мікроскопічні

задирки, які є однією з найсерйозніших проблем для виробників та споживачів електротехнічної сталі. Задирки найчастіше утворюються в процесі механічної обробки в результаті пластичної деформації під час механічної обробки і визначаються як небажані виступи матеріалу за край заготівлі.

Для фізичної демонстрації концепції крайової задирки магнітні пластини із заліза (Fe) 3% Si товщиною 0,3 мм були вирізані однією гострою та однією тупою гільйотиною. Потім були виготовлені стопи з чотирьох пластин, що складаються із зразків із чистим зрізом та пластин із крайовою задиркою. Вид збоку зразків і кожної стопки було досліджено за допомогою стандартного оптичного мікроскопа ERCOLUX з роздільною здатністю 1 мкм. На рис. 1.7. с показана ідеальна конфігурація магнітного осердя, в якій пластини належним чином ізолювані одна від одної; проте на рис. 1.7. d показано міжшарове коротке замикання, викликане крайовим задиркою.[15]

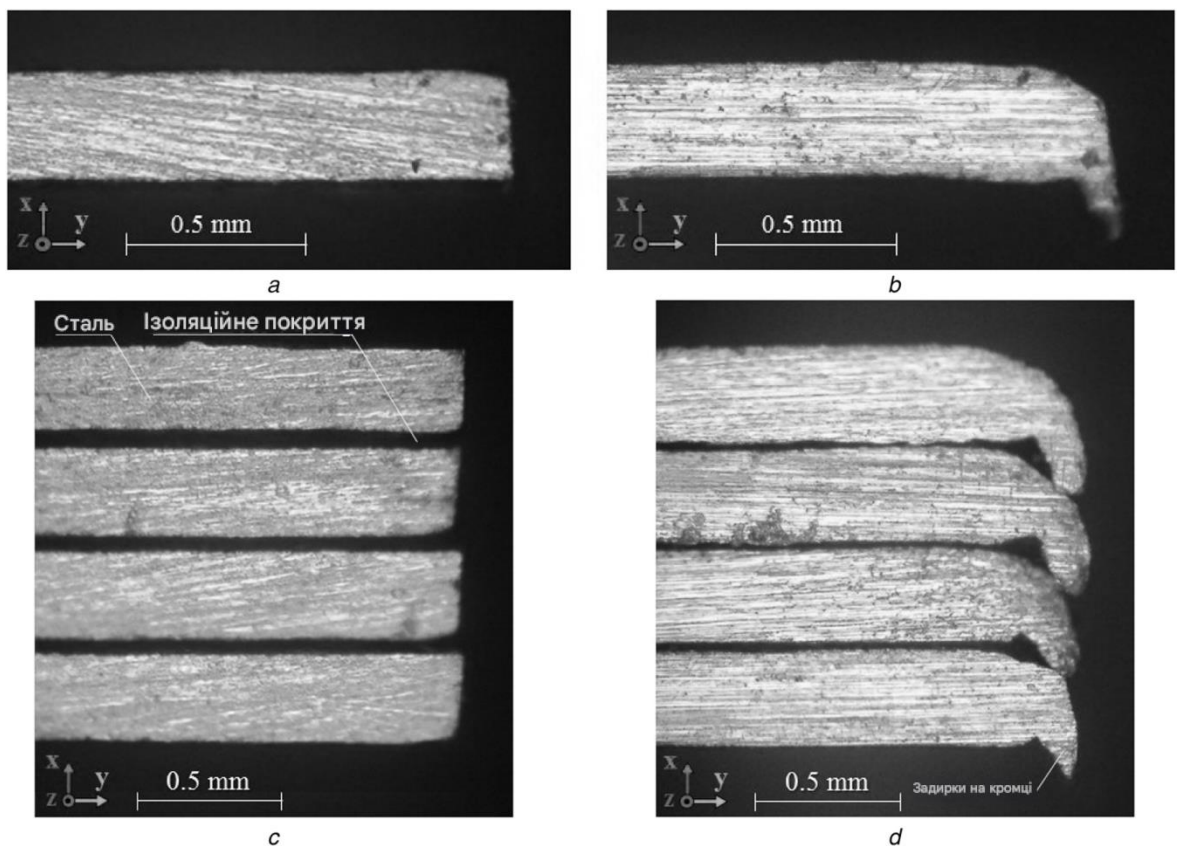


Рисунок 1.7. - Вигляд збоку окремої ламінації, розрізаної: а) Гострою; б) Тупою гільйотиною. Стопкою ламінацій з: с) Правильно розрізаними зразками; д) Зразками з задирками по краях

Висота або розмір задирок на кромці зазвичай становить 2-10% від товщини листа; однак це залежить від багатьох факторів, наприклад, гостроти інструментів, зазору між різальними кромками інструменту, товщини матеріалу, процесу різання та властивостей матеріалу. У процесах точного виробництва задирки повинні бути видалені після обробки листа за допомогою належного процесу видалення задирок. Для деяких відповідальних застосувань, наприклад, великих машин, що обертаються, операція видалення задирок після штампування або різання супроводжується нанесенням другого шару покриття на ламінати. Однак процеси видалення задирок зазвичай не дуже точні і можуть знизити точність оброблюваних деталей, пошкодити кромки або поверхню листа і створити додаткову напругу на ламінаті. Крім того, процес видалення задирок вимагає додаткового етапу обробки та додаткового часу виробництва, що призводить до додаткових витрат.[16]

1.6 Висновок до розділу 1

Проведено комплексний огляд існуючих методів та засобів діагностики магнітного осердя шихтованих електричних машин, зокрема синхронних двигунів серії СДН, з акцентом на виявлення дефектів міжлистової ізоляції.

Проаналізовано конструктивні особливості шихтованих магнітних осердь та ключову роль міжлистової ізоляції у зменшенні втрат на вихрові струми, підвищенні ККД та забезпеченні надійності машини. Показано, що пошкодження ізоляції (міжлистові замикання, крайові задирки, механічні пошкодження) призводить до суттєвого зростання локальних вихрових струмів, появи гарячих точок, додаткових втрат потужності, прискореного старіння ізоляції обмоток та значного скорочення експлуатаційного ресурсу машини - іноді в кілька разів.

Розглянуто основні механізми виникнення дефектів: механічні (задирки при штампуванні та складанні), термічні, електричні (часткові розряди), корозійні та комбіновані. Проведено класифікацію та критичний аналіз сучасних методів діагностики. Традиційні методи (кільцеве намагнічування з

тепловізійним контролем, вимірювання втрат потужності) забезпечують інтегральну оцінку стану осердя, але характеризуються високим енергоспоживанням, ризиком додаткового пошкодження ізоляції та низькою чутливістю до ранніх стадій дефектів. Сучасні перспективні методи, такі як EL CID (Electromagnetic Core Imperfection Detection), Flux Injection Probe, високочастотні індукційні методи, FRA та комбіновані підходи, дозволяють проводити контроль при низьких рівнях магнітного збудження, забезпечуючи високу чутливість і безпеку.

Кожен метод має свої сильні та слабкі сторони, тому найбільш ефективним є комплексне застосування кількох підходів. Водночас залишається актуальною потреба в розробці та вдосконаленні методів, які поєднують високу чутливість до локальних дефектів, можливість точної локалізації пошкоджень, низьку енергоємність та придатність для використання під час ремонтів потужних електричних машин.

Отримані в розділі теоретичні положення та аналіз літературних джерел створюють необхідну основу для подальшого чисельного моделювання електромагнітних процесів у пошкоджених осердях, розробки вдосконаленого алгоритму діагностики на основі методу низькоенергетичного електромагнітного контролю.

Розділ 2

Теоретичні основи та математичне моделювання електромагнітних процесів у шихтованих магнітних осердях з дефектами міжлистової ізоляції

Шихтовані магнітні осердя електричних машин виготовляються з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих між собою для зменшення вихрових струмів. Наявність міжлистової ізоляції забезпечує обмеження замкнених струмових контурів у площині, перпендикулярній до магнітного потоку, що суттєво знижує втрати енергії та нагрівання.

Електромагнітні процеси в осерді визначаються законами класичної електродинаміки, зокрема рівняннями Максвелла. При змінному магнітному полі в матеріалі осердя виникають: магнітні втрати (гістерезисні), втрати на вихрові струми, локальні струми при порушенні ізоляції.

У разі дефектів міжлистової ізоляції (коротке замикання між листами) утворюються замкнені провідні контури, в яких індукуються значні вихрові струми. Це призводить до: різкого зростання локальних втрат потужності, перегріву окремих ділянок осердя, деградації ізоляції та подальшого розвитку дефекту.

Для опису електромагнітних процесів використовується система рівнянь Максвелла у диференціальній формі. У квазістаціонарному наближенні:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

де:

$\mathbf{H}$ - напруженість магнітного поля,

$\mathbf{E}$ - електричне поле,

$\mathbf{B}$ - магнітна індукція,

$\mathbf{J}$ - густина струму.

У дефектній зоні ефективна електропровідність різко зростає через електричний контакт між листами: $\sigma_{\text{ef}} \gg \sigma_{\text{ізольованого пакета}}$

Це змінює розподіл струмів і магнітного поля.

Щільність вихрових струмів визначається законом електромагнітної індукції:

$$\mathbf{J} = \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \right) \quad (2.2)$$

де:

$\mathbf{A}$ - векторний магнітний потенціал,

φ - скалярний потенціал.

Для двовимірної моделі (часто використовується при моделюванні осердя):

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla A_z \right) = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (2.3)$$

У зоні дефекту значення σ зростає, що призводить до локального підсилення струмів.[17]

2.1 Математична постановка задачі моделі шихтованого осердя за наявності короткозамкнених пластин

Моделювання електромагнітних і теплових процесів у шихтованих магнітних осердях із дефектами міжлистової ізоляції доцільно виконувати в середовищі COMSOL Multiphysics або інших програмних забезпеченнях, які забезпечують можливість розв'язання зв'язаних мультифізичних задач. Програмне середовище дозволяє одночасно враховувати розподіл електромагнітного поля, виникнення вихрових струмів і пов'язані з ними теплові ефекти, що є критично важливим при дослідженні локальних дефектів ізоляції.

Постановка задачі полягає у визначенні просторово-часового розподілу магнітного поля, густини струмів і температури в осерді за наявності дефекту міжлистового контакту. Об'єктом моделювання зазвичай виступає або фрагмент магнітного осердя, або спрощена геометрична модель активної частини електричної машини. При цьому основна увага приділяється зоні дефекту, де відбувається різке зростання електропровідності та, відповідно, локалізація втрат. [18]

Геометрична модель створюється з урахуванням структури шихтованого осердя. У більшості випадків використовується двовимірне наближення у вигляді поперечного перерізу, що значно спрощує обчислення, але зберігає достатню точність для аналізу вихрових струмів. Для більш детального дослідження застосовується тривимірна модель, у якій можуть бути явно задані окремі листи або їх еквівалентне середовище. Дефект міжлистової ізоляції вводиться як локальна область із підвищеною електропровідністю або як контактна зона між шарами.

Фізична постановка задачі реалізується через використання інтерфейсу магнітного поля, який базується на рівняннях електромагнітного поля у формі векторного потенціалу. У рамках цього підходу визначається розподіл магнітного потенціалу, з якого обчислюються індукція та густина струмів.

У цьому рівнянні враховується вплив електропровідності матеріалу, яка суттєво змінюється в зоні дефекту. Саме ця зміна призводить до інтенсивного зростання вихрових струмів у місці порушення ізоляції.[19]

Теплові процеси моделюються шляхом розв'язання рівняння теплопровідності з урахуванням внутрішніх джерел тепла, що виникають внаслідок електромагнітних втрат. Джерело тепла визначається через добуток густини струму на напруженість електричного поля, що автоматично обчислюється в середовищі моделювання. Відповідне рівняння має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{em} \quad (2.4)$$

Таким чином, відбувається зв'язування електромагнітної та теплової задач, оскільки розподіл струмів визначає тепловиділення, а температура, у свою чергу, впливає на електрофізичні властивості матеріалів.

Задання матеріальних властивостей є одним із ключових етапів моделювання. Для електротехнічної сталі задається нелінійна залежність магнітної індукції від напруженості поля, а також електропровідність, яка може залежати від температури. Ізоляційні прошарки характеризуються дуже низькою провідністю, що забезпечує обмеження вихрових струмів у нормальному режимі. У зоні дефекту ця умова порушується, і модель повинна

відобразити перехід до провідного стану, що може бути реалізовано через зміну параметрів матеріалу або введення контактного опору.

Особливістю моделювання є необхідність коректного опису дефекту міжлистової ізоляції. У найпростішому випадку дефект задається як локальна область із підвищеною електропровідністю. Більш точний підхід передбачає використання контактних пар або тонких шарів із заданим опором, що дозволяє моделювати часткове замикання між листами. Такий підхід дає змогу досліджувати різні стадії розвитку дефекту - від початкової деградації до повного короткого замикання.

Граничні умови задаються відповідно до фізики задачі. Для електромагнітного поля можуть використовуватися умови симетрії, задані струми або магнітні потенціали, а також спеціальні умови для моделювання відкритого простору. У тепловій задачі враховується теплообмін із навколишнім середовищем, який описується через конвективні умови або фіксовану температуру на межах області.

Побудова сітки має суттєвий вплив на точність результатів, особливо в зоні дефекту, де спостерігаються великі градієнти поля та температури. Тому в цих областях використовується згущення сітки, що дозволяє більш точно відтворити локальні ефекти перегріву та концентрації струмів.

Розв'язання задачі виконується в різних постановках залежно від мети дослідження. Для аналізу нагріву в часі застосовується нестационарний розрахунок, тоді як для оцінки втрат при заданій частоті використовують частотний аналіз. Усталений тепловий режим визначається за допомогою стаціонарного розрахунку.

Аналіз результатів моделювання дозволяє отримати детальну картину розподілу магнітної індукції, густини вихрових струмів і температури. У зоні дефекту спостерігається значне зростання густини струмів, що призводить до локального перегріву, який проявляється у вигляді так званих гарячих точок. Саме ці області є найбільш небезпечними з точки зору подальшого розвитку пошкодження та можуть бути використані як діагностичний критерій.

Верифікація моделі здійснюється шляхом порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними або аналітичними оцінками. Особливо ефективним є зіставлення розподілу температури з результатами тепловізійного контролю, що дозволяє підтвердити адекватність моделі та її придатність для практичного використання.[20]

2.2 Розподіл вихрових струмів у зоні дефекту міжлистової ізоляції

Розподіл вихрових струмів у шихтованих магнітних осердях визначається дією змінного магнітного поля, яке індукуює електрорушійну силу в провідному матеріалі. У нормальному стані міжлистова ізоляція перешкоджає замиканню струмових контурів між сусідніми листами, обмежуючи величину вихрових струмів і, відповідно, втрати потужності. Проте при виникненні дефекту ізоляції утворюється локальний провідний канал, що призводить до суттєвої зміни картини струморозподілу.

Аналітичний опис вихрових струмів базується на рівняннях електромагнітного поля, де густина струму визначається через електричне поле та електропровідність матеріалу. У формалізмі векторного потенціалу густина струму може бути записана як:

$$\mathbf{J} = \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \right) \quad (2.5)$$

У випадку гармонічного магнітного поля, коли векторний потенціал змінюється за законом $\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 e^{j\omega t}$, густина струму набуває комплексного вигляду і прямо залежить від частоти поля та електропровідності середовища. При цьому у дефектній зоні, де відбувається електричний контакт між листами, ефективна електропровідність різко зростає, що призводить до локального підсилення струмів. [21]

Для спрощеного аналізу розглянемо плоску модель листа товщиною d , у якій магнітне поле змінюється гармонічно. У такому випадку розподіл вихрових струмів описується дифузійним рівнянням:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Розв'язок цього рівняння показує, що струми розподіляються нерівномірно по товщині матеріалу та концентруються поблизу поверхні, що пояснюється ефектом витіснення струму. Характерною величиною є глибина проникнення поля, яка визначає ефективну товщину провідного шару, в якому протікають струми.

У зоні дефекту міжлистової ізоляції ситуація суттєво змінюється. Якщо між листами виникає електричний контакт, то утворюється замкнений контур значно більшої площі, ніж у межах одного листа. Це призводить до збільшення індукованої електрорушійної сили та, відповідно, до зростання густини струму. При цьому струми починають протікати не лише в площині окремого листа, але й перетікають між шарами, формуючи складну тривимірну структуру.

Для кількісної оцінки густини вихрових струмів у дефектній зоні можна скористатися наближеним виразом:

$$J \approx \sigma \omega B l \quad (2.7)$$

де l - характерний розмір замкненого контуру. У випадку дефекту цей розмір суттєво збільшується, що прямо впливає на величину струму. Таким чином, навіть при незмінній амплітуді магнітного поля густина струмів у зоні дефекту може зростати в декілька разів.

Аналіз розподілу струмів показує, що максимальні значення густини спостерігаються безпосередньо в області контакту між листами. У прилеглих зонах формується градієнт струму, який швидко спадає з віддаленням від дефекту. Така локалізація струмів пояснюється тим, що дефект створює шлях із мінімальним електричним опором, через який замикається основна частина індукованих струмів.[22]

Чисельне моделювання підтверджує аналітичні оцінки та дозволяє отримати детальний просторовий розподіл густини струмів. Результати показують, що у зоні дефекту формується область із різко підвищеними значеннями J , яка має обмежені розміри, але значно впливає на загальні втрати в осерді. При цьому форма та розміри цієї області залежать від геометрії дефекту, частоти магнітного поля та властивостей матеріалу.

Зростання густини вихрових струмів безпосередньо призводить до збільшення питомих втрат, які визначаються співвідношенням:

$$P = \frac{J^2}{\sigma} \quad (2.8)$$

Оскільки густина струму входить у квадраті, навіть незначне збільшення J викликає суттєве зростання тепловиділення. Це пояснює виникнення локальних перегрівів у зоні дефекту, які можуть бути зафіксовані за допомогою тепловізійного контролю.

Розрахунок і аналіз розподілу вихрових струмів показує, що дефекти міжлистової ізоляції призводять до суттєвої перебудови електромагнітних процесів у шихтованому осерді. Локальне зростання електропровідності викликає концентрацію струмів, що, у свою чергу, обумовлює підвищені втрати та перегрів. Отримані результати є важливими для розробки методів діагностики та оцінки технічного стану електричних машин.[23]

2.3 Результати чисельного розрахунку електромагнітного поля для візуалізації зон розсіювання потоку в місцях пошкоджень

Осердя електричної машини є ключовим елементом, у якому відбувається замикання основного магнітного потоку. У нормальному стані шихтоване осердя забезпечує мінімальні втрати за рахунок ізоляції між сталевими листами, що обмежує виникнення вихрових струмів. Однак у разі пошкодження міжлистової ізоляції виникають локальні електропровідні зони, які суттєво змінюють розподіл електромагнітного поля.

Чисельний розрахунок електромагнітного поля, зазвичай виконаний методами скінченних елементів, дозволяє отримати просторовий розподіл магнітної індукції та густини струмів. У таких моделях враховуються нелінійні магнітні властивості матеріалу, геометрія осердя та наявність дефектів у вигляді зон із підвищеною провідністю між листами.

У результатах моделювання чітко спостерігається, що в місцях пошкодження міжлистової ізоляції відбувається локальне перерозподілення

магнітного потоку. Частина потоку виходить за межі основного магнітного контуру, утворюючи так звані зони розсіювання. Ці зони характеризуються підвищеними значеннями магнітної індукції поза номінальним шляхом потоку та появою замкнених контурів вихрових струмів.

Аналітично поведінку поля можна пов'язати з рівняннями Максвелла, зокрема законом індукції:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Порушення ізоляції призводить до зростання локальної провідності, що, відповідно до цього рівняння, сприяє інтенсивнішому виникненню вихрових струмів при змінному магнітному полі. У свою чергу, ці струми створюють власне магнітне поле, яке спотворює основний розподіл.

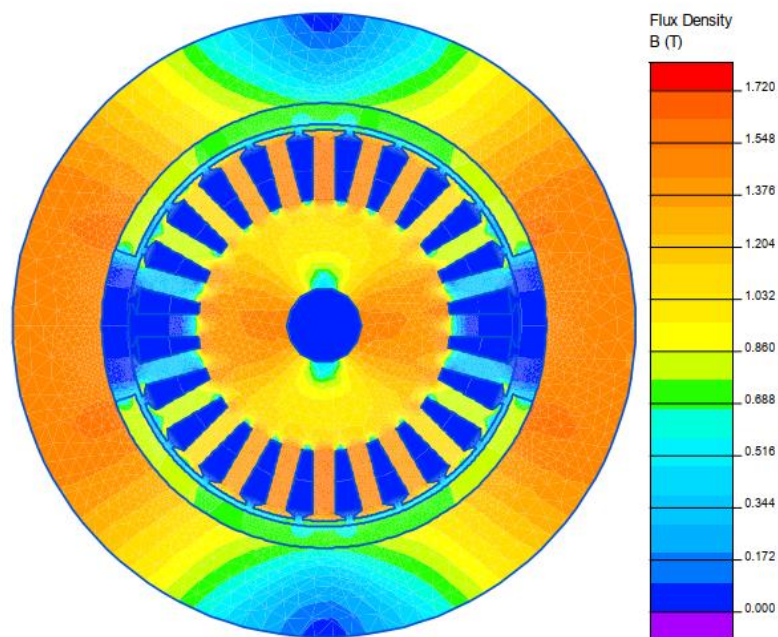


Рисунок 2.1. - Розподіл магнітної індукції.

Візуалізація результатів чисельного розрахунку зазвичай подається у вигляді: карт розподілу магнітної індукції, де видно локальні перегини силових ліній; карт густини вихрових струмів, які концентруються в зоні дефекту; векторних полів, що показують напрямки потоків розсіювання; теплових карт втрат, де дефект проявляється як зона локального перегріву.

Характерною ознакою дефекту є поява асиметрії поля: замість рівномірного розподілу магнітного потоку виникають локальні концентрації та

витік потоку в радіальному або тангенціальному напрямках. Чим більша площа пошкодження або вища провідність контакту між листами, тим інтенсивнішими є ці ефекти.[24]

Особова перевірка була проведена з використанням COMSOL Multiphysics для вивчення впливу міжшарового короткого замикання, викликаного задирками на краях, на конфігурацію магнітних осердь. Потім модель моделювання було розширено за рахунок обліку міжшарових дефектів навколо отворів для болтів. У цій роботі розглядалася стопка з чотирьох ламінатів, схильних до впливу зовнішнього магнітного поля, що змінюється в часі, з частотою 50 Гц. Ламінати були змодельовані із сталі з 3% кремнію (Si). Часткові блоки з того ж матеріалу, що і ламінат, були імплантовані для моделювання міжшарового дефекту, викликаного задирками на краях. Враховуючи теоретичну основу проникнення щільності потоку в магнітні ламінати [25], кожен стос ламінатів була намагнічена при типовій пікової поверхневої щільності потоку $B_{pk} = 1,5 \text{ Т}$. Модель вимагає дуже дрібної сітки і, отже, тривалого часу обчислень, ~ 3 . Розподіл вихрових струмів у пакеті з міжшаровим дефектом тільки з одного боку, з обох сторін між отвором для болта і однією стороною, а також комбінація останніх двох випадків показані на рис. 2.2. а - d відповідно.

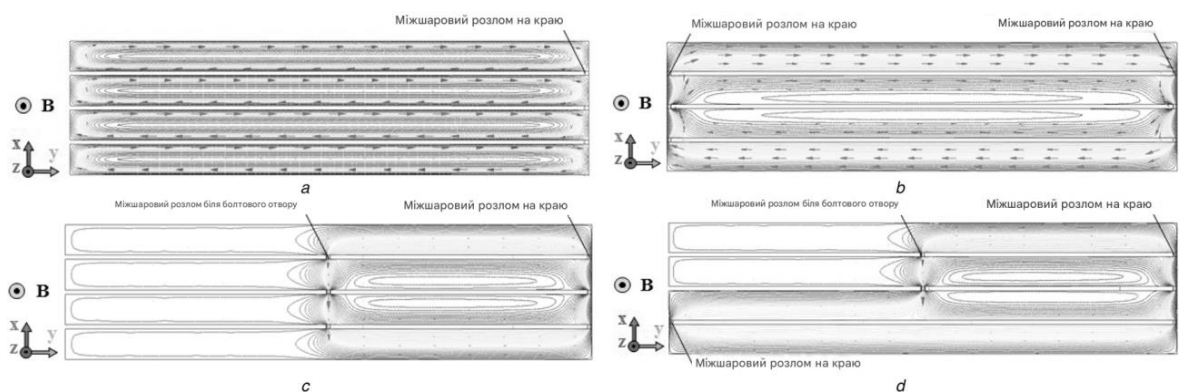


Рисунок 2.2. - Розподіл вихрових струмів у пакеті: а) З дефектом лише з одного боку; б) З дефектом з обох боків; в) З дефектом на отворі для болта та одному краю; д) Комбінація дефектів б та в.

З результатів кінцево-елементного аналізу, представлених на рис. 2.2, можна зробити чотири важливі висновки:

1) Міжшаровий дефект на одній стороні магнітних осердь не створює петлю струму короткого замикання і, отже, не впливає на нормальний розподіл вихрових струмів в окремих пластинах і втрати потужності через вихрові струми.

2) Петлі струмів короткого замикання змінюють конфігурацію магнітних осердь, роблячи їх схожими на суцільне осердя, що призводить до міжшарових струмів короткого замикання та утворення більших петель вихрових струмів у закорочених пластинах.

3) Міжшарові дефекти між отворами для болтів і однією стороною пакета створюють меншу петлю струму короткого замикання (рис. 2.2. с). У цьому випадку струми короткого замикання протікають між точками дефектів і частинами сталі, які закорочені цими точками. Вихрові струми в інших частинах сталі практично рівними нулю, оскільки міжшарові дефекти навколо отвору для болта утворюють короткий шлях з меншим опором для протікання міжшарового струму короткого замикання.

4) Щільність вихрових струмів у місцях закорочених ділянок значно вища, ніж у проміжних пластинах, що призводить до високих локальних втрат потужності та сильного локального нагрівання. Це основна причина пошкодження магнітних осердь, схильних до міжшарових дефектів.

В результаті дослідження впливу міжшарових дефектів на характеристики електричних машин є найважливішою вимогою на етапах проектування та виробництва. Також необхідні надійні та точні методи для виявлення руйнівних дефектів та дослідження їх впливу на характеристики магнітних осердь електричних машин та інших магнітних пристроїв.[26]

Часткові міжшарові пошкодження в статорних осердях обертових машин можуть бути більш руйнівними, ніж ушкодження трансформаторних осердь, оскільки пластини статорних осердь зварюються або скріплюються між собою або шпонками або корпусом біля основи статорного ярма. Шпонки можуть бути, але не завжди, ізольовані від пластин або рами статора, щоб запобігти

перебігу струму між осердями та рамою; однак, якщо цього не відбувається, це створює постійне коротке замикання на зовнішній стороні осердя. Тому, якщо пластини статора закорочені одна на одну, навіть тільки з одного боку, у струмовій петлі короткого замикання, що складається з точки пошкодження, закорочених пластин і шпонок, зварних швів або корпусу, можуть бути індуковані міжшарові струми короткого замикання. Для розрізнення руйнівних пошкоджень на малюнках показаний перспективний вид плеча трансформатора з трьома можливими міжшаровими ушкодженнями та статорно-роторного осердя з чотирма можливими міжшаровими ушкодженнями. На рисунку 2.3 (а, b) відповідно показано розподіл магнітного потоку в осердях трансформатора та статора-ротора, а також петлі струмів короткого замикання, отриманий за допомогою двовимірного моделювання методом кінцевих елементів (МКЕ). Результати представлені на рисунках 2.3. (с, d) відповідно.[27]

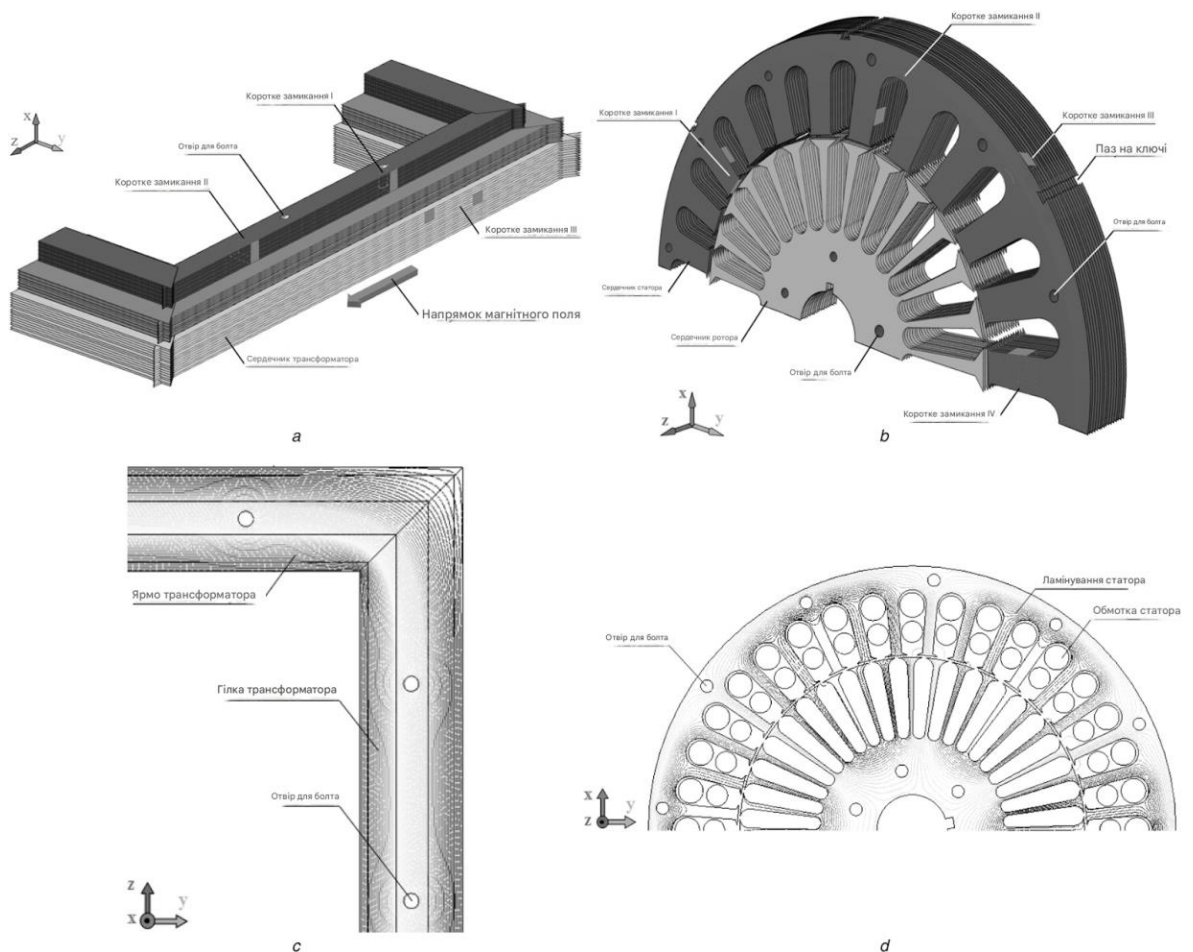


Рисунок 2.3. - Загальний вигляд: а) Магнітопровід трансформатора з міжшаровим коротким замиканням у трьох можливих положеннях; б) Осердя статора-ротора з міжшаровим коротким замиканням у чотирьох можливих

положеннях. Шлях замикання магнітного потоку в: с) Осердя трансформатора;
d) Трифазний шестиполосне осердя статора-ротора.

На рис. 2.3. а коротке замикання I утворюється між отвором для болта і однією стороною сходинок осердя, а коротке замикання II між двома сторонами сходинок осердя. Обидва ці дефекти перпендикулярні до напрямку магнітного потоку в осерді і, отже, створюють петлі струму короткого замикання. Коротке замикання III, з іншого боку, відповідає визначенню петлі струму короткого замикання, оскільки воно утворює замкнуту петлю, перпендикулярну напрямку магнітного потоку в осерді.

Враховуючи розподіл щільності магнітного потоку в осерді статора, ні короткі замикання I, ні II на рис. 2.3. d не перетинають лінії магнітного потоку і, отже, не відповідають визначенню петель струму короткого замикання. З іншого боку, короткі замикання III і IV утворюють замкнуті петлі струму, перпендикулярні до напрямку магнітного потоку в ярмі і зубці відповідно, і, отже, створюють петлі струму короткого замикання в осерді. Однак, якщо зовнішня сторона осердя статора закорочена шпонкою або рамою статора, короткі замикання I і II створюють петлі струму короткого замикання в осерді.[28]

У практиці міжшарові дефекти виникають у довільних місцях. Для моделювання такого роду дефектів було створено пакет із чотирьох шарів, закорочених у ступінчастій конфігурації з міжшаровим дефектом між двома шарами на кожному кроці (рис. 2.4. а). Для підтвердження результатів був підготовлений ще один пакет із чотирьох шарів із концентрованим дефектом у центрі пакета (рис. 2.4. б). На рис. 2.4. с показана залежність втрат потужності, що супроводжуються номінальними втратами матеріалу, від пікової щільності магнітного потоку на різних частотах.[29]

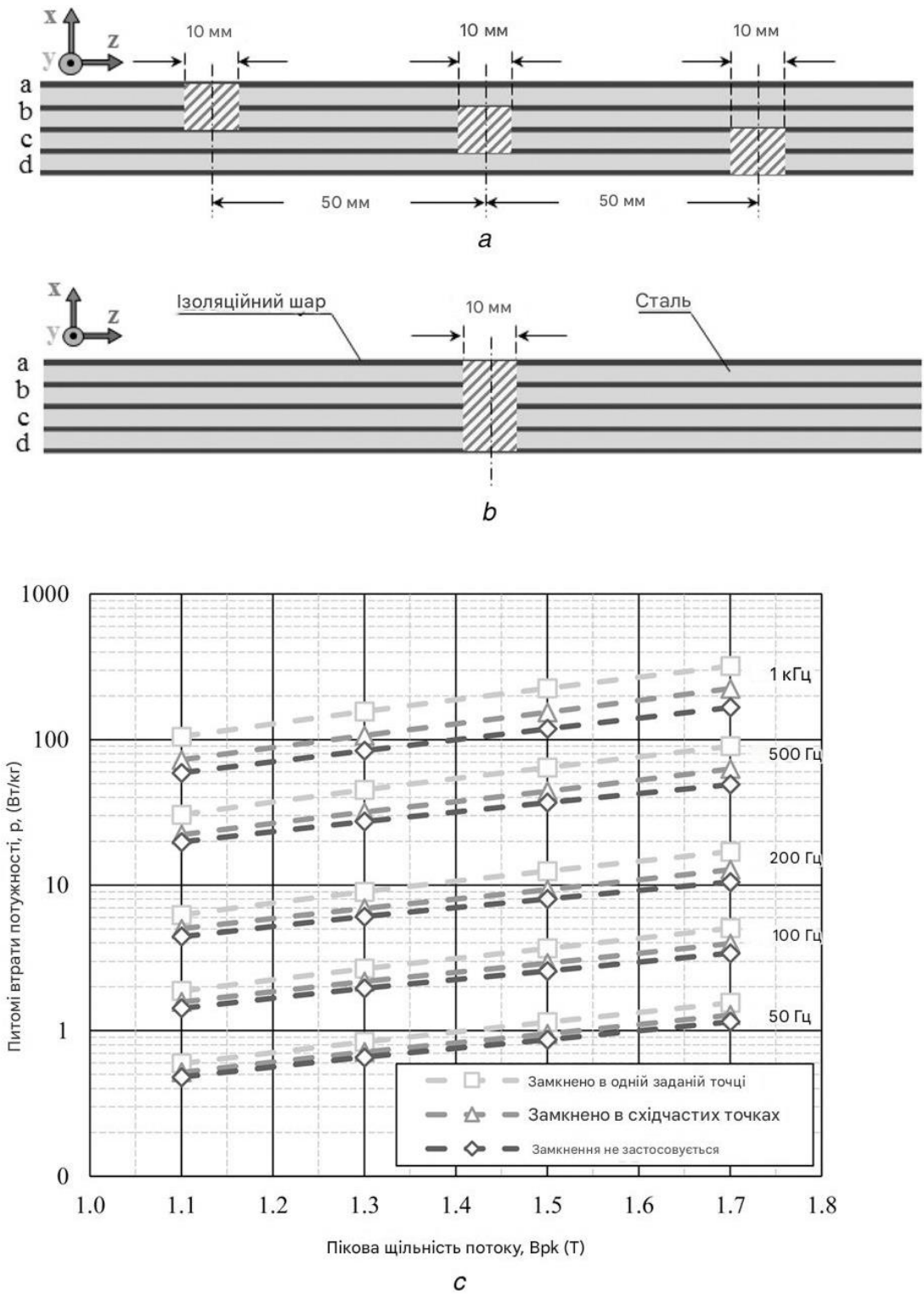


Рисунок 2.4. - Вид збоку пакет з чотирьох шарів з міжшаровим коротким замиканням: а) Три ступінчасті точки; б) Одна задана точка; в) Загальні втрати потужності, спричинені штучними несправностями, відносно пікової щільності потоку на частотах намагнічування 50-1000 Гц.

Хоча обох конфігураціях всі шари закорочені, загальні втрати потужності пакета з міжшаровим дефектом у трьох ступінчастих положеннях менше, ніж з міжшаровим дефектом концентрованої точки. Причина пов'язані з характером петель струму короткого замикання, створюваних штучними короткими замиканнями. Для прояснення цього питання було виконано двовимірне моделювання методом кінцевих елементів частотах 50 і 1000 Гц. Результати показано на рис. 2.5.

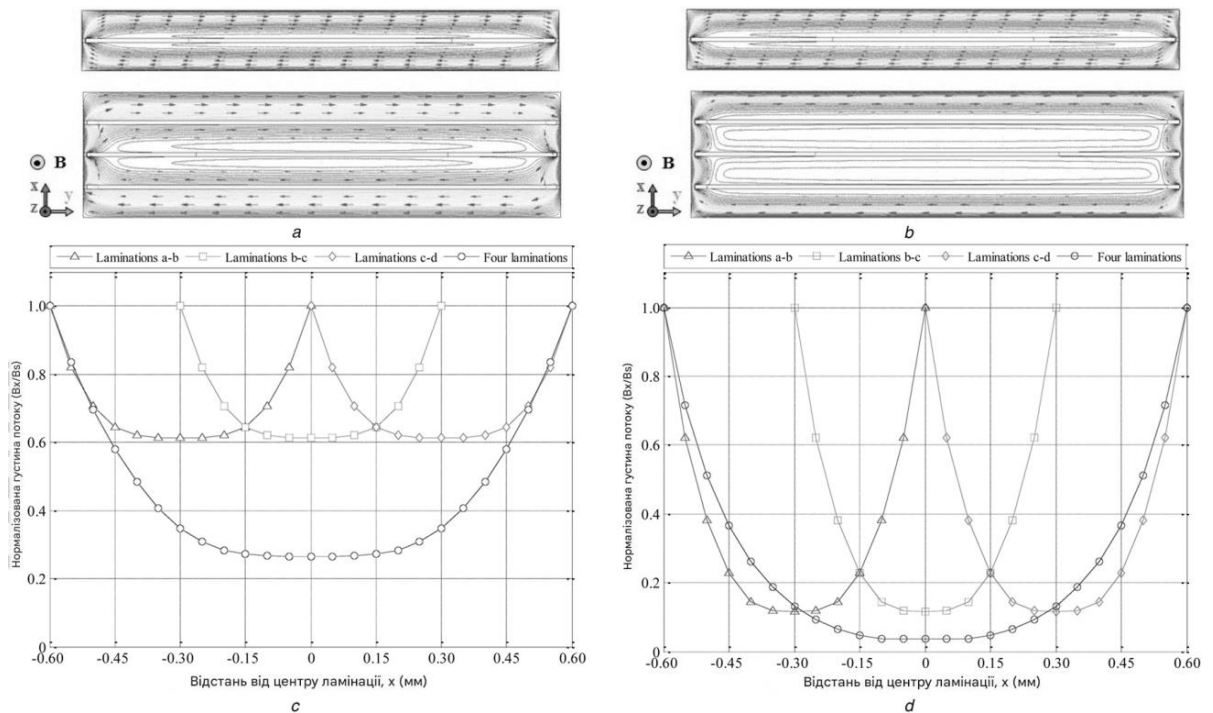


Рисунок 2.5. - Розподіл струму міжшарового короткого замикання між двома та чотирма шарами на частоті намагнічування: а) 50 Гц; б) 1000 Гц; в) 50 Гц; д) 1000 Гц.

Нормалізоване проникнення щільності потоку в стопки закорочених шарів показано на рис. 2.5. при піковій щільності потоку $B_{pk} = 1,3$ Тл

Модель було розширено для пакетів закорочених ламінацій. Використовуючи розроблену модель, було доведено, що пакет з n закорочених ламінацій може бути змодельовано однією смугою з еквівалентною товщиною $2na$, де $2a$ - товщина однієї ламінації. Також було показано, що міжшаровий дефект призводить до посилення скін-ефекту, що впливає на розподіл струму міжшарового дефекту і, отже, додаткові втрати потужності, викликані

дефектом, навіть на низьких частотах. На основі розробленої моделі було розраховано розподіл нормованої щільності магнітного потоку вздовж товщини закорочених пакетів при частотах намагнічування 50 та 1000 Гц та типової щільності магнітного потоку 1,3 Т. [30]

На рис. 2.5. показано, що розподіл міжшарового струму короткого замикання і щільності магнітного потоку в закороченому пакеті залежить від розміру петлі струму короткого замикання, яка, в свою чергу, залежить від кількості закорочених шарів. На рис. 2.4. а , незважаючи на наявність трьох петель струму короткого замикання, загальні втрати потужності менші, ніж на рис. 2.4. б , де є лише одна петля струму короткого замикання. Причина пов'язана з розміром петлі струму короткого замикання, яка більша за рис. 2.4. б.

2.4 Математична модель дефектів магнітного осердя

Математична модель дефектів магнітного осердя описує вплив неоднорідностей (тріщин, пор, включень, порушень шихтування, повітряних зазорів тощо) на розподіл магнітного поля, магнітний потік та втрати.

Для анізотропного середовища закон Ома записується у тензорній формі:

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} \quad (2.10)$$

Де тензор провідності у декартовій системі координат (вісь z - вздовж напрямку шихтування):

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Для ідеального шихтованого осердя з ізоляцією між пластинами.

Вздовж пластин:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k_{Fe} \cdot \sigma_{Fe} \quad (2.12)$$

Поперек пластин:

$$\sigma_{zz} = \left(\frac{k_{Fe}}{\sigma_{Fe}} + \frac{1-k_{Fe}}{\sigma_{ins}} \right)^{-1} \approx 0 \quad (2.13)$$

Тобто в ідеалі:

$$\sigma_i = \begin{pmatrix} k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 & 0 \\ 0 & k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Двовимірна постановка задачі рівняння поля. У двовимірній задачі формула зводиться до рівняння для векторного магнітного потенціалу A_z (x,y,t):

$$\nabla \cdot (v(|B|)\nabla A_z) - \sigma_{eff}(x,y)\frac{\partial A_z}{\partial t} = -J_{source} \quad (2.15)$$

де $v = 1/\mu$ – магнітний опір, J_{source} – сторонній струм

Ефективна провідність у двовимірній задачі. У площині поперечного перерізу (площина xy , шихтування вздовж z):

$$\sigma_{eff}^{2D}(x,y) = k_{Fe}(x,y) \cdot \sigma_{Fe} \quad (2.16)$$

Пошкоджена ділянка у двовимірній задачі. Для локального пошкодження в області Ω_d :

$$\sigma_{Fe}(x,y) = \begin{cases} k_{Fe} \cdot \sigma_{Fe} & \text{якщо } (x,y) \notin \Omega_d \\ k_{Fe} \cdot \sigma_{Fe} + \Delta\sigma_d(x,y) & \text{якщо } (x,y) \in \Omega_d \end{cases} \quad (2.17)$$

де $\Delta\sigma_d$ - додаткова провідність від пошкодження. Для замикання між окремими пластинами

$$\Delta\sigma_d = \sigma_{contact} \cdot \frac{\delta_{contact}}{d + \delta} \quad (2.18)$$

де $\sigma_{contact}$ - провідність металевого місточка замикання, $\delta_{contact}$ - його товщина.

Обмеження двовимірної задачі: не враховується поширення вихрових струмів вздовж осі z .

Тривимірна постановка задачі. Повна система рівнянь Максвелла

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$B = \mu_0\mu_r(|H|)H, \quad J = \sigma(x,y,z)E$$

В термінах векторного потенціалу A і скалярного потенціалу φ :

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla\varphi, \quad B = \nabla \times A \quad (2.20)$$

Рівняння дифузії:

$$\nabla \times (v\nabla \times A) + \sigma\frac{\partial A}{\partial t} + \sigma\nabla\varphi = J_{source} \quad (2.21)$$

Тензор провідності у тривимірній задачі з пошкодженням

Для неушкодженої ділянки:

$$\sigma_n = \begin{pmatrix} k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 & 0 \\ 0 & k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^n \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

де $\sigma_{zz}^n \approx 10^{-3} / 10^{-5}$ См/м (не нуль через реальну ізоляцію)

Для пошкодженої ділянки з міжпластинним замиканням:

$$\sigma_d(x,y,z) = \begin{pmatrix} k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 & 0 \\ 0 & k_{Fe}\sigma_{Fe} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^d(x,y,z) \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

де

$$\sigma_{zz}^d(x,y,z) = \frac{k_{Fe}\sigma_{Fe} \cdot A_{contact}(x,y,z)}{A_{cell}} \quad (2.24)$$

$A_{contact}$ - площа перерізу металевого місточка між пластинами, A_{cell} - площа елементарної комірки шихтовки. [30]

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи досліджено теоретичні основи електромагнітних і теплових процесів у шихтованих магнітних осердях синхронних двигунів за наявності дефектів міжлистової ізоляції, а також проаналізовано чисельну математичну модель цих процесів.

На основі рівнянь Максвелла в квазістаціонарному наближенні та методу векторного магнітного потенціалу показано, що порушення міжлистової ізоляції призводить до різкого зростання ефективної електропровідності в зоні дефекту. Це спричиняє інтенсивне виникнення вихрових струмів у замкнених контурах, утворених кількома електрично з'єднаними листами сталі. Внаслідок цього значно зростають локальні втрати потужності, що описуються квадратичною залежністю від густини струму, і формуються зони локального перегріву (гарячі точки).

Проведений чисельний аналіз розподілу вихрових струмів і магнітного поля підтвердив, що дефекти міжлистової ізоляції викликають суттєве

перерозподілення магнітного потоку з появою характерних зон розсіювання. Найбільш інтенсивні вихрові струми та втрати спостерігаються в місцях міжлистових контактів, особливо коли дефект утворює великі замкнені контури. Показано вплив розміру, локалізації та характеру дефекту (поверхневий, глибинний, крайовий) на інтенсивність полів розсіювання та тепловиділення.

Теоретичні положення та результати чисельного експерименту, викладені в розділі, дозволяють перейти до розробки практичного методу та алгоритму автоматизованої діагностики дефектів міжлистової ізоляції, а також до порівняльного аналізу результатів моделювання з експериментальними даними в наступних розділах роботи.

Розділ 3

Розробка методу та алгоритму виявлення дефектів

Метою даного розділу є формування цілісної методології виявлення локальних дефектів міжлистової ізоляції активної сталі статора. Розробка базується на переході від суб'єктивного візуально-теплого контролю до об'єктивного електромагнітного аналізу. Основна наукова ідея полягає у використанні фазочутливої селекції сигналів магнітного поля, що дозволяє виокремити мікроструми замикання на фоні значно потужнішого потоку намагнічування. Це створює передумови для автоматизації діагностичного процесу та підвищення достовірності результатів.

Розглядається перетворення фізичних величин (магнітної напруженості) у цифрові масиви даних, які підлягають математичній обробці. Розробка методу передбачає не лише фіксацію самого факту дефекту, а й визначення його енергетичних характеристик, що прямо впливають на залишковий ресурс експлуатації електродвигуна. Це вимагає створення специфічного алгоритмічного забезпечення, яке здатне відрізнити реальні пошкодження від конструктивних особливостей статора, таких як вентиляційні канали або пазові клини.

Запропонований підхід базується на комплексному поєднанні вимірювальної частини (апаратного забезпечення) та аналітичної моделі (програмного забезпечення). Такий симбіоз дозволяє реалізувати концепцію цифрового відбитка статора, де кожен паз отримує свою унікальну електромагнітну характеристику. Це забезпечує можливість порівняльного аналізу в часі, що є критично важливим для переходу до стратегії технічного обслуговування за фактичним станом, а не за регламентом.

Розробка алгоритму автоматизованої обробки сигналів спрямована на мінімізацію впливу людського фактора. Система здатна перевіряти стан заліза, класифікуючи зони як норму, зону уваги або критичний дефект. Це значно скорочує час простою обладнання під час планових перевірок та дозволяє

виявити приховані пошкодження, які неможливо зафіксувати традиційними методами. [31]

3.1 Обґрунтування вибору інформативних параметрів

Метод базується на принципі електромагнітної дефектоскопії низького рівня. Основна ідея полягає в тому, що пошкодження ізоляції між листами сталі створює замкнений електричний контур всередині пакета статора. Коли ми створюємо слабе магнітне поле в осерді, у місці дефекту починає протікати струм вихрового замикання. Цей струм генерує власне магнітне поле розсіювання, яке можна виміряти на поверхні зубців статора. В основі розробки лежить перехід від традиційної теплової дефектоскопії до методу вимірювання магнітних потенціалів. Метод базується на законі повного струму, де дефект ізоляції розглядається як замкнений контур, що створює власне магнітне поле.

Для виявлення дефектів використовується спеціальний датчик - котушка Чаттока. Це гнучкий магнітний потенціометр, який вимірює різницю магнітних потенціалів між двома точками на поверхні зубців статора. При виникненні замикання між листами сталі (F_{fault}), утворюється контур, по якому протікає струм. Цей струм створює магнітний потік, фаза якого зміщена на 90° відносно основного потоку збудження. Саме аналіз цієї квадратурної складової дозволяє відрізнити реальний дефект від впливу магнітного потоку збудження. Процес виявлення дефектів реалізується через послідовний алгоритм обробки даних. На першому етапі проводиться калібрування системи: датчик фіксує опорний сигнал напруженості поля в чистій зоні статора. Далі виконується сканування кожного паза. Отриманий аналоговий сигнал від датчика Чаттока проходить через прецизійний підсилювач та подається на фазочутливий детектор, який програмно відсікає синфазні завади та виділяє корисний сигнал дефекту. [32]

Розроблений алгоритм виявлення дефектів складається з наступних етапів:

- 1) Створення тороїдальної обмотки навколо спинки статора. Подача напруги для досягнення індукції близько 0,04 Тл (4% від номінальної).

2) Встановлення необхідної величини струму збудження. Це важливо для розділення активної та реактивної складових сигналу.

3) Рівномірне переміщення датчика вздовж кожного паза статора.

4) Сигнал з датчика V_{out} проходить через підсилювач та фазочутливий детектуючий пристрій.

5) Відсікання шумів та виділення складової I_{quad} .

Математичне ядро алгоритму обчислює значення струму дефекту I_d за допомогою інтегрування вектору магнітної індукції вздовж лінії датчика.

Ключовим параметром є обчислення квадратурної складової за формулою:

$$I_{quad} = I_{total} \cdot \sin(\theta)$$

де θ - фазовий кут між вектором виміряного струму та вектором опорної напруги збудження.

Якщо значення I_{quad} перевищує встановлений поріг, система автоматично маркує дану координату паза як зону потенційного дефекту.

Особливу увагу при розробці методу приділено динамічним характеристикам сигналу, зокрема швидкості затухання перехідного процесу в обмотці датчика. При переміщенні вимірювальної котушки (датчика) над зоною дефекту відбувається різка зміна магнітного опору та індуктивності системи датчик-осердя. В момент входу датчика в зону впливу струмів вихрового замикання спостерігається характерний перехідний процес. Швидкість його затухання (постійна часу τ) є високоінформативним показником: чим вища електропровідність у місці дефекту (тобто чим сильніше замикання листів), тим повільніше затухає індукований сигнал через накопичену енергію в контурі дефекту.

Додатковим інформативним параметром виступає фазовий зсув сигналу відносно опорної напруги. Оскільки контур дефекту має власну індуктивність та активний опір, вектор магнітної індукції в зоні пошкодження відхиляється на певний кут. Аналіз цього зсуву дозволяє не лише підтвердити наявність дефекту, а й диференціювати його тип: відрізнити поверхневе замикання

(спричинене механічним ударом або затиранням ротора) від глибинного руйнування ізоляції всередині пакета сталі.

Також до переліку інформативних параметрів включено амплітудний градієнт напруженості магнітного поля. Різка зміна амплітуди при мінімальному переміщенні датчика вздовж паза вказує на локальний характер пошкодження. Використання сукупності цих параметрів - квадратурної складовини, постійної часу затухання перехідного процесу та фазового кута забезпечує високу завадостійкість методу та дозволяє реалізувати прецизійну оцінку технічного стану електродвигуна без необхідності його розігріву до критичних температур. [33]

3.2 Опис запропонованого методу та пристрою діагностування

Запропонований метод діагностування базується на принципі електромагнітної дефектоскопії при низьких рівнях магнітної індукції. На відміну від класичних теплових випробувань, цей метод передбачає створення в ярмі статора змінного магнітного потоку, величина якого становить близько 3-5% від номінального значення. Такий підхід дозволяє ініціювати вихрові струми в місцях порушення ізоляції між листами сталі, але при цьому запобігає небезпечному нагріву всього осердя. Основна суть методу полягає у виявленні магнітних полів розсіювання, що виникають навколо локальних контурів замикання, за допомогою спеціалізованих вимірювальних перетворювачів.

Пристрій діагностування складається з трьох основних функціональних модулів: системи збудження, блоку первинних перетворювачів та інтелектуального модуля обробки даних. Система збудження включає гнучку часову обмотку, що намотується крізь розточування статора, та регульоване джерело живлення промислової частоти. Для точного контролю рівня індукції в систему введено вимірювальний виток, який дозволяє підтримувати стабільний магнітний потік незалежно від коливань напруги в мережі живлення, що забезпечує високу повторюваність результатів вимірювань.

Основним робочим органом пристрою є скануючий датчик, оснащений котушкою Чаттока (магнітним потенціометром). Датчик має спеціальну геометрію, яка дозволяє йому ефективно інтегрувати різницю магнітних потенціалів між двома точками на поверхні зубців статора. Скануючий пристрій монтується на напрямних або безпосередньо на пазових клинах і переміщується вздовж паза за допомогою крокового двигуна або ручного приводу з обов'язковою фіксацією координати через цифровий енкодер. Це дозволяє точно прив'язати виявлені аномалії до конкретної фізичної точки на довжині статора. [34]

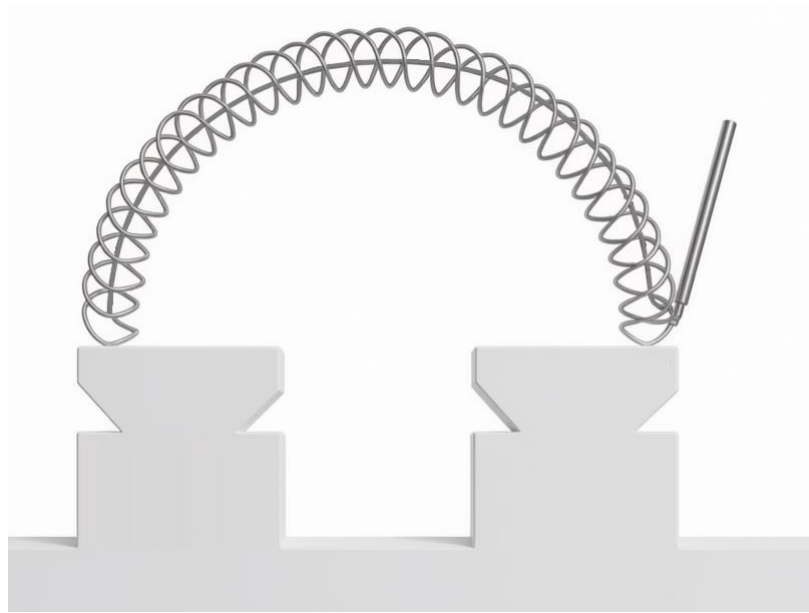


Рисунок 3.1. - Давач індуктивного типу

Інтелектуальний модуль обробки сигналів реалізований на базі мікропроцесорної системи з фазочутливим випрямлячем. Пристрій отримує два канали даних: робочий сигнал від котушки Чаттока та опорний сигнал напруги від обмотки збудження. Завдяки векторному аналізу пристрій у реальному часі виділяє активну (квадратурну) складову сигналу, яка є прямим індикатором енергетичних втрат у дефекті. Сучасна реалізація пристрою також передбачає передачу даних на центральний ПК або планшет, де спеціалізоване програмне забезпечення формує візуальну карту технічного стану активної сталі електродвигуна. [35]

Для перевірки працездатності, налаштування порогових значень та оцінки ефективності розробленого алгоритму автоматизованої обробки сигналів було використано сім типових дефектів міжлистової ізоляції осердя статора, що найбільш характерні для потужних синхронних двигунів серії СДН.

У якості тестових прикладів розглянуто наступні дефекти різної локалізації та глибини залягання: дефект 1 - коротке замикання на коронці (кінчику) зубця; дефект 2 - прихований дефект усередині тіла зубця; дефект 3 - дефект на ребрі (боковій поверхні) зубця; дефект 4 - дефект спинки осердя між двома сусідніми пазами; дефект 5 - дефект на дні паза; дефект 6 - прихований дефект спинки осердя безпосередньо під пазом; дефект 7 - дефект спинки осердя поблизу зовнішньої периферії статора. [36]

3.3 Розробка алгоритму автоматизованої обробки сигналів для ідентифікації місця та ступеня пошкодження

Алгоритм автоматизованої обробки базується на послідовному виконанні операцій цифрової обробки сигналів (DSP) з метою виділення корисної інформації про дефекти на фоні технологічних шумів. На першому етапі здійснюється синхронізація вхідних потоків даних: аналогового сигналу з котушки Чаттока та імпульсів від енкодера переміщення. Це дозволяє сформувати дискретний масив даних U_x , де кожному значенню напруги відповідає точна лінійна координата вздовж паза статора. Паралельно виконується амплітудна нормалізація сигналу для компенсації можливих коливань напруги в обмотці збудження.

Центральною частиною алгоритму є процедура фазової декомпозиції сигналу. Використовуючи метод швидкого перетворення Фур'є (FFT) або алгоритм цифрового фазочутливого детектування, система розділяє вхідний вектор на дві ортогональні складові. Синфазна складова відображає реактивний потік намагнічування, тоді як квадратурна складова I_{quad} виділяє активні струми, що виникають виключно в контурах замикання сталі. Саме пікові

значення квадратурної складової стають тригерами для подальшого аналізу ступеня важкості пошкодження.

Для ідентифікації ступеня важкості алгоритм використовує багатокритеріальну оцінку. В першу чергу аналізується абсолютна амплітуда I_{quad} . По друге, обчислюється просторовий градієнт сигналу dI/dx . Висока крутизна фронту сигналу свідчить про локальне (точкове) замикання, яке є найбільш небезпечним через високу щільність теплового виділення. Плавні зміни амплітуди інтерпретуються алгоритмом як загальне погіршення властивостей ізоляції або конструктивні неоднорідності (наприклад, стики пакетів).

Заключний етап алгоритму включає автоматичне формування дефектограми та прийняття рішення. Програмний модуль порівнює отримані дані з базою еталонних сигналів для конкретного типу двигуна. Якщо виявлено дефект, алгоритм розраховує його індекс безпеки на основі інтегральної площі під кривою сигналу I_{quad} . Результатом роботи є графічний звіт з локалізацією пошкодження (номер паза та відстань від краю статора), що дозволяє ремонтному персоналу миттєво визначити зону необхідного втручання без додаткових пошукових випробувань. [37]

3.4 Результати розрахунку електромагнітного поля в зоні дефектів магнітного осердя

Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя це кольорова картина поля з лініями магнітної індукції у площині перерізу магнітопроводу.

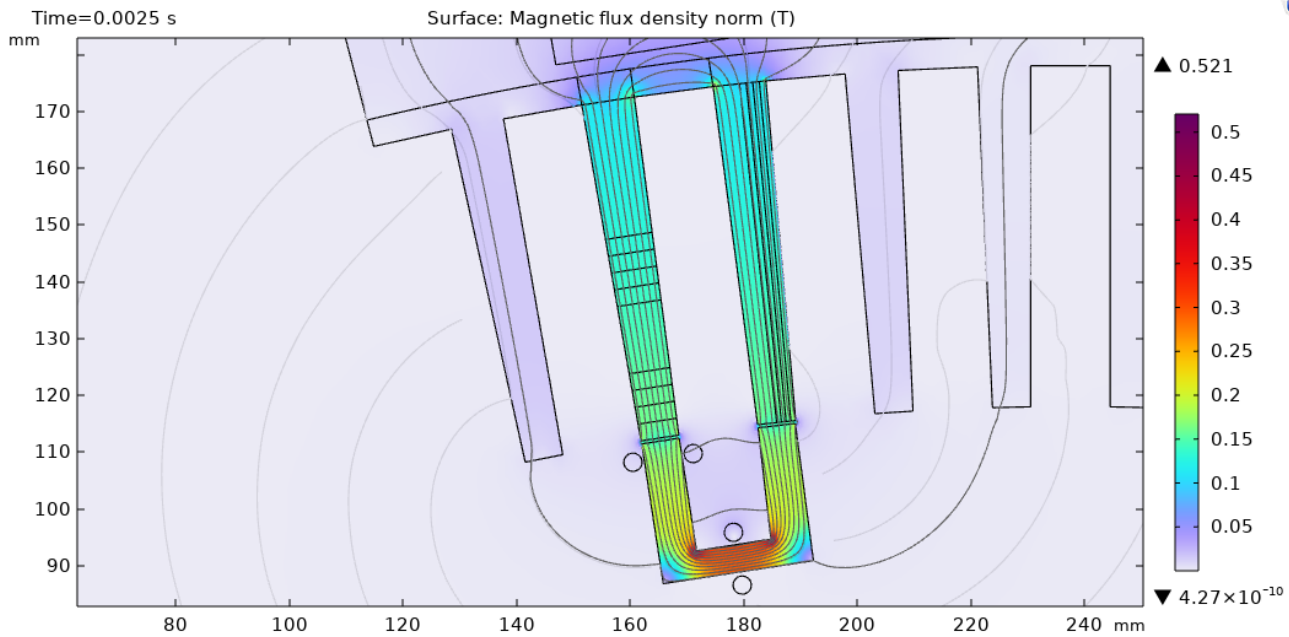


Рисунок 3.2 - Розподіл електромагнітного поля магнітопроводу без пошкоджень при 50 Гц

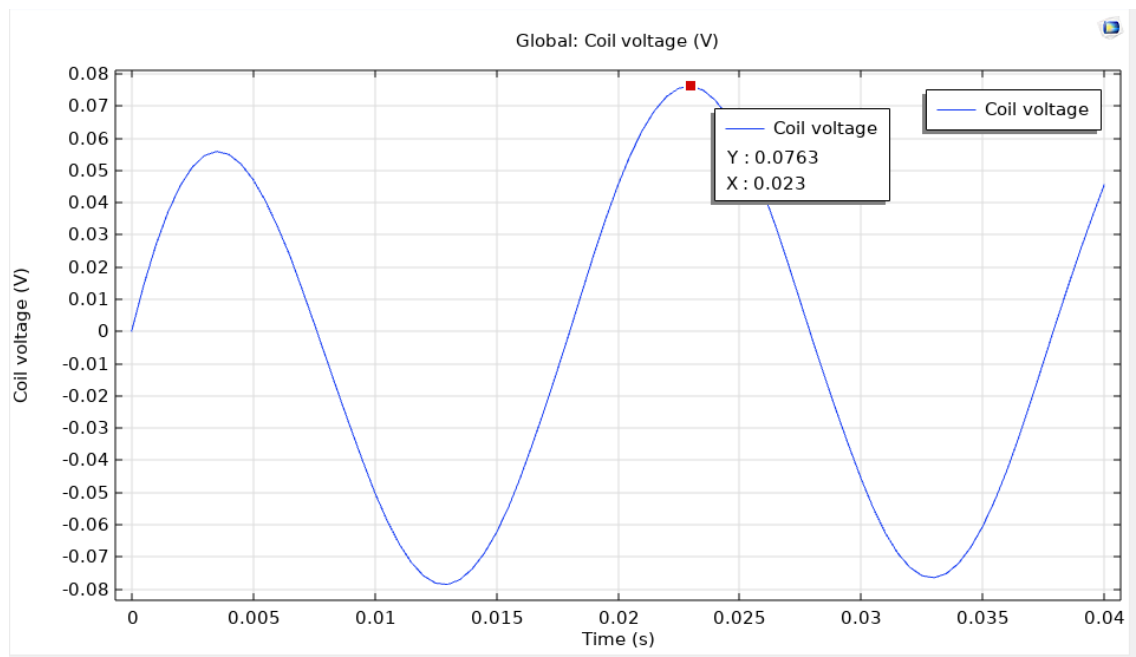


Рисунок 3.3 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу без пошкоджень при 50 Гц

Найсильніші ділянки поля (Рис. 3.2) спостерігаються у внутрішньому колі описаному двома сусідніми зубцями магнітного осердя статора у контакті з датчиком.

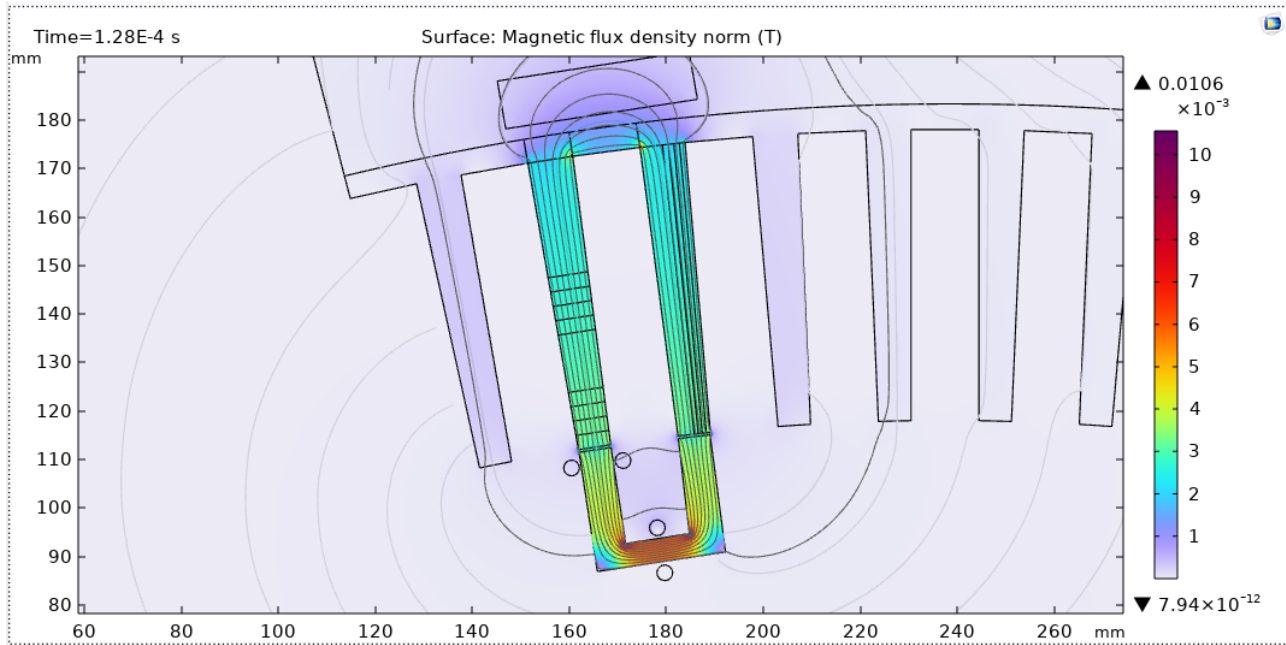


Рисунок 3.4 - Розподіл електромагнітного поля магнітопроводу без пошкоджень при 10 кГц

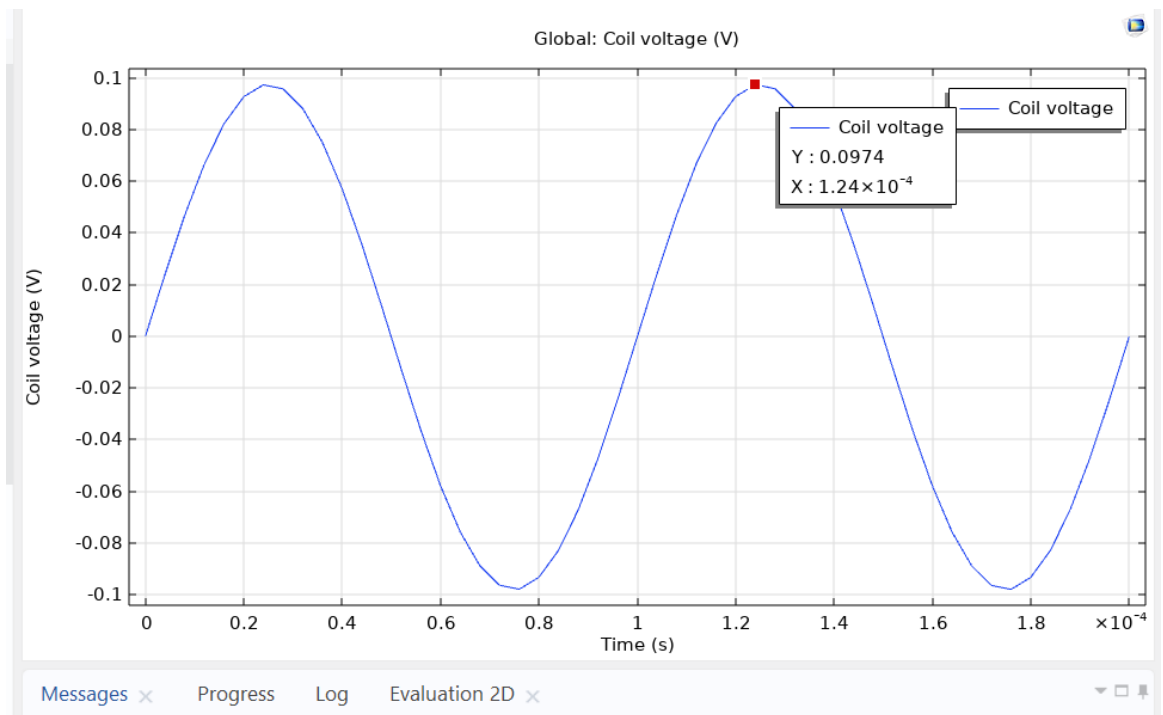


Рисунок 3.5 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу без пошкоджень при 10 кГц

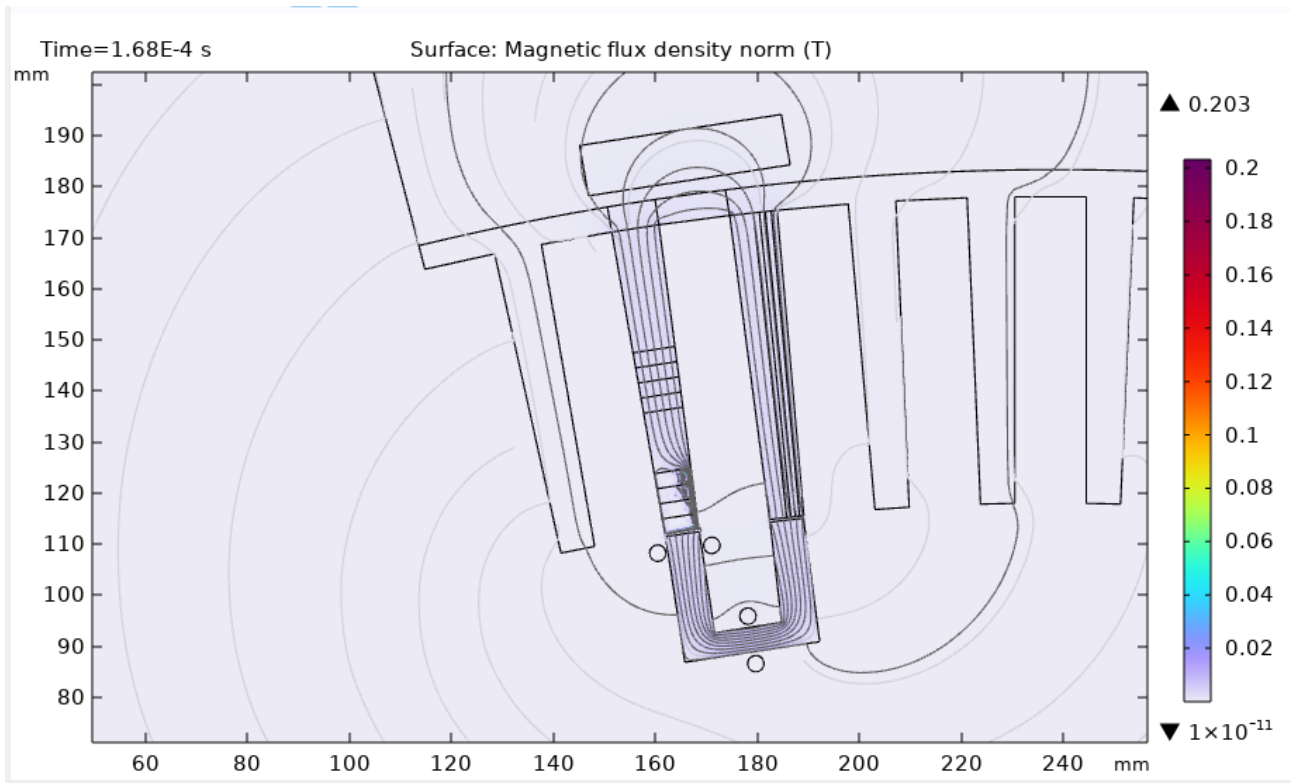


Рисунок 3.6 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом кінчика зубця при 10 кГц

Рисунок 3.6 ілюструє, як дефект (тріщина або скол) впливає на розподіл поля, що потім реєструється датчиком. На картині фіксується локальне спотворення силових ліній у зоні дефекту (на кінці зубця).

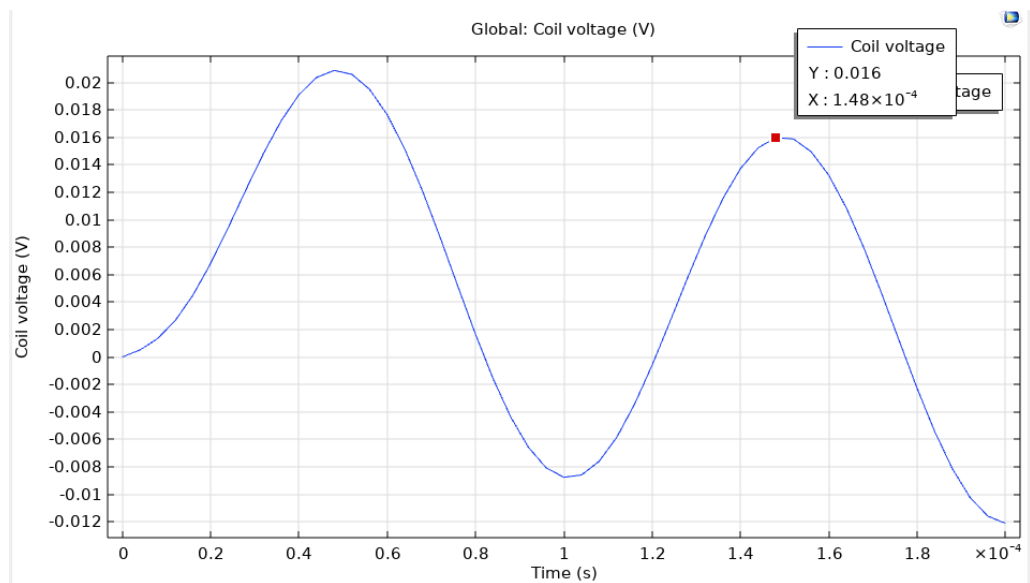


Рисунок 3.7 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом кінчика зубця при 10 кГц

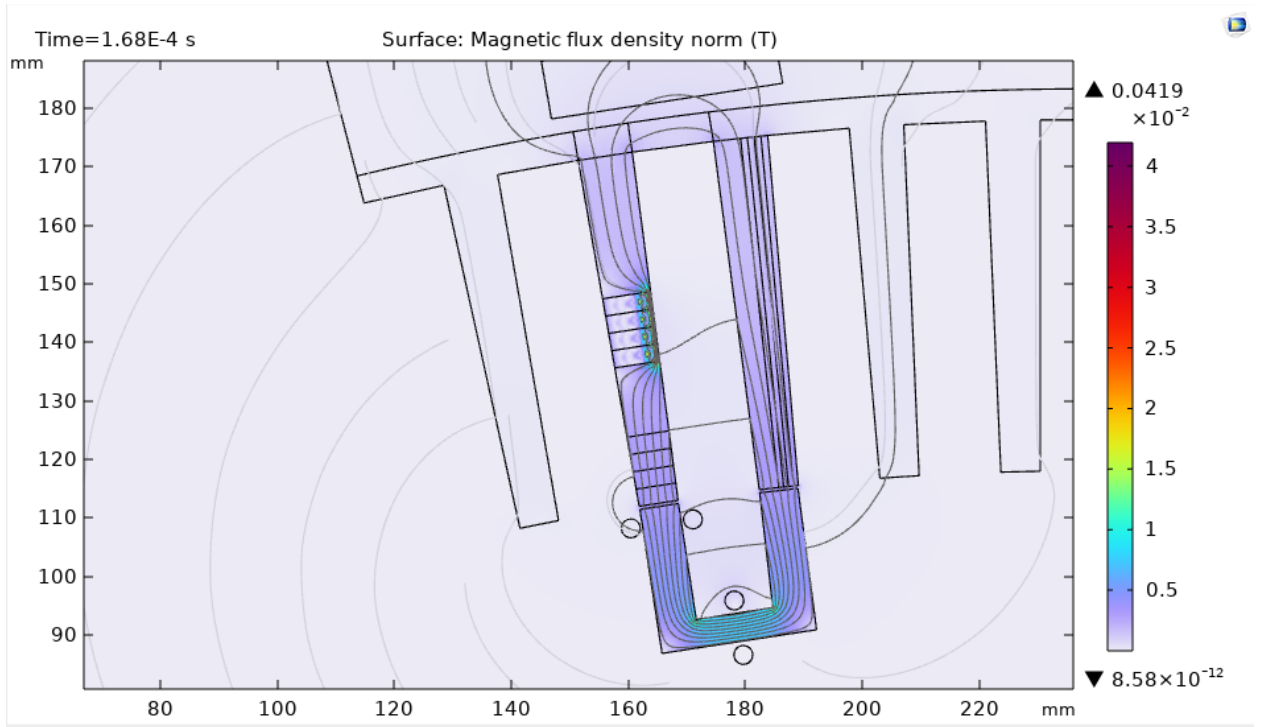


Рисунок 3.8 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом середини зубця при 10 кГц

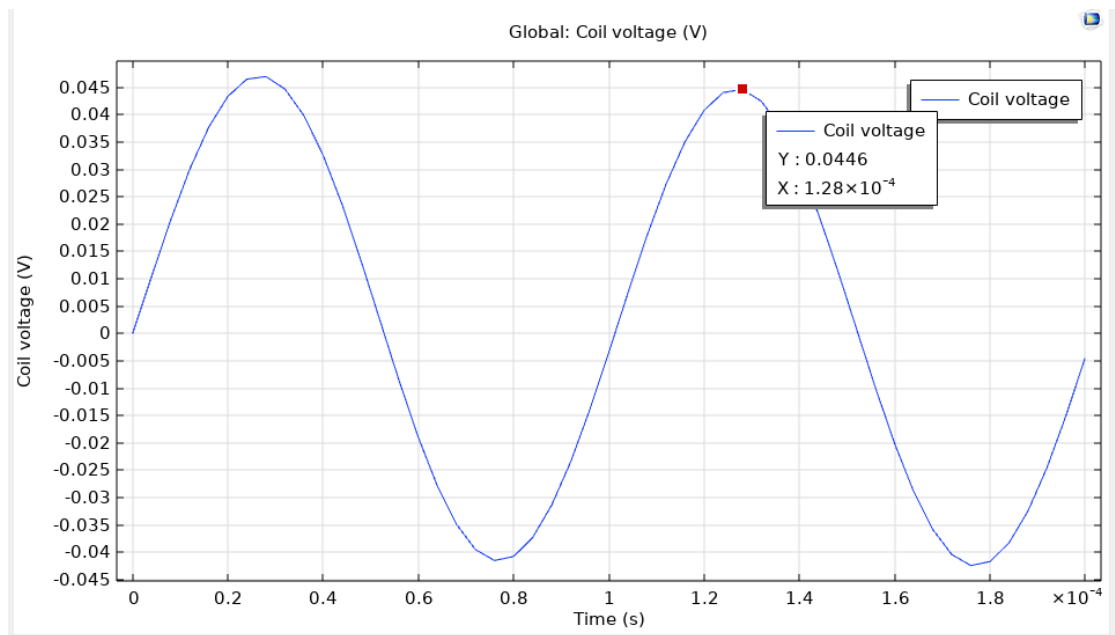


Рисунок 3.9 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом середини зубця при 10 кГц

Найбільші відхилення показників датчика помітні при пошкодженні кінчика зубця а також при пошкодженні середини зубця.

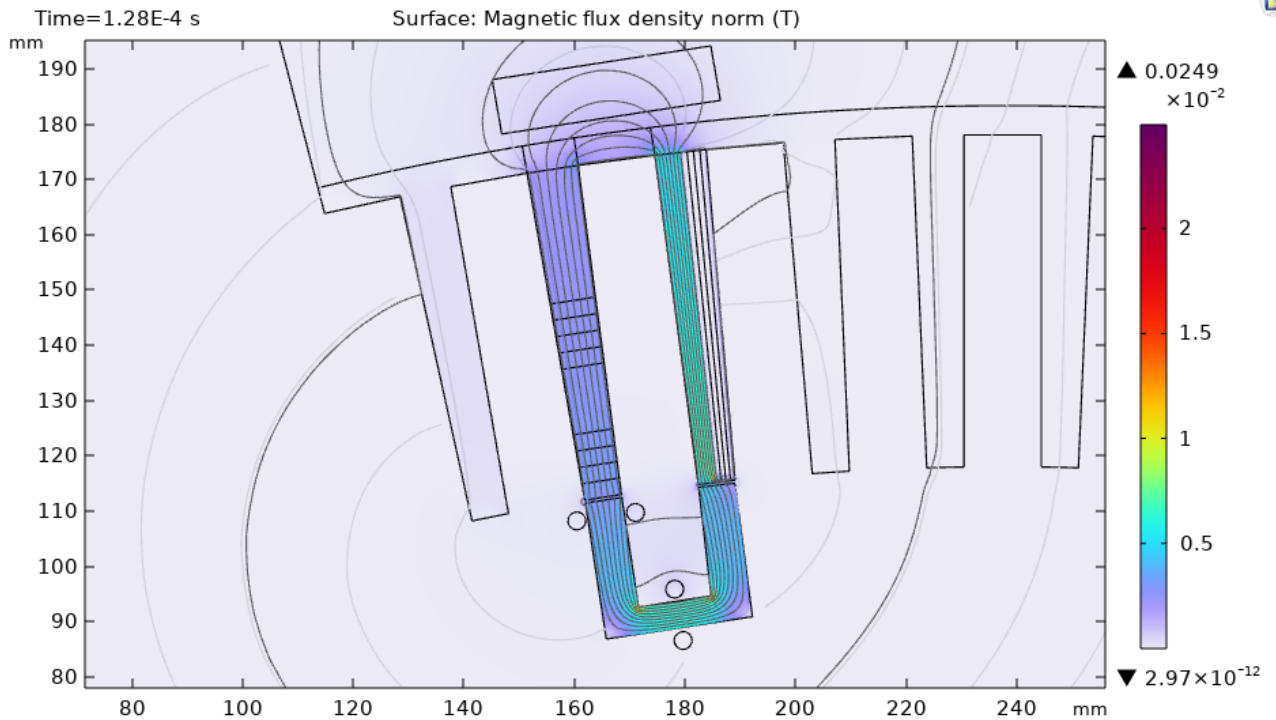


Рисунок 3.10 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом ребра зубця при 10 кГц

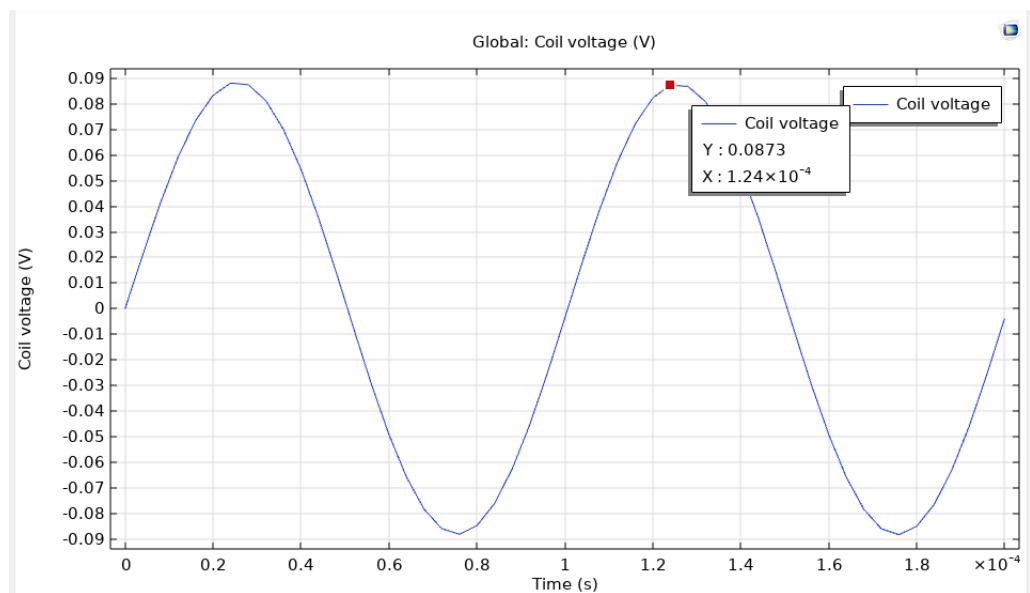


Рисунок 3.11 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом ребра зубця при 10 кГц

При пошкодженні ребра зубця (рис 3.10) на картині розподіл магнітної індукції можна побачити як лінії магнітного поля оминають пошкоджену

частину зубця. Спостерігається відносне відхилення напруги близько 10% (рис 3.11 та рис 3.5).

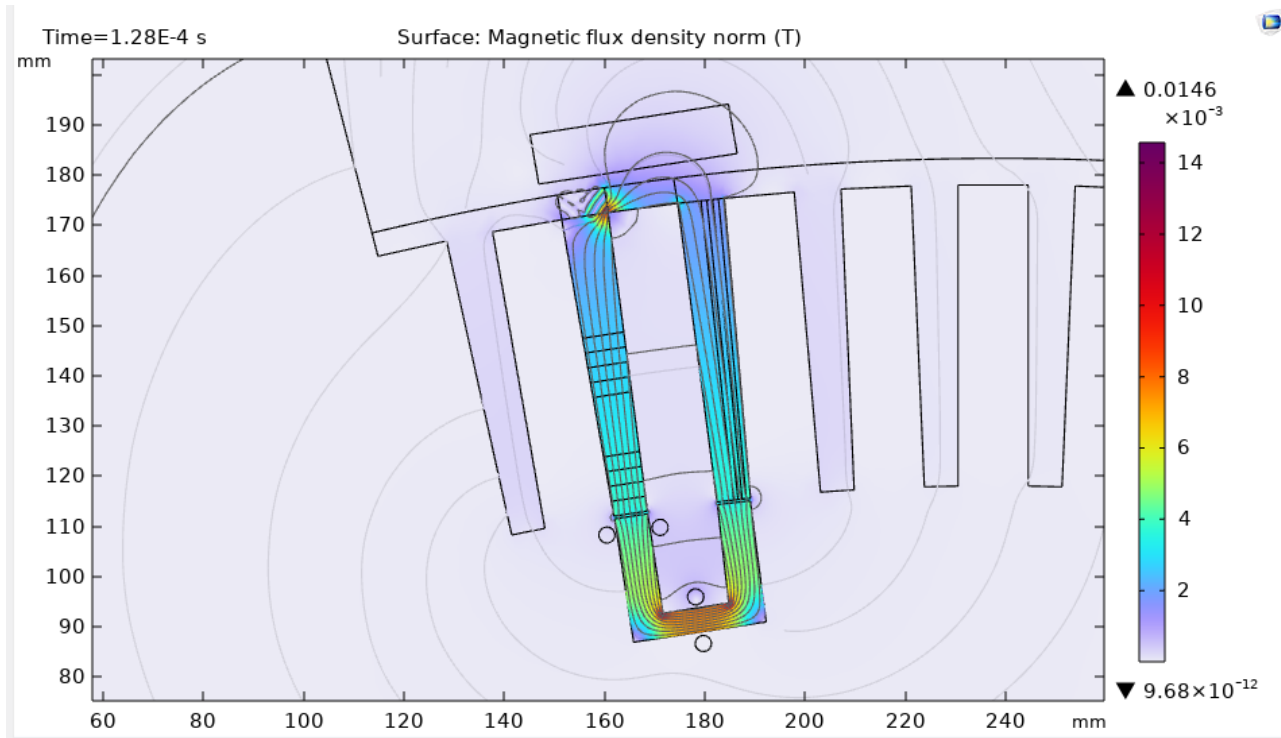


Рисунок 3.12 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом спинки осердя між двома сусідніми пазами при 10 кГц

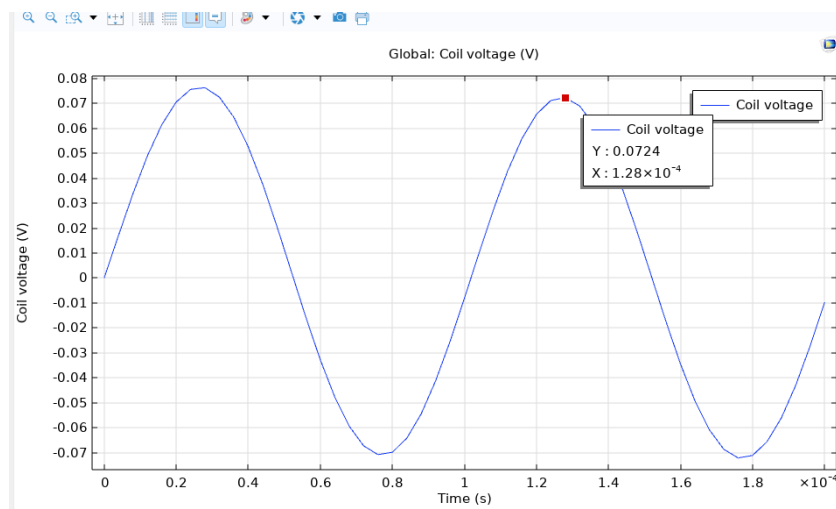


Рисунок 3.13 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом спинки осердя між двома сусідніми пазами при 10 кГц

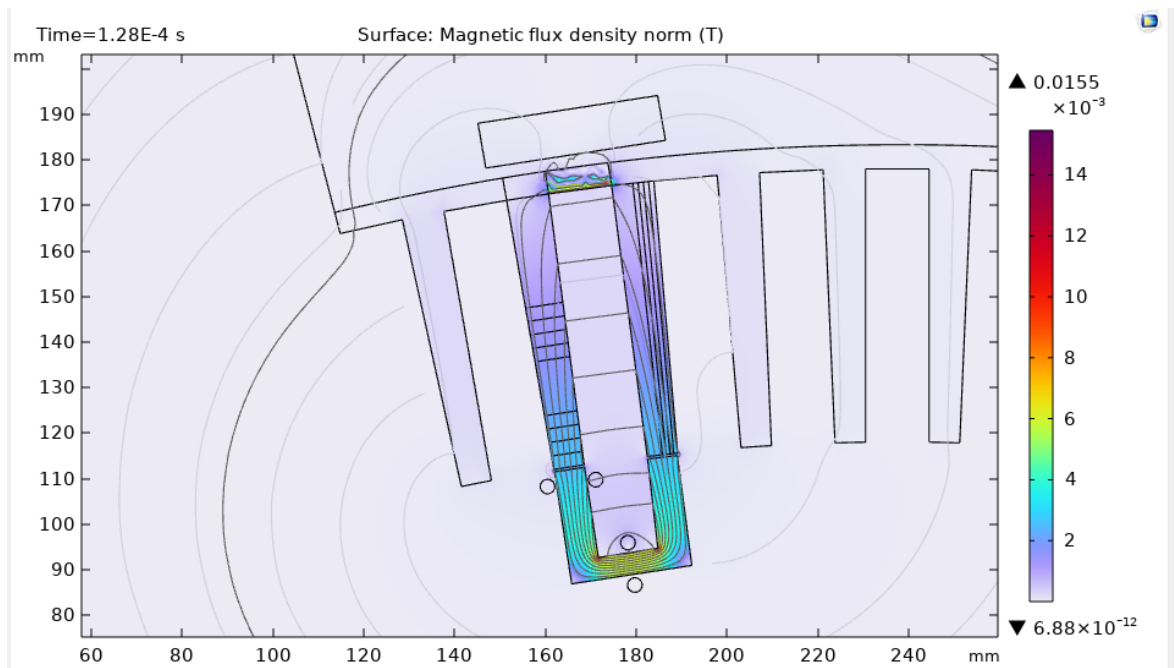


Рисунок 3.14 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом дна паза при 10 кГц

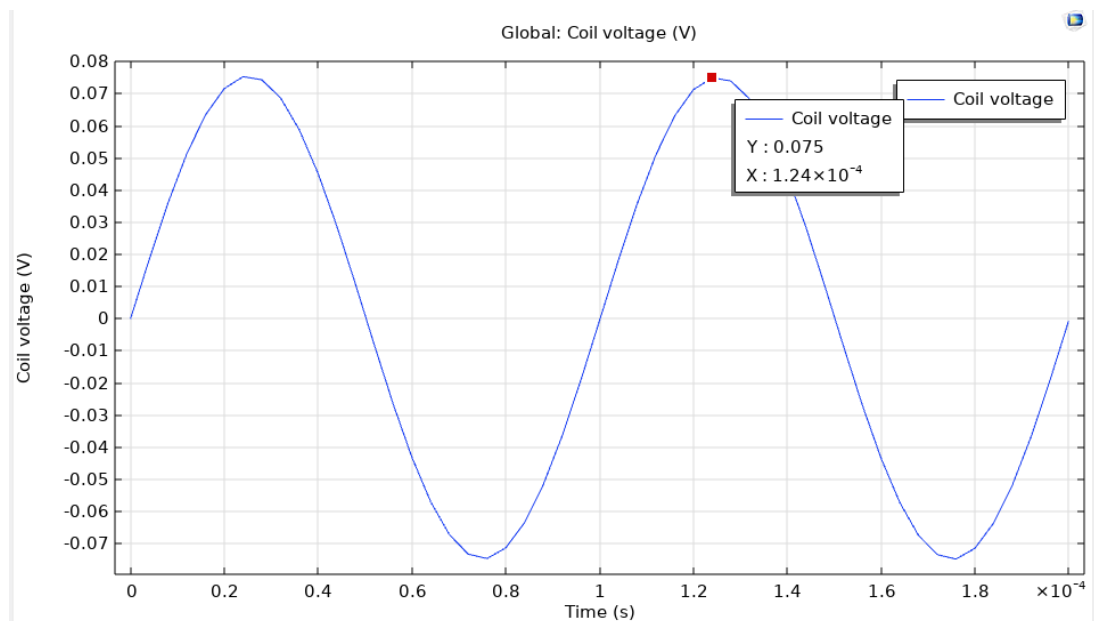


Рисунок 3.15 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом дна паза при 10 кГц

Картини з дефектом спинки осердя між двома сусідніми пазами та з дефектом дна паза дають достатньо значні відхилення для нормальної роботи датчик, тим не менш є більш важкими у порівнянні з попередніми для виявлення.

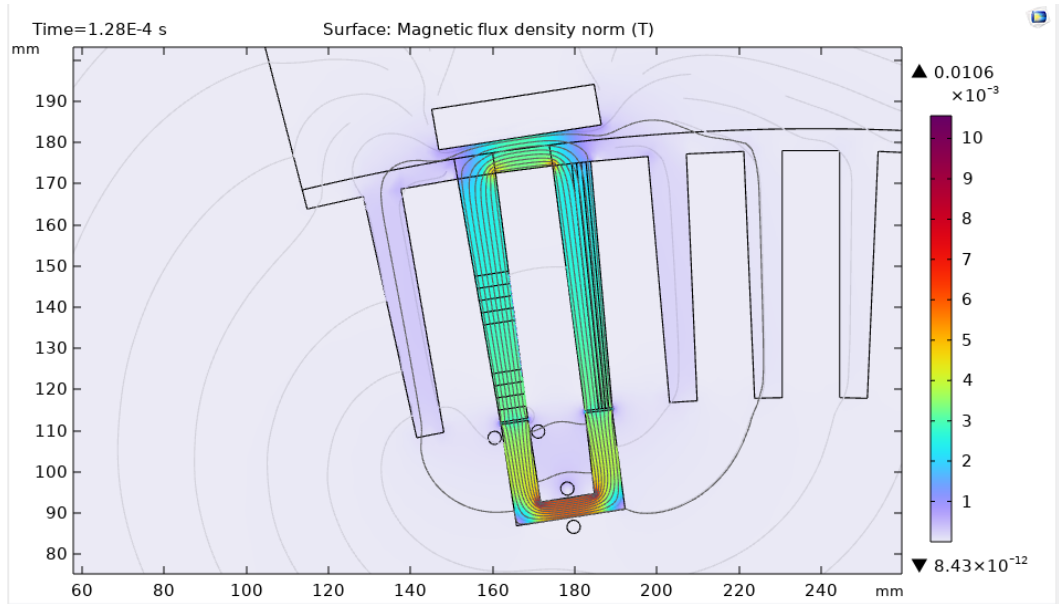


Рисунок 3.16 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом прихований дефект спинки осердя під пазом при 10 кГц

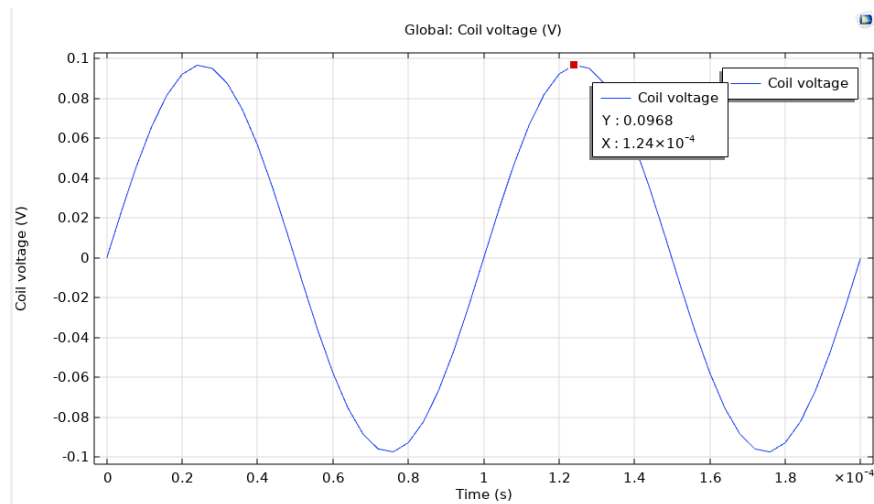


Рисунок 3.17 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом прихований дефект спинки осердя під пазом при 10 кГц

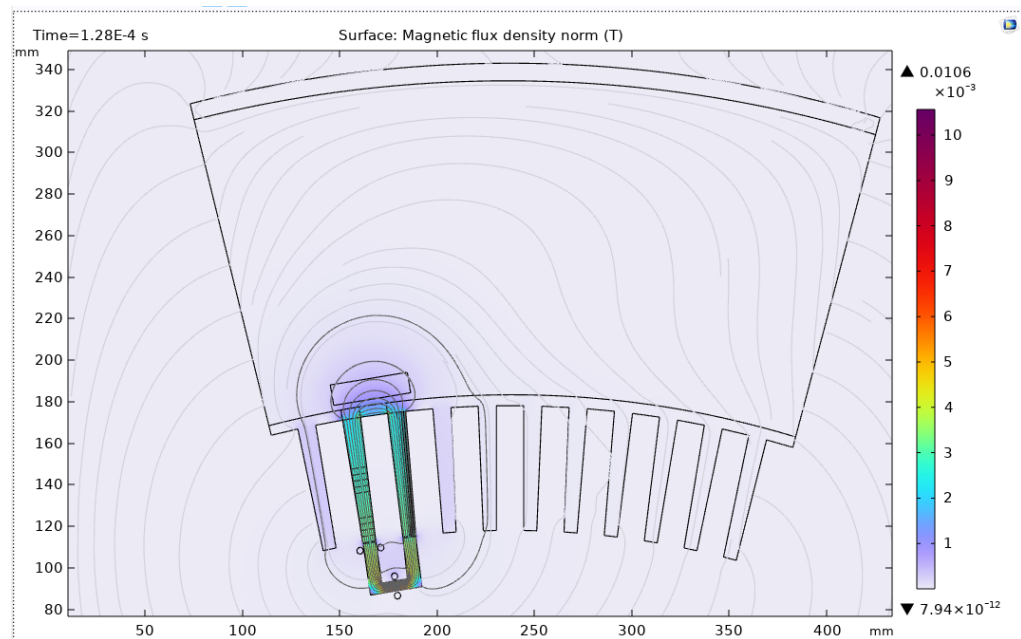


Рисунок 3.18 - Розподіл електромагнітного поля цілого магнітопроводу осердя з дефектом спинки осердя поблизу зовнішньої периферії при 10 кГц

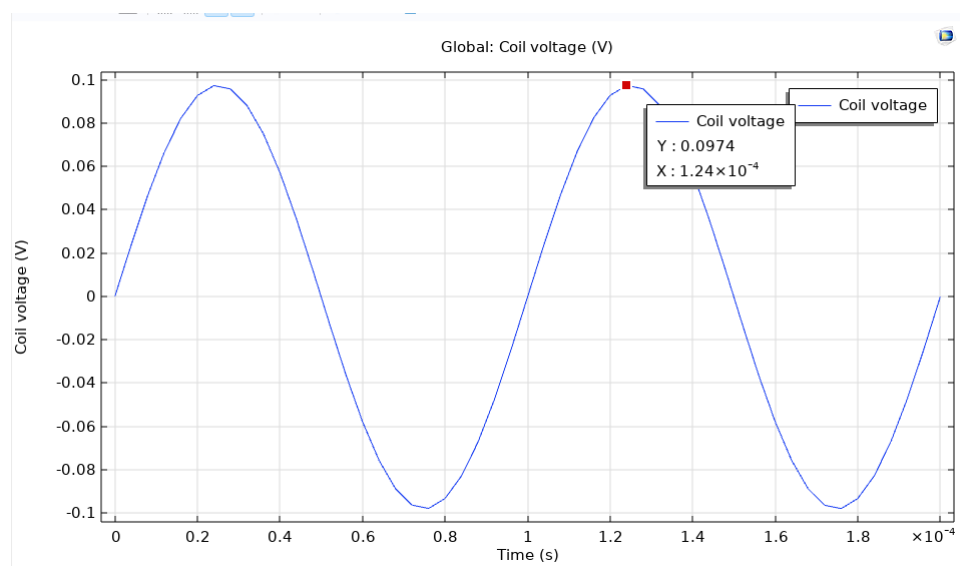


Рисунок 3.19 - Графік залежності фіксованої датчиком напруги від часу з дефектом спинки осердя поблизу зовнішньої периферії при 10 кГц

Картини з дефектом прихований дефект спинки осердя під пазом та з дефектом спинки осердя поблизу зовнішньої периферії фіксуються датчиком як результати на межі похибки. Для підвищення ефективності виявлення розглянутих дефектів магнітопроводу рекомендується впровадити

вдосконалення методу шляхом збільшення напруги збудження та зменшення конструктивного повітряного проміжку між датчиком та зубцями.

3.5 Висновки до розділу 3

Розроблено метод та алгоритм виявлення дефектів міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя електродвигунів на основі низькоенергетичного електромагнітного контролю.

Запропонований метод базується на реєстрації магнітних полів розсіювання, які виникають у зонах міжлистових коротких замикань при слабкому тороїдальному намагнічуванні осердя з індукцією на рівні 3-5% від номінальної. Основним вимірювальним елементом є котушка Чаттока (магнітний потенціометр), яка фіксує різницю магнітних потенціалів вздовж поверхні зубців статора.

Обґрунтовано вибір ключових інформативних параметрів, серед яких квадратурна складова сигналу, фазовий зсув відносно опорної напруги збудження, швидкість затухання перехідного процесу в обмотці датчика та амплітудний градієнт напруженості магнітного поля. Використання цих параметрів забезпечує високу завадостійкість методу та дозволяє диференціювати типи дефектів за їхнім характером і глибиною залягання.

Розроблено принципову схему діагностичного пристрою, який включає систему низькоенергетичного збудження та скануючий датчик з котушкою Чаттока. Така конструкція дає можливість проводити швидко й безпечно сканування всіх пазів статора з прив'язкою виявлених дефектів до конкретних геометричних координат.

Запропонований метод і алгоритм дають можливість перейти від суб'єктивних візуально-теплових методів контролю до сучасної, точної та автоматизованої системи електромагнітної дефектоскопії, яка забезпечує надійну локалізацію та оцінку небезпечності дефектів міжлистової ізоляції. Результати розділу створюють практичну та методичну основу для проведення експериментальних досліджень розробленого методу.

Розділ 4

Чисельні імітаційні дослідження дефектів магнітного осердя

Якість та надійність експлуатації потужних електричних машин безпосередньо залежать від цілісності ізоляції листів активної сталі осердя статора. Одним із найбільш прогресивних та безпечних методів діагностики стану магнітної системи є метод EL CID (Electromagnetic Core Imperfection Detection). На відміну від традиційних випробувань на кільцеве намагнічування (High Flux Test), цей метод дозволяє виявити локальні дефекти міжлистової ізоляції при низьких рівнях магнітної індукції, що виключає ризик термічного пошкодження заліза під час самого тестування.

В основу експерименту покладено вимірювання магнітних потоків розсіювання, що виникають внаслідок протікання струмів замикання між листами сталі. Під час дослідження було реалізовано схему збудження зубців осердя статора. Такий підхід забезпечує безпечні умови праці для персоналу та обладнання, водночас надаючи достатню чутливість для фіксації фазового зсуву магнітних полів за допомогою спеціалізованого потенціометричного датчика. Процес сканування охоплює всю внутрішню поверхню статора, що дає змогу отримати цілісну картину технічного стану досліджуваного об'єкта. Сформовані висновки базуються на математичній обробці сигналів та графічній візуалізації зон термічного ризику. Це дозволяє не лише підтвердити ефективність обраного методу для даного типу електродвигуна, але й надати обґрунтовані рекомендації щодо його подальшої експлуатації або необхідності проведення ремонтних робіт. [38]

4.1 Досліджувані дефекти шихтованого осердя

Для проведення детальних досліджень електромагнітних процесів у пошкодженному магнітопроводі було розроблено моделі дефектів, які є фізичною моделлю шихтованого пакета статора. В основу геометрії моделі покладено конструктивні параметри синхронного електродвигуна серії СДН-2-

17-26-16, що дозволяє наблизити умови експерименту до реальних експлуатаційних показників потужних електричних машин. Головною особливістю даного чисельного експерименту є можливість імітації керованих дефектів міжлистової ізоляції, що дозволяє досліджувати реакцію системи на замикання різної інтенсивності та локалізації.

Основні типи дефектів шихтованого магнітного осердя електродвигунів пов'язані з порушенням міжлистової ізоляції, механічними пошкодженнями, тепловими впливами та іншими факторами:

1. Порушення (пробій) міжлистової ізоляції: електричних містків (провідних шляхів) між сусідніми листами через пошкодження ізоляційного покриття. Це найпоширеніший і найнебезпечніший дефект для шихтованих осердь.

Причини виникнення: механічні пошкодження під час штампування (задирки), пресування, транспортування чи монтажу; Надмірний тиск при складанні стеку або ослаблення затяжки в експлуатації; Теплове старіння, перегрів (загальний або локальний); Вібрація та фретінг (абразивне стирання ізоляції через мікро-рухи листів); Пошкодження при видаленні обмоток під час ремонту; Корозія, волога, забруднення.

Наслідки: різке зростання вихрових струмів - значне підвищення втрат у осерді, нагрівання; локальний перегрів, який може призвести до подальшого руйнування ізоляції, оплавлення листів і навіть розплавлення осердя; зниження ККД двигуна, підвищене споживання струму, вібрація, шум; у важких випадках - повне руйнування осердя, пошкодження обмоток і вихід двигуна з ладу.

2. Механічні пошкодження листів і стеку (деформація, ослаблення, пошкодження країв): деформація, тріщини, задирки, ексцентриситет стеку, ослаблення пакета.

Причини: знос інструменту при штампуванні, неправильне пресування; вібрація в експлуатації, неправильне транспортування; нерівномірне стиснення, проблеми з кріпленням (болти, зварювання); механічні удари.

Наслідки: збільшення повітряного зазору або його нерівномірність - вібрація, шум, нестабільна робота; додаткові втрати, нагрів, прискорене

старіння ізоляції обмоток; зниження механічної міцності, можливе руйнування при високих навантаженнях.

3. Локальні дефекти (оплавлення, прогари, горіння осердя): видимі сліди перегріву, оплавлені ділянки, короткозамкнені ділянки листів.

Причини: існуючі міжлистові короткі замикання, що розвинулися; пошкодження обмоток (пробій на корпус), що викликає дугу в осерді; перевищення збудження, проблеми з охолодженням; Блокування вентиляційних каналів.

Наслідки: локальне або загальне руйнування осердя (може вимагати заміни); пошкодження сусідніх обмоток; аварійне зупинення машини, високі витрати на ремонт.

4. Зміна магнітних властивостей матеріалу (деградація через механічні напруження): збільшення втрат навіть без прямого короткого замикання (через напруження в сталі після штампування, крайові ефекти).

Причини: механічні напруження при виробництві, старіння матеріалу.

Наслідки: підвищені гістерезисні та вихрові втрати, зниження ККД, підвищений холостий хід.

Загальні наслідки дефектів осердя для електродвигуна: теплові – перегрів, прискорене старіння ізоляції обмоток, скорочення ресурсу; енергетичні – зростання втрат, зниження ККД, вищі експлуатаційні витрати; механічні – вібрація, шум, знос підшипників; економічні та надійнісні – простой, дорогі ремонти (іноді заміна осердя), ризик повного виходу з ладу.

Процес розробки імітаційної моделі розпочався з побудови схеми поперечного перерізу двигуна СДН-2-17-26-16 у програмному середовищі AutoCAD. На цьому етапі було відтворено геометрію пазової зони, форму зубців та вентиляційних каналів, що є критично важливим для адекватного моделювання розподілу магнітних потоків розсіювання. Використання інструментів векторного проектування дозволило забезпечити високу точність розмірів, яка безпосередньо впливає на достовірність подальших розрахунків.

Синхронний двигун типу СДН-2-17-26-16 - трифазна електрична машина призначена для приводу потужних механізмів у промисловості. Двигун

виготовлений на 16 полюсів і має 144 зубці на статорі. Статор машини має внутрішній діаметр 950 мм та зовнішній діаметр 1400 мм. Ширина паза статора становить 14 мм, висота 60 мм.

Двигун характеризується високою надійністю, характерною для синхронних машин даного класу, стабільністю частоти обертання та добрими енергетичними показниками. Завдяки великій кількості полюсів двигун має відносно низьку номінальну швидкість обертання, що робить його оптимальним для безпосереднього приводу великих насосів, компресорів, вентиляторів, млинів та іншого технологічного обладнання без застосування редукторів.

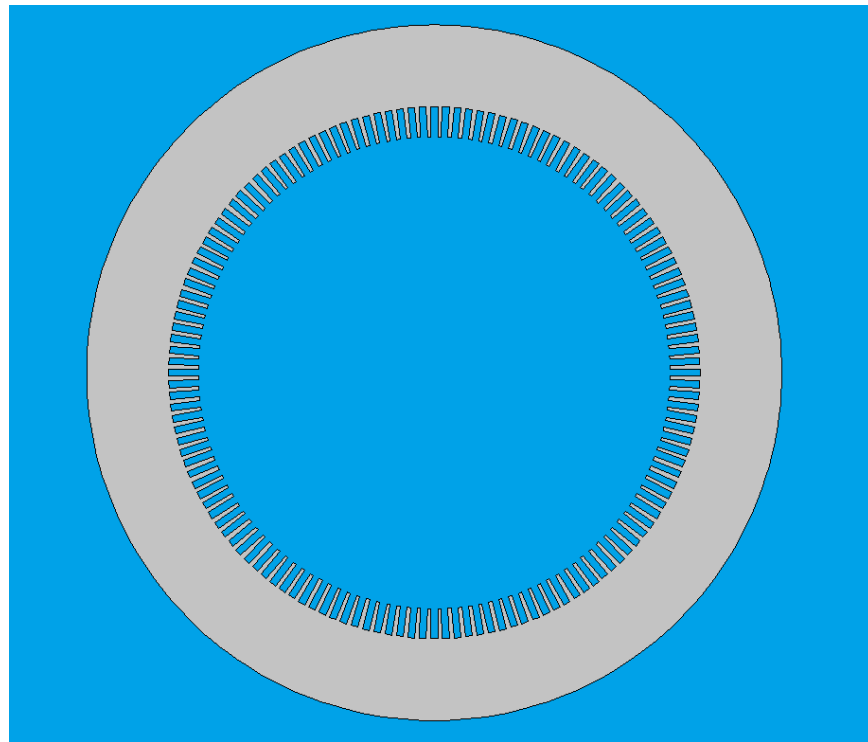


Рисунок 4.1. - Поперечний переріз осердя статора електродвигуна СДН-2-17-26-16

Сформована геометрична модель була експортована в програмне середовище COMSOL Multiphysics для проведення попереднього скінченноелементного аналізу та подальшої верифікації результатів фізичного експерименту. Інтеграція моделі в розрахунковий комплекс дозволила налаштувати фізичні інтерфейси для моделювання електромагнітних полів, що виникають при роботі датчика Чаттока. Такий підхід дозволяє побудувати

теоретичне прогнозування поведінки магнітного поля в зонах дефектів та у подальшому провести практичне підтвердження цих аномалій на фізичній моделі. [39]

4.2 Результати моделювання дефектів магнітного осердя

Оцінка технічного стану магнітопроводу в даній роботі ґрунтується на результатах чисельного моделювання, що дозволяє детально дослідити фізичну природу виникнення електромагнітних аномалій без залучення натурних випробувань. Використання програмного комплексу COMSOL Multiphysics забезпечило можливість створення контрольованого середовища, у якому кожен із семи типів дефектів було змодельовано шляхом локальної зміни електропровідних властивостей окремих ділянок шихтованого пакета. Такий підхід дозволив отримати точні розподіли векторів магнітної індукції та щільності вихрових струмів, що є недоступним при використанні лише традиційних методів вимірювання. [40]

Таблиця 4.1 – Напруга на один виток вимірювальної обмотки

50 Гц	150 Гц	400 Гц	1000 Гц	10000 Гц
0,0763	0,0919	0,094	0,0953	0,0974

В таблиці 4.1 наведено результати вимірювання напруг без пошкоджень. Значення у таблиці 4.2 відображають зменшення напруги на вимірювальній обмотці давача при різних локалізаціях та розмірах дефектів. Було наведено сім різних видів дефектів, до перших трьох дефектів наведено різні масштаби ділянки пошкодження.

Таблиця 4.2 - Результати розрахунку відхилення напруги на вимірювальній обмотці

Розмір зони пошкодження	Відхилення напруги у в.о.				
	50 Гц	150 Гц	400 Гц	1000 Гц	10000 Гц
Дефект 1: Кінчик зубця - розташований безпосередньо на поверхні					

розточування статора					
5%	0,15	0,17	0,13	0,15	0,5
10%	0,2	0,22	0,17	0,18	0,69
15%	0,26	0,25	0,2	0,24	0,81
20%	0,29	0,27	0,24	0,3	0,84
Дефект 2: Прихований (глибинний) дефект зубця - знаходиться всередині зубця, не виходячи на поверхню					
5%	0,09	0,05	0,04	0,07	0,43
10%	0,15	0,08	0,08	0,14	0,49
15%	0,17	0,1	0,12	0,22	0,51
20%	0,2	0,13	0,16	0,28	0,54
Дефект 3: Ребро (бокова стінка) зубця					
12.5%	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06
25%	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
37.5%	0,05	0,03	0,04	0,05	0,09
50%	0,06	0,04	0,04	0,05	0,1
Інші дефекти					
Дефект 4: Спинка осердя між двома сусідніми пазами	0,04	0,06	0,09	0,15	0,26
Дефект 5: Дно паза	0,15	0,16	0,18	0,2	0,23
Дефект 6: Прихований дефект спинки осердя під пазом	0,01	0,01	0,02	0,04	0,07
Дефект 7: Дефект спинки осердя поблизу зовнішньої периферії	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04

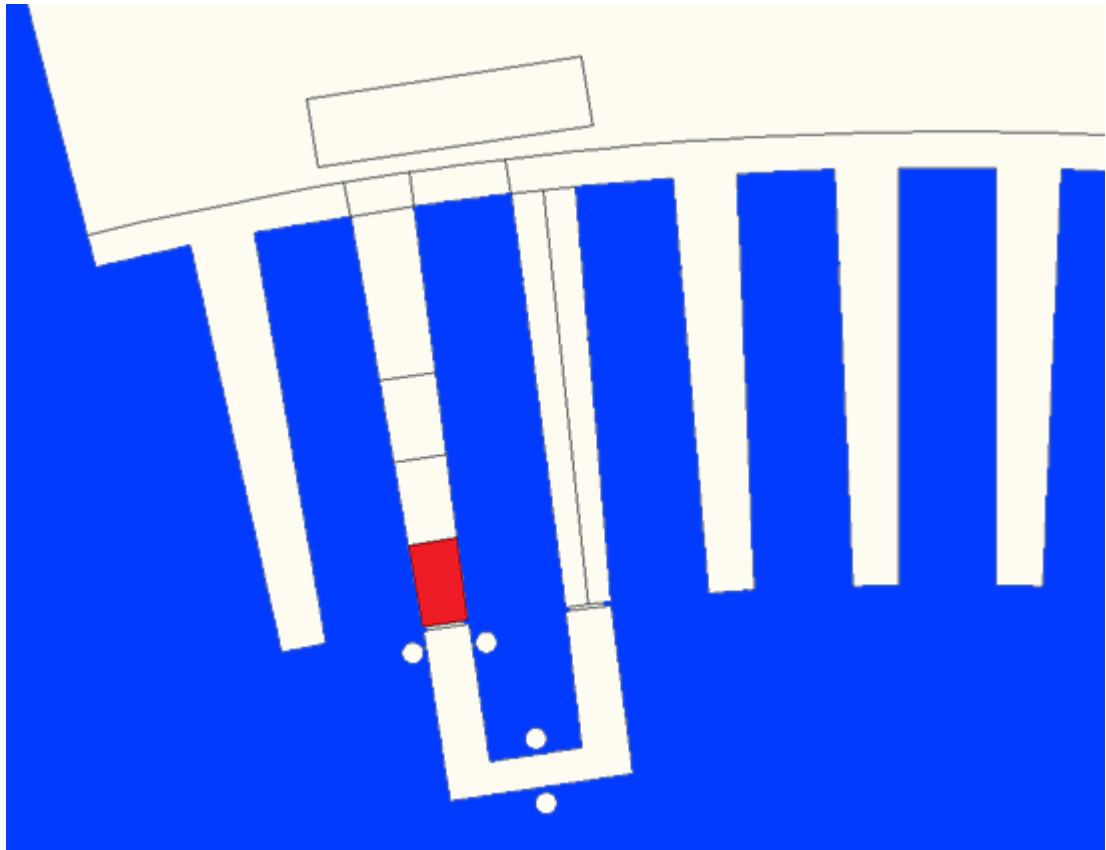


Рисунок 4.2. - Перший тип дефекту (край зубця)

Аналіз результатів моделювання поверхневих пошкоджень, таких як дефект коронки зубця та у середині зубця, показали найбільші відхилення показників датчика. Оскільки ці дефекти розташовані безпосередньо на шляху магнітного потоку збудження і максимально наближені до датчика, вони формують чітко виражене відхилення амплітуди напруги.

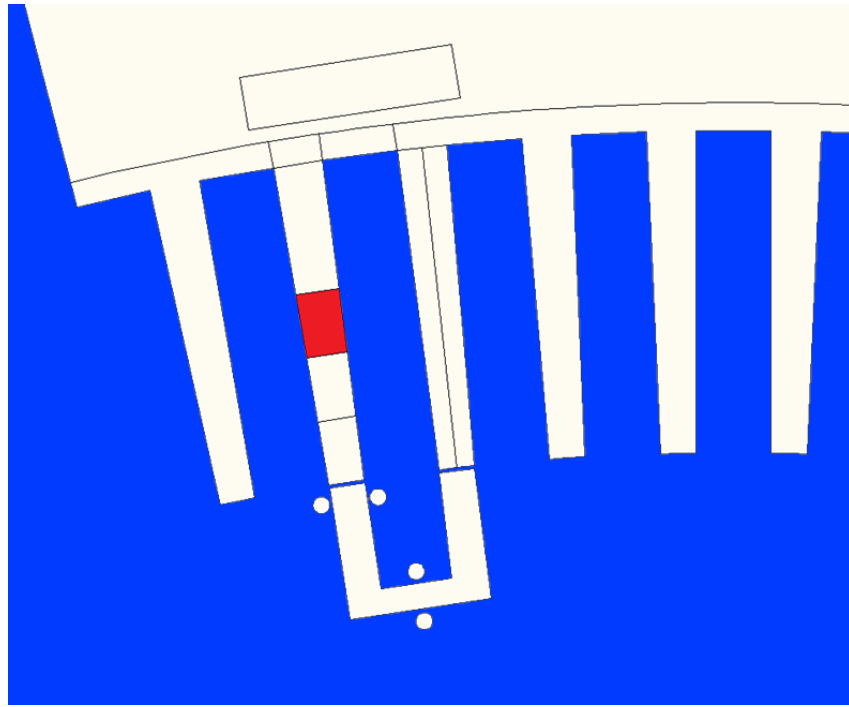


Рисунок 4.3. - Другий тип дефекту (Середина зубця)

Отримані дані підтверджують, що навіть невелике замикання на поверхні зубця призводить до різкої деформації магнітного поля, яка однозначно інтерпретується як критична несправність.

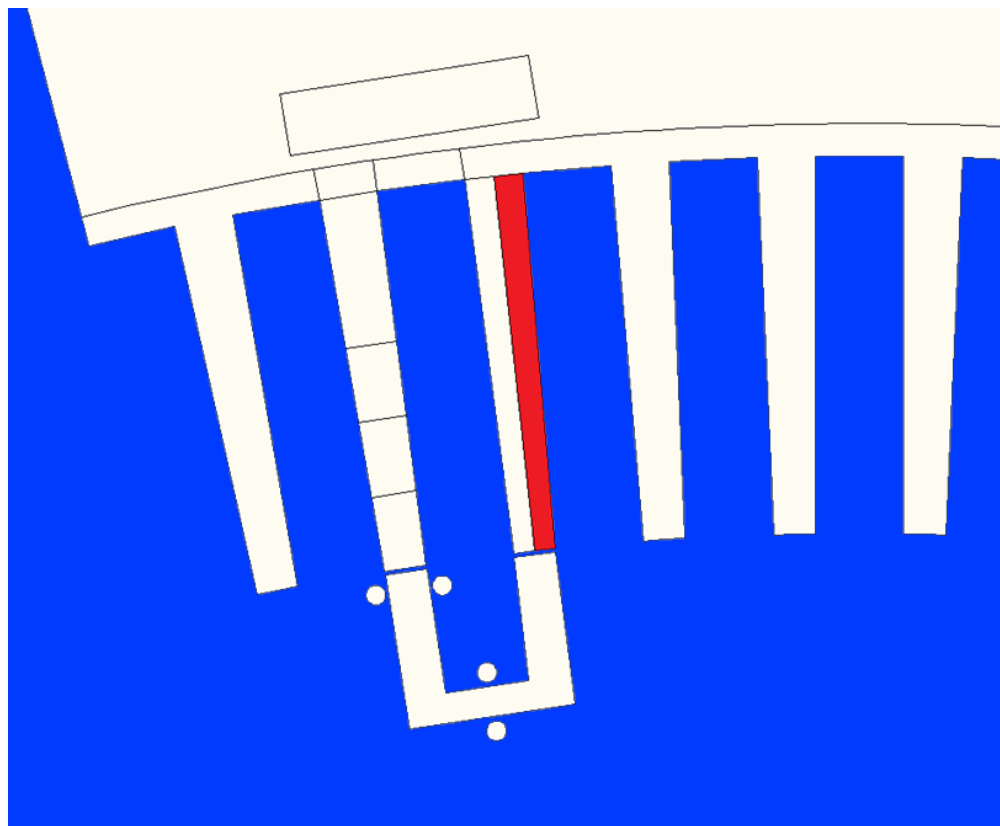


Рисунок 4.4. - Третій тип дефекту (ребро зубця)

Дефект у зоні ребра зубця фіксується гірше за попередні. Значення навіть із збільшеною частотою дають невеликі, але помітні відхилення.

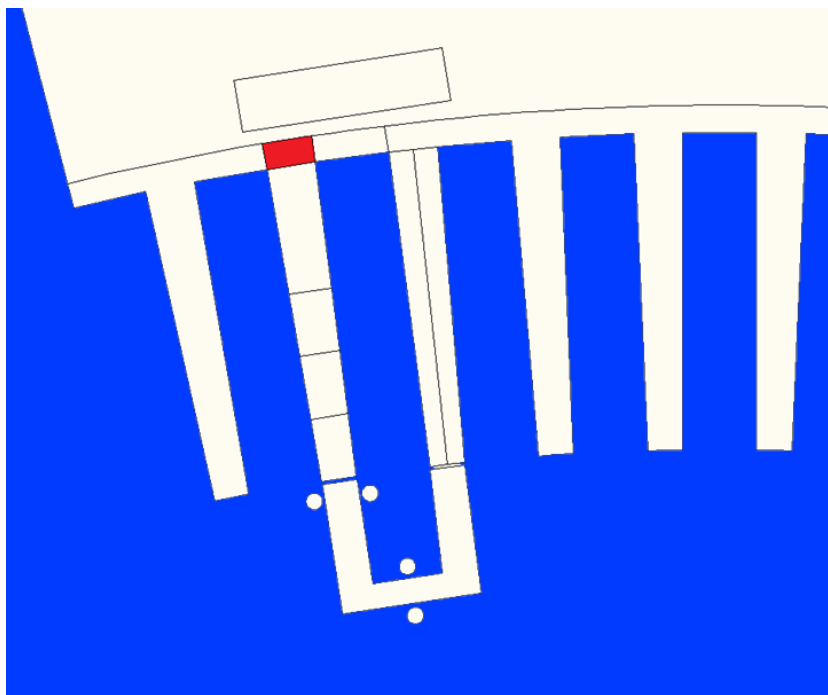


Рисунок 4.5. - Четвертий тип дефекту (спинка осердя між двома сусідніми пазами)

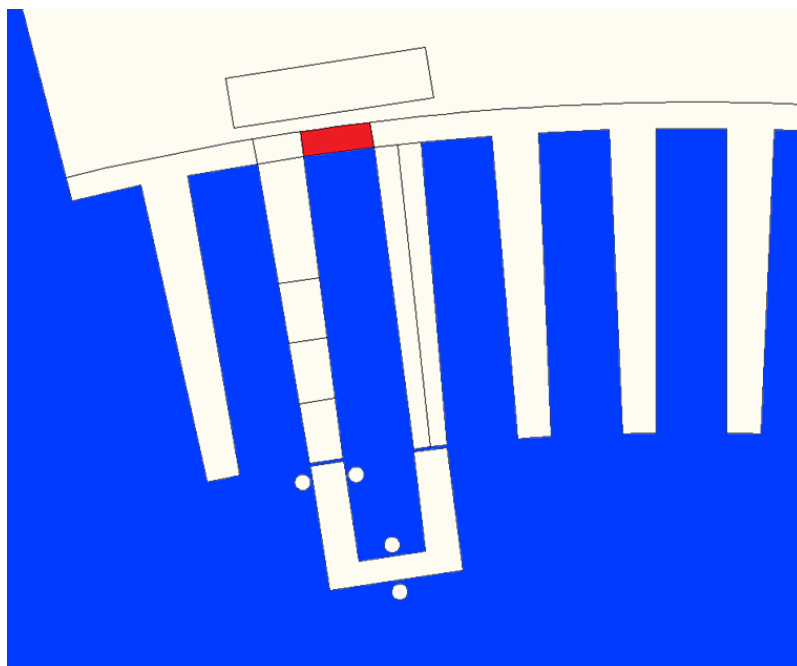


Рисунок 4.6. - П'ятий тип дефекту (дно паза)

Дослідження дефектів у зонах дна паза, та у зоні спинки осердя між сусідніми пазами дає кращі результати, ніж у зоні ребра зубця, але гірші ніж у зонах середини зубця або кінця зубця.

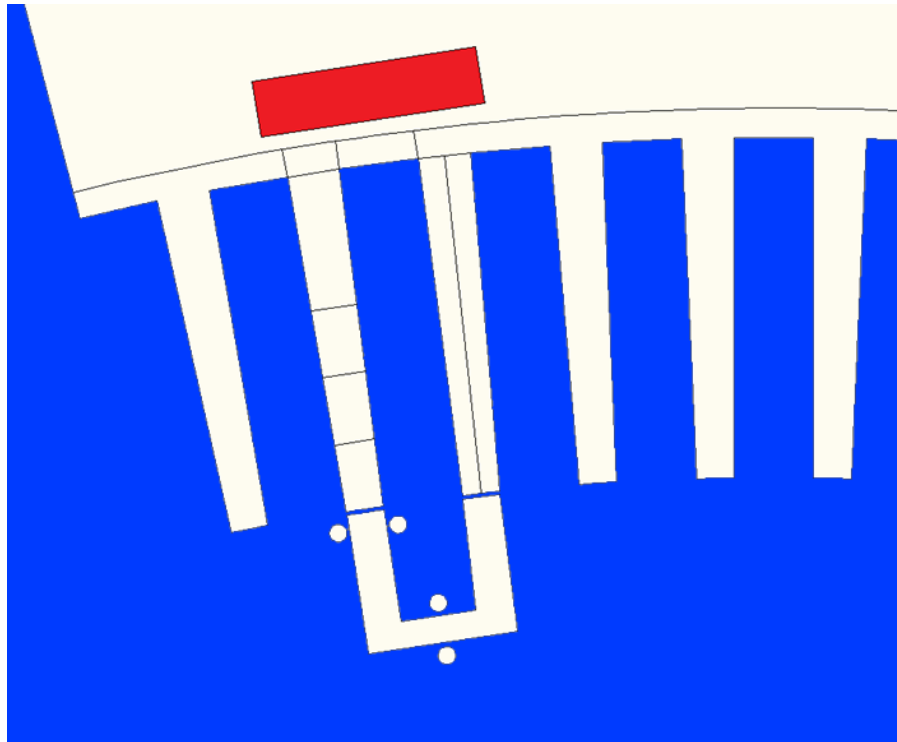


Рисунок 4.7. - Шостий тип дефекту (прихований дефект спинки осердя під пазом)

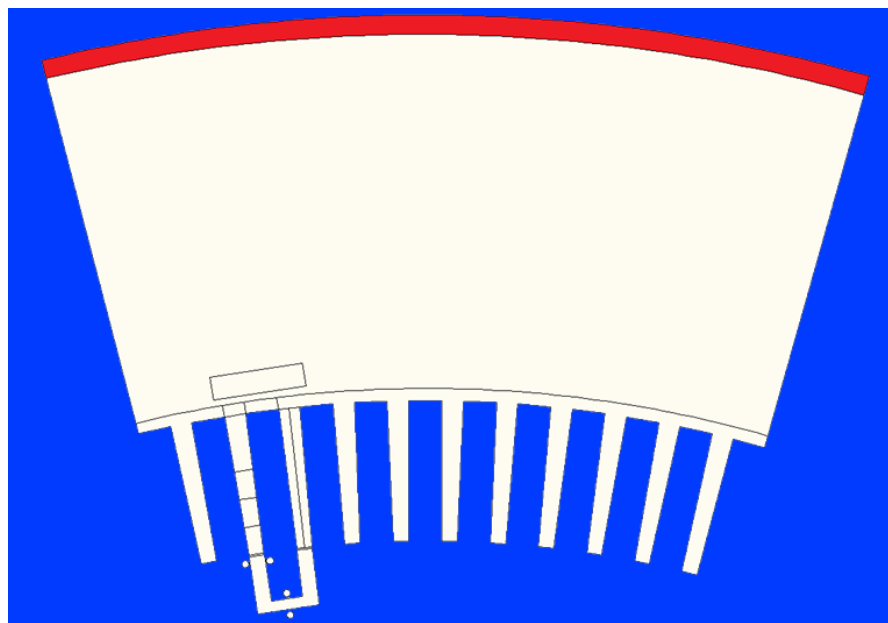


Рисунок 4.8 – Сьомий тип дефекту (дефект спинки осердя поблизу зовнішньої периферії)

Як показано у дослідях пов'язаних з дефектами спинки осердя поблизу зовнішньої периферії та прихованим дефектам спинки осердя, чим далі пошкодження від зубцевої зони, тим важче датчик фіксує пошкодження.

Виходячи з результатів моделювання можна прийти до висновку що збільшення частоти роботи датчика може позитивно вплинути на якість результатів дослідження.

4.3 Оцінка чутливості та похибки запропонованого методу до виявлення дефектів

На основі проведеного моделювання в COMSOL Multiphysics було встановлено чітку залежність між локалізацією пошкодження та чутливістю методу діагностики, що дозволило класифікувати дефекти за ступенем їх виявлення.

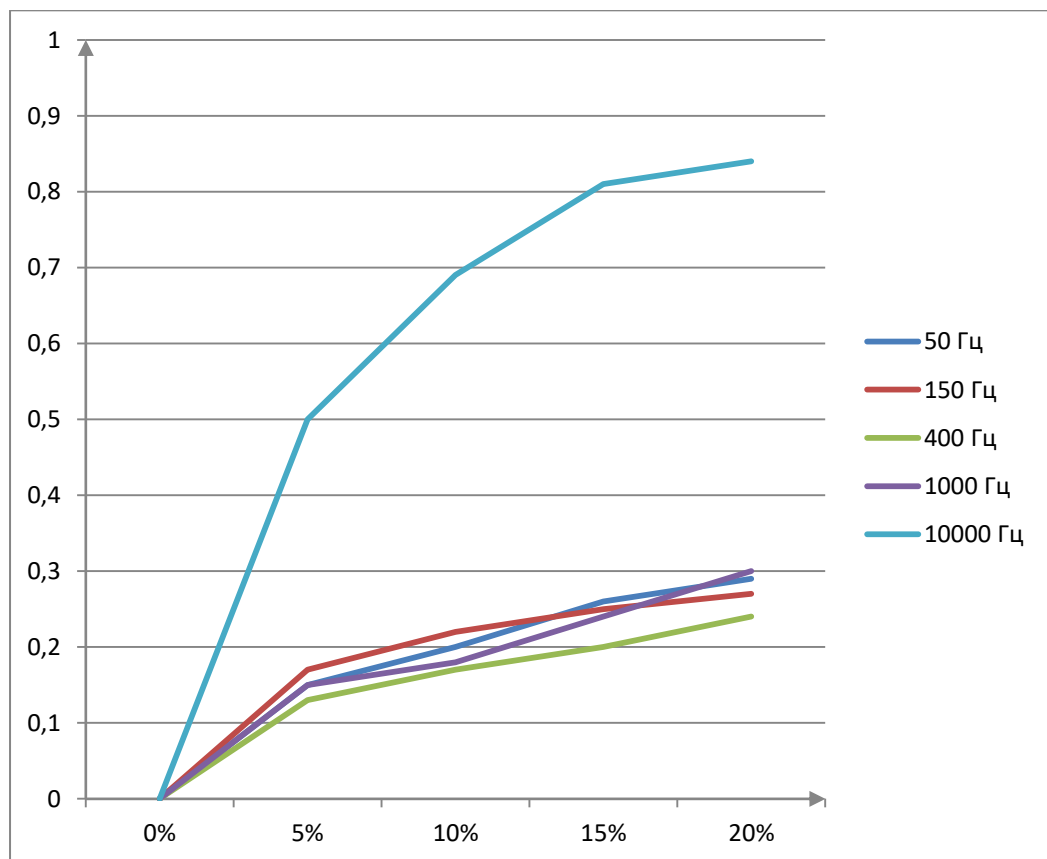


Рисунок 4.9 - Графік залежності відхилення напруги від розміру зони дефекту на кінчику зубця

Найкращі результати та найвищу амплітуду відгуку продемонстрували дефекти коронки зубця (Дефект 1) та в зоні середини зубця (Дефект 2). Оскільки ці зони розташовані безпосередньо на поверхні розточування статора або в безпосередній близькості до датчика, магнітне поле розсіювання фіксується практично без перешкод, що забезпечує максимальну точність ідентифікації місця замикання.

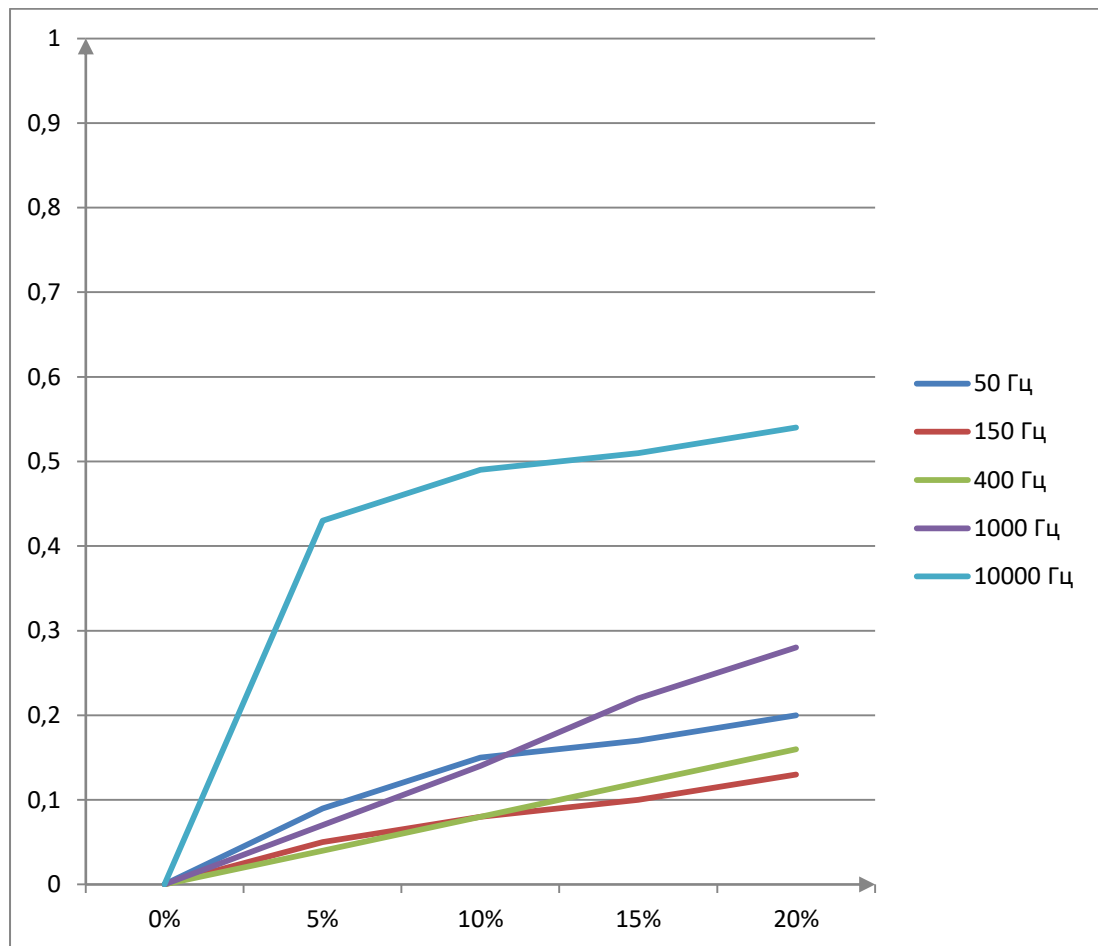


Рисунок 4.10 - Графік залежності відхилення напруги від розміру зони дефекту в середині зубця

Середню ефективність виявлення зафіксовано для групи дефектів, що включає дно паза (Дефект 5), спинку осердя між сусідніми пазами (Дефект 4) та (Дефект 3). У цих випадках спостерігається помірне послаблення сигналу, спричинене віддаленістю осередку замикання від вимірювальної котушки або частковим екрануванням магнітного потоку масивом сталі. Попри зниження амплітуди, результати моделювання підтверджують, що такі несправності

залишаються розрізняваними на загальному фоні та можуть бути надійно діагностовані при належному налаштуванні чутливості віртуального приладу.

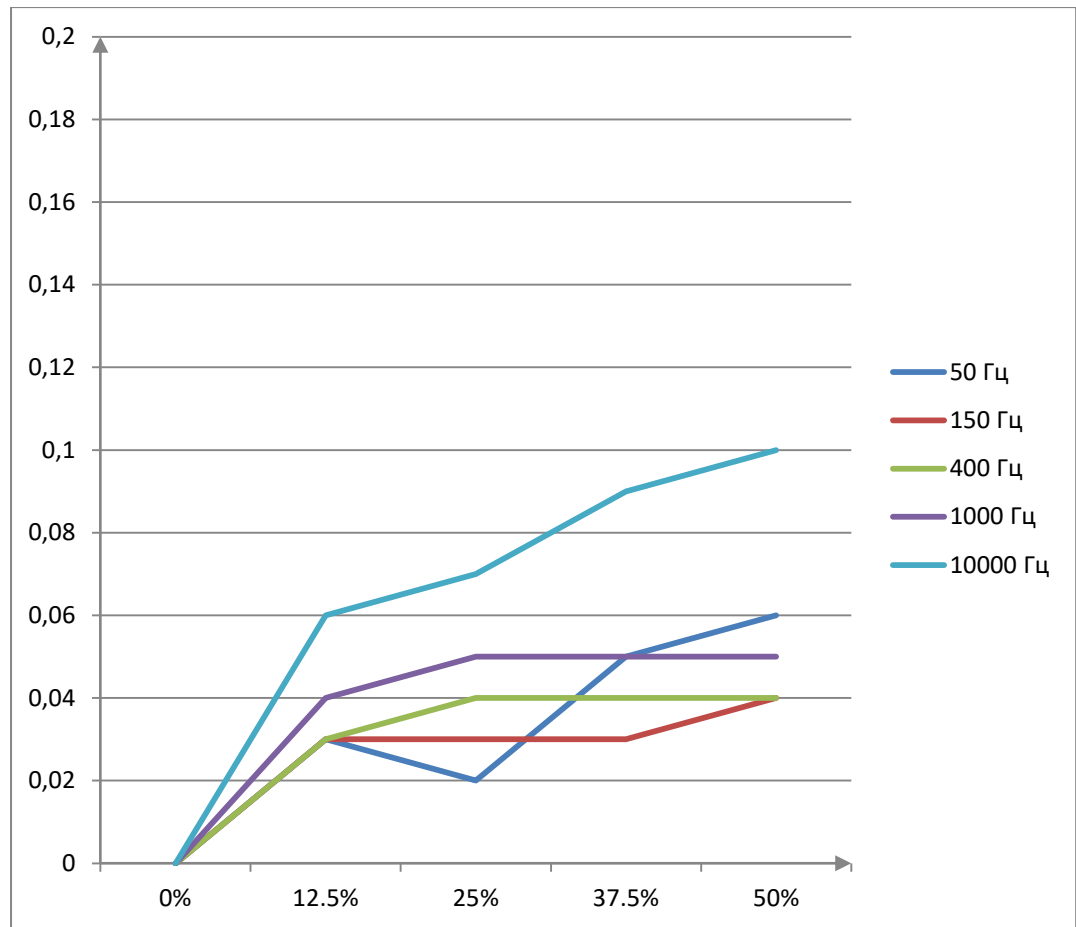


Рисунок 4.11 - Графік залежності відхилення напруги від розміру зони дефекту на боковій частині зубця

Найгірші показники виявлення притаманні прихованим дефектам спинки осердя під пазом (Дефект 6) та пошкодженням поблизу зовнішньої периферії статора (Дефект 7). Результати обробки даних у COMSOL показали, що через велику відстань від розточування статора та значний об'єм металу, який діє як бар'єр, корисний сигнал суттєво демпфується. Зокрема, останній дефект (Дефект 7) фіксується датчиком вкрай незадовільно, оскільки його магнітне поле розсіювання майже повністю замикається всередині спинки статора, практично не виходячи в робочу зону сканування.

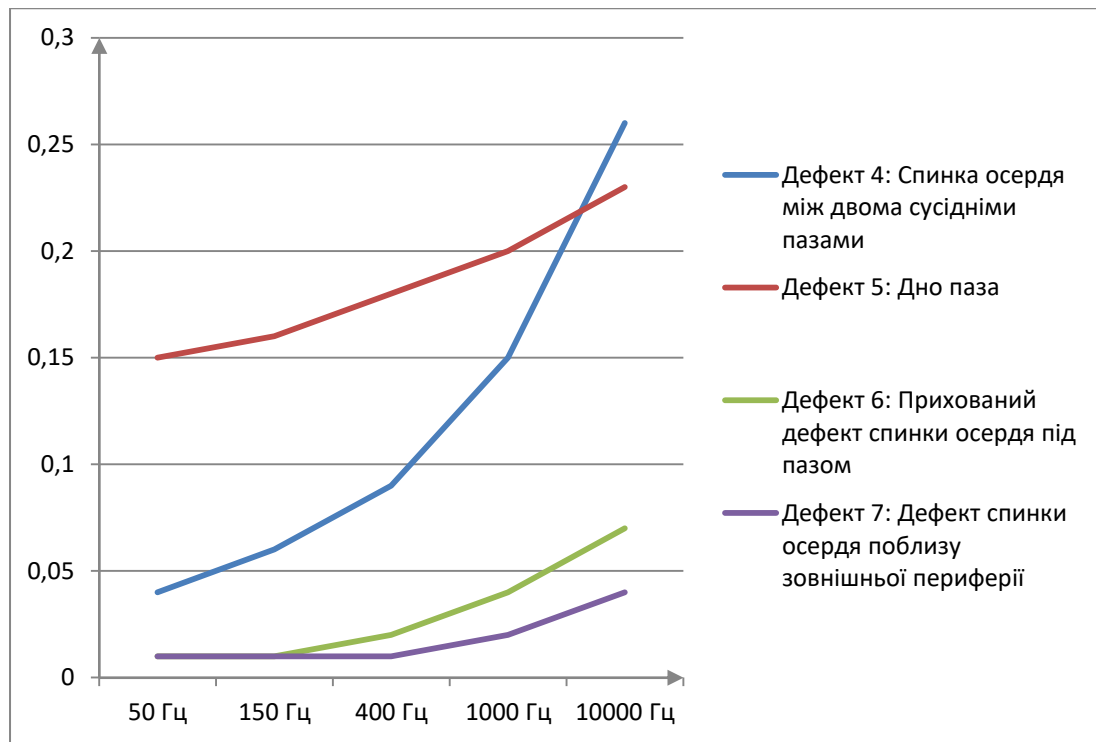


Рисунок 4.12 - Графік залежності відхилення напруги від частоти дефектів за межами зубців

Таким чином, проведене дослідження дозволяє зробити висновок про виражений поверхневий характер високої чутливості методу. Моделювання підтвердило, що ефективність діагностики прямо пропорційна глибині залягання дефекту. Це вказує на те, що при контролі віддалених від центру зон магнітопроводу необхідно враховувати високу ймовірність пропуску дефектів, які, попри слабкий магнітний сигнал, можуть створювати значні зони локального нагріву в периферійних частинах осердя двигуна.

4.4 Розробка практичних рекомендацій щодо впровадження методу в систему технічного обслуговування електричних машин

На основі проведених досліджень та отриманих результатів моделювання в COMSOL Multiphysics сформовано комплекс практичних рекомендацій щодо інтеграції методу у чинну систему планово-запобіжних ремонтів та технічного обслуговування. Впровадження цієї технології дозволяє перейти від стратегії

планового ремонту до обслуговування за фактичним технічним станом, що суттєво знижує ризики аварійних відмов великих електричних машин. [41]

Першочерговим кроком рекомендується впровадження обов'язкового тестування методом як базового інструменту вхідного та вихідного контролю під час капітальних ремонтів, що передбачають виймання ротора. Оскільки метод використовує низький рівень магнітного збудження, його слід проводити безпосередньо перед початком ремонтних робіт для ідентифікації прихованих дефектів та після їх завершення для підтвердження якості усунення замикань. Це дозволяє уникнути енергоємних та потенційно небезпечних випробувань на кільцеве намагнічування, зберігаючи ресурс ізоляції статора.

Для ефективного моніторингу рекомендується створення цифрового паспорта кожної машини, куди заноситимуться результати сканування у вигляді порівняльних дефектограм. Аналіз трендів зміни квадратурної складової струму протягом декількох років дозволить виявляти динаміку старіння міжлистової ізоляції та прогнозувати термін безпечної експлуатації магнітопроводу. Особливу увагу слід приділяти зонам вентиляційних каналів та торцевих пакетів, де, згідно з результатами моделювання, найчастіше спостерігаються концентрації магнітних потоків розсіювання та механічні пошкодження.

Практичне відпрацювання навичок встановлення датчика є досить важливим для уникнення помилкових результатів. Економічна доцільність впровадження методу підкріплюється можливістю проведення локальних ремонтів без повного перешихтування статора. Такий підхід забезпечує максимальну прозорість процесу прийняття рішень щодо обсягів ремонтних робіт та мінімізує ймовірність масштабних аварій, спричинених пожежею в залізі.

4.5 Висновки до розділу 4

Проведено експериментальні дослідження та верифікацію результатів розробленого методу діагностики дефектів міжлистової ізоляції магнітного

осердя синхронного двигуна серії СДН-2-17-26-16. Геометрична модель активної частини двигуна розроблена в середовищі AutoCAD і імпортована в COMSOL Multiphysics. Це дозволило провести серію контрольованих чисельних експериментів з моделюванням семи типів дефектів міжлистової ізоляції різної локалізації та глибини залягання.

Аналіз результатів моделювання підтвердив високу чутливість запропонованого методу електромагнітного контролю до поверхневих дефектів (Дефект 1 - коронка зубця та Дефект 2 - середина зубця). Найкращі результати отримані саме для цих зон завдяки близькому розташуванню до датчика. Середню чутливість продемонстровано для дефектів на ребрі зубця, дні паза та спинці осердя між пазами (Дефекти 3-5). Найнижчу ефективність виявлено для глибоко прихованих дефектів спинки осердя (Дефекти 6 і особливо 7), що пояснюється значним демпфуванням сигналу масивом сталі.

На основі отриманих даних сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження методу у систему технічного обслуговування потужних електричних машин. Рекомендовано використовувати його для вхідного та вихідного контролю під час капітальних ремонтів, створення цифрових паспортів статора, моніторингу динаміки розвитку дефектів у часі та переходу до стратегії ремонтів за фактичним технічним станом.

Результати розділу підтверджують ефективність і перспективність розробленого методу для раннього виявлення дефектів міжлистової ізоляції, точної локалізації пошкоджень та підвищення надійності експлуатації синхронних двигунів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо вдосконалення методики діагностики магнітних систем електродвигунів за допомогою методу електромагнітного контролю. Дослідження проведені із використанням параметрів електродвигуна СДН-2-17-26-16. Проведений аналіз літературних джерел підтвердив, що деградація міжлистової ізоляції статора є одним із критичних факторів, що обмежують термін експлуатації потужних електричних машин. Обґрунтовано переваги використання індукційного методу діагностування, який, на відміну від традиційних теплових випробувань та випробувань, що визначають питомі втрати в осерді, дозволяє проводити безпечну та точну дефектоскопію без ризику додаткового термічного пошкодження активної сталі.

За результатами проведеного дослідження можливо зробити наступні висновки:

Проведено літературний огляд існуючих методів діагностики дефектів міжлистової ізоляції шихтованих магнітних осердь. Встановлено, що метод електромагнітного контролю є одним із найбільш перспективних для раннього виявлення дефектів завдяки високій чутливості, безпеці та низькому енергоспоживанню порівняно з традиційними випробуваннями.

За результатами аналізу встановлено, що дефекти міжлистової ізоляції є однією з головних причин зниження надійності потужних двигунів, призводячи до локальних перегрівів, зростання втрат потужності та ризику виникнення аварій.

Розроблено геометричну модель шихтованого магнітного осердя статора двигуна яка використовується для побудови точної чисельної імітаційної моделі.

Розроблено чисельну скінченно-елементну модель у двовимірній постановці в програмному комплексі COMSOL Multiphysics, яка враховує нелінійні магнітні властивості електротехнічної сталі та реальну геометрію пазо-зубцевої зони.

Розроблено моделі семи типових дефектів міжлистової ізоляції різної локалізації та глибини залягання (поверхневі, приховані, крайові), що дозволило провести контрольоване дослідження їх впливу на розподіл магнітного поля.

Проведено моделювання різного типу дефектів при різних частотах збудження. Отримані результати розподілу магнітної індукції, вихрових струмів і полів розсіювання.

Проведено аналіз чутливості запропонованого методу електромагнітного контролю. Встановлено, що метод демонструє високу чутливість до поверхневих дефектів коронки та тіла зубця, задовільну чутливість до дефектів у зоні паза та спинки осердя між пазами, та знижену чутливість до глибоко прихованих дефектів зовнішньої спинки статора. Серед переваг методу є невисока потужність діагностики і відсутність необхідності в великих значення магнітної індукції

Чутливість датчика підвищується в залежності з збільшенням частоти, що доводять найбільш якісні результати при частоті у 10 кГц, але для діагностування дефектів на кінці зубця та у середині зубця достатньо і частоти у 150 Гц. Зі збільшенням частоти якість результатів датчика зростає у всіх випадках. Однак у прикладі де зони пошкодження не перевищують 5% відсотків метод дає незначні результати. При дослідженні спинки осердя поблизу зовнішньої периферії, а також прихованого дефекту спинки осердя вимірювання різниці напруги не перевищує 0.1 в.о. що знаходяться на межі похибки. Це доводить що для діагностики цих ділянок необхідно впроваджувати вдосконалення методу.

Розроблено рекомендації щодо впровадження методу у систему технічного обслуговування потужних електродвигунів, що дозволяє перейти від планово-профілактичних ремонтів до обслуговування за фактичним технічним станом.

Результати роботи можуть бути використані на підприємствах енергетичного, нафтогазового та інших секторів промисловості, де експлуатуються високовольтні електродвигуни.

Перелік посилань

1. Wang J., Cao Z., Dai H., Sun F. The application of ELCID on inter-laminar insulation failure of generator stator core. 2020 IEEE 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2020. DOI: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233107.
2. Kocman S., Orsag P., Pecinka P. Simulation of selected induction motor operating conditions using COMSOL software. - 2018. - DOI: 10.15598/aeer.v16i3.2824.
3. Hamzehbahmani H., Anderson P., Jenkins K., Lindenmo M. Experimental study on inter-laminar short-circuit faults at random positions in laminated magnetic cores. IET Electric Power Applications. 2016. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0585.
4. Vaskovskyi Y. M., Kovalenko M. A. DIAGNOSTICS OF INDUCTION MOTOR ROTOR COMBINED DEFECTS WITH AN INDUCTION METHOD // Electrical Engineering & Electromechanics. 2013. № 3. С. 21–24. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.3.04>
5. Lee S. B., Kliman G. B., Shah M., Mall W. T. An advanced technique for detecting inter-laminar stator core faults in large electric machines. IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 41, no. 5. P. 1185–1193. DOI: 10.1109/TIA.2005.853383.
6. Bertenshaw D. R., Smith A. C., Ho C. W., Chan T., Sasic M. Detection of stator core faults in large electrical machines. IET Electric Power Applications. 2012. DOI: 10.1049/iet-epa.2011.0125.
7. Bertenshaw D. Stator core interlamination faults and their detection by electromagnetic means. — 241 p. — 2014.
8. Vas'kovskij Yu. N., Kovalenko M. A. Issledovanie ustrojstva kontrolya korotkozamknutoj obmotki rotora asinhronnogo dvigatelya // Electrical Engineering & Electromechanics. 2011. № 6. С. 18–22.

9. Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Lind L., Virro I., Rassõlkin A., Dedova T. Laser additively manufactured magnetic core design and process for electrical machine applications. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 10. Art. 3665. DOI: 10.3390/en15103665.

10. Vas'kovskij Yu. N., Kovalenko M. A. Issledovanie i optimizaciya ustrojstva diagnostiki defektov obmotki rotora korotkozamknutogo asinhronnogo elektrodvigatelya // *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2012. № 2. С. 12–18.

11. Lamprecht E., Graf R. Fundamental investigations of eddy current losses in laminated stator cores created through the impact of manufacturing processes. 2011 International Electric Drives Production Conference. 2011. DOI: 10.1109/EDPC.2011.6085544.

12. Regnet M., Schmidt M., Valencia Pérez A., Löhlein B., Reinlein M., Dietz A., Germishuizen J., Parspour N. Magnetic measurements of a stator core under manufacturing influences and the impacts on the design process of a reluctance synchronous machine. *Machines*. 2025. Vol. 13, no. 9. Art. 761. DOI: 10.3390/machines13090761.

13. Chumack V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Bazenov V., Ihnatiuk Y., Stulishenko A. Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, no. 5 (124). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.286002.

14. Chumack V., Kovalenko M., Tymoshchuk O., Dukhno R. Detecting insulation defects in electrical machines' multi-turn windings based on analysis of transient electromagnetic processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, no. 5 (137). P. 19–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342301.

15. Mahmouditabar F., Baker N. A review on the effect of electrical steel manufacturing processes on the performance of electric machines. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 24. Art. 7954. DOI: 10.3390/en16247954.

16. Chumack V., Kovalenko M., Tymoshchuk O., Stulishenko A., Ihnatiuk Y. Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, no. 8 (123). P. 54–63. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.282375.

17. Чумак В. В., Троценко Ю. О., Коваленко М. А., Ігнатюк Є. С., Стулішенко А. С. Study of physical processes in laminated magnetic cores of electric machines. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 4. С. 37–43.

18. Vas'kovskij Yu. N., Kovalenko M. A. Trehmernaya polevaya matematicheskaya model' ustrojstva diagnostiki korotkozamknutoj kletki rotora asinhronnyh dvigatelej // *Праці ІЕД НАНУ*. 2012. № 31. С. 78–83.

19. Kocman S., Pečínka P., Hrubý T. Induction motor modeling using COMSOL Multiphysics // 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). — Prague, 2016. — P. 408–412. — DOI: 10.1109/EPE.2016.7521727.

20. Чумак В., Коваленко М., Горбатко Д., Духно Р. Моделювання електричних і магнітних перехідних процесів у системі з індуктором і статором електричних машин змінного струму. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2025. № 2 (14). С. 66–70. DOI: 10.20998/2079-3944.2025.2.10.

21. Васьковский Ю., Коваленко М. ДИАГНОСТИКА СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ // *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 69.

22. Чумак В., Коваленко М., Тимощук О., Ігнатюк Є., Коваленко І. Комплексна оцінка якості ламінованих осердь електричних машин високочастотним індукційно-вібраційним методом. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2023. № 2 (10). С. 26–32. DOI: 10.20998/2079-3944.2023.2.05.

23. Ebeling C. An introduction to reliability and maintainability engineering. 1st ed. Long Grove, Illinois : Waveland Press, 2010.

24. Kim M., Allen M. G. Interlamination insulation design considerations for laminated magnetics operating at high frequencies. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2910477.

25. Коваленко М., Чумак В., Коваленко І., Ткачук І., Вишневський О. Пристрій для контролю якості міжлистової ізоляції шихтованого магнітопроводу високочастотним індукційним методом. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2025. № 2 (14). С. 45–53. DOI: 10.20998/2079-3944.2025.2.07.

26. Altayef E. M., Anayi F., Packianather M. S. Experimental investigation on impacts of insulation damage fault between laminations of power transformers. 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). 2022. DOI: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823834.

27. Li Z. A review of magnetic core materials, core loss modeling and measurements in high-power high-frequency transformers. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2022. Vol. 7, no. 4. P. 359–373. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2022.00033.

28. Kovalenko M., Chumack V., Grebenikov V., Mazurenko L., Tkachuk I., Bazarov O., Titov Y. Determining the influence of structural and electromagnetic parameters on active losses in an electric motor with permanent magnets for unmanned aerial vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 6, no. 5 (138). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344817.

29. Chumak V. V., Kovalenko M. A., Trotsenko Y. O., Stulishenko A. S., Tymoshchuk O. L. High-frequency methods for detecting insulation defects in mesh winding generators of power plants based on renewable energy sources. *Renewable and Hydrogen Energy*. 2023. No. 4 (71). P. 56–63. DOI: 10.36296/1819-8058.2022.4(71).56-63.

30. Akuru U. B., Okoro O. I., Amara Y. (eds.). *Mathematical modelling and numerical analysis in electrical engineering*. 2nd ed. Basel : MDPI, 2024. DOI: 10.3390/books978-3-7258-4684-9.

31. Hamzehbahmani H., Anderson P., Jenkins K. Interlaminar insulation faults detection and quality assessment of magnetic cores using flux injection probe. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2413900.
32. Ridley G. K., Bertenshaw D. R. A deeper insight into EL CID. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2005. Vol. 12, no. 4. P. 87–91.
33. Jia Z., Bai Y., Zhang Z., Hu W. Analysis on detection principle of electromagnetic core imperfection detector method for generator stator core. *High Voltage Engineering*. 2015. Vol. 41, no. 1. P. 123–131. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.01.017.
34. Klempner G. Experience and benefit of using EL-CID for turbine-generators. *Electric Power Research Institute Motor & Generator Predictive Maintenance & Refurbishment Conference*. Orlando, Florida, 28–30 November 1995.
35. Smith A. C., Bertenshaw D., Ho C. W., Chan T., Sasic M. Detection of stator core faults in large turbo-generators // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2009). — Miami, USA, 2009. — P. 911–918. — DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075290.
36. Hamzehbahmani H., Anderson P., Jenkins K. Detection and quality assessment of inter-laminar insulation faults in magnetic cores using a flux injection probe // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2015. — Vol. 30, No. 5. — P. 2205–2214. — DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2413900.
37. Sahdev S. K. *Electrical machines*. New Delhi : Cambridge University Press India Pvt. Ltd., 2018.
38. Lee S. B., Kliman G. B., Shah M., Kim D. Experimental study of inter-laminar core fault detection techniques based on low flux core excitation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21, no. 1. P. 85–94. DOI: 10.1109/TEC.2005.853759.
39. Penrose H. *Electrical motor diagnostics*. 2nd ed. Success by Design Publishing, 2008.
40. Wilow V. *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics : master thesis*. Stockholm : Royal Institute of Technology (KTH), 2014.

41. Hamzehbahmani H. An enhanced analysis of inter-laminar faults in magnetic cores with grain oriented electrical steels for fault diagnosis and condition monitoring: theoretical background and experimental verification. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. Vol. 72. Art. 6002610. DOI: 10.1109/TIM.2023.3253882.