

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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 613.333

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В.Ф.Шинкаренко

« 18 » 05 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

на тему: «Методика оцінки стану міжлистової ізоляції шихтованих
магнітопроводів електричних машин»

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕМ-61м
Духно Роман Павлович

Керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Чумак В.В.

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
Печеник М.В.

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

Студент

(підпис)

Київ – 2018

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

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

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

УЗГОДЖЕНО

Генеральний директор НВПІ

«ДАК - Електропром»

Давиденко О.Г.

«18» 10 2018 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В.Ф.Шинкаренко

«15» 10 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Духну Роману Павловичу

1. Тема дисертації «Методика оцінки стану міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин»,

науковий керівник дисертації Чумак Вадим Володимирович, к.т.н. доцент

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

затверджені наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 981-С

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження шихтовані магнітопроводи електричних машин загального призначення

4. Предмет дослідження висоочастотні та швидкоплинні процеси в шихтованих магнітопроводах

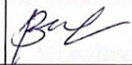
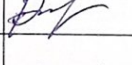
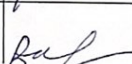
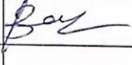
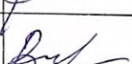
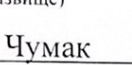
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз появи та розвитку дефектів шихтованих магнітопроводів у процесі виробництва, ремонту та експлуатації; 2. Оцінка питомих втрат в активної сталі відомими експериментальними і математичними методами; 3. Розробка нової методики оцінки стану якості шихтованих осердь; 4. Математичне та експериментальне підтвердження отриманих результатів

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу таблиці експериментальних результатів визначення питомих втрат, результати розподілу втрат, результати експерименту холостого ходу, результати проведення запропонованого методу, результати математичного розрахунку підтвердження запропонованого методу.

7. Орієнтовний перелік публікацій 1. Частотний метод технічного контролю якості шихтованого магнітного осердя. 2. Визначення втрат у шихтованому магнітопроводі польовим методом при живленні напругою змінної частоти

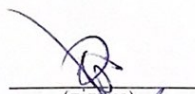
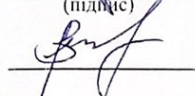
8. Дата видачі завдання 15 жовтня 2016 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук та аналіз наукових робіт по темі роботи	від 15.10.2016 до 01.10.2017	
2	Розроблення структури та більш детальний план змісту роботи	від 02.10.2017 до 25.12.2017	
3	Підготовка до експериментального визначення питомих втрат в магнітопроводі	від 01.02.2018 до 01.03.2018	
4	Експериментальне визначення питомих втрат в магнітопроводі	від 02.03.2018 до 11.03.2018	
5	Розробка нової методики дослідження	від 12.03.2018 до 01.04.2018	
6	Експериментальне підтвердження методики	від 02.04.2018 до 20.04.2018	
7	Розрахункове підтвердження методу	від 21.04.2018 до 28.04.2018	
8	Аналіз отриманих результатів	від 29.04.2018 до 08.05.2018	
9	Оформлення пояснювальної записки	від 09.05.2018 до 15.05.2018	

Студент

Науковий керівник дисертації


(підпис)

(підпис)

Р.П. Духно
(ініціали, прізвище)
В.В. Чумак
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Методика визначення стану міжлистової ізоляції є актуальною проблемою, оскільки жоден з існуючих методів не є легким чи швидким у виконанні. Це змушує працівників ремонтних цехів нехтувати такими експериментами, що призводить до частих відказів та малої надійності електричних машин у післяремонтний період. Розробка зручного методу дасть змогу покращити цю ситуацію.

Метою роботи є розробка та опробування нового методу дослідження якості міжлистової ізоляції магнітопроводу, який буде легким та швидким у виконанні, та не потребуватиме зразкового магнітопроводу для порівняння.

У роботі були розглянуті, проаналізовані та використані деякі методи дослідження дефектів активної сталі асинхронних двигунів загального призначення і запропоновано новий метод дослідження якості міжлистової сталі, що базується на високочастотних вимірах.

Дисертація складається з 113 сторінок, 41 ілюстрації, 35 таблиць та 70 джерел інформації.

Ключові слова: магнітопровід, міжлистова ізоляція, втрати в сталі, вихрові струми, високочастотні випробовування.

РЕФЕРАТ

Методика определения состояния межлистовой изоляции является актуальной проблемой, поскольку ни один из существующих методов не является легким или быстрым в исполнении. Это заставляет работников ремонтных цехов пренебрегать такими экспериментами, что приводит к частым отказам и малой надежности электрических машин в послеремонтный период. Разработка удобного метода позволит улучшить эту ситуацию.

Целью работы является разработка и опробование нового метода исследования качества межлистовой изоляции магнитопровода, который будет легким и быстрым в исполнении, и не потребует образцового магнитопровода для сравнения.

В работе были рассмотрены, проанализированы и использованы некоторые методы исследования дефектов активной стали асинхронных двигателей общего назначения и предложен новый метод исследования качества межлистовой стали, основанный на высокочастотных измерениях.

Диссертация состоит из 113 страниц, 41 иллюстрации, 35 таблиц и 70 источников информации.

Ключевые слова: магнитопровод, межлистового изоляция, потери в стали, вихревые токи, высокочастотные испытания.

ABSTRACT

The method of determining the state of inter-sheet insulation is an actual problem, since none of the existing methods is easy or fast in execution. This forces workers in repair shops to neglect such experiments, which leads to frequent failures and low reliability of electric machines in the post-repair period. The development of a convenient method will improve this situation.

The aim of the work is to develop and test a new method for investigating the quality of the interlayer insulation of the magnetic circuit, which will be light and fast in execution, and will not require an exemplary magnetic circuit for comparison.

In the work, some methods for studying the defects of active steel of general-purpose asynchronous motors were considered, analyzed and used, and a new method for investigating the quality of inter-sheet steel based on high-frequency measurements was proposed.

The thesis consists of 113 pages, 41 illustrations, 35 tables and 70 sources of information.

Key words: magnetic core, interlayer insulation, steel losses, eddy currents, high-frequency tests.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОЯВИ ТА РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ У ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ	31
1.1 Загальні відомості про втрати в магнітопроводі, типи та класифікація дефектів магнітопроводу	31
1.2 Складові втрат в магнітопроводі	32
1.2.1 Втрати на гістерезис	33
1.2.2 Втрати на вихрові струми	34
1.2.3 Сумарні втрати в магнітопроводі	35
1.3 Причини дефектів магнітопроводу	36
1.3.1 Різання	36
1.3.2 Зусилля пресування	38
1.3.3 Скріплення пакетів у суцільний магнітопровід	39
1.3.4 Віджигання	40
1.3.5 Поміщення магнітопроводу в корпус ЕМ	42
1.3.6 Локальні дефекти магнітопроводів	42
Висновок до розділу 1	44
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ВТРАТ У СТАЛІ ВІДОМИМИ РОЗРАХУНКОВИМИ І МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ	45
2.1 Визначення питомих втрат в сталі експериментальним методом в окремо взятому магнітопроводі	45
2.2 Розподілення магнітної індукції в магнітопроводі	55
2.3 Розділення вимірних втрат на складові	57
2.3.1 Огляд та аналіз існуючих моделей розрахунку втрат	58
2.3.1.1 Моделі, що базуються на рівнянні Штейнмеца	59
2.3.1.2 Моделі, що ґрунтуються на розділенні втрат	62
2.3.1.3 Моделі гістерезису	66
2.3.2 Розділення втрат	69
2.4 Визначення питомих втрат в зібраному двигуні із застосуванням досліджуваного магнітопроводу	73
Висновок до розділу 2	76
РОЗДІЛ 3 НОВИЙ МЕТОД ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ	77
3.1 Новий метод та методика дослідження	77
3.2. Експериментальна перевірка методу	79

3.3 Математичний розрахунок значень напруги та втрат для магнітопроводів різного ступеню дефектності.....	88
3.4 Аналіз експериментів та розрахунків.....	100
Висновок до розділу 3	102
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	103
4.1 Опис ідеї проекту	103
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	104
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту.....	104
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	104
Висновок до розділу 4	105
ВИСНОВКИ	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	113

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМ	Електрична машина
АД	Асинхронний двигун
ГВЧ	Генератор високої частоти
SE	Рівняння Штейнмеца

ВСТУП

Мета роботи – розробка та опробування нового методу дослідження якості міжлистової ізоляції магнітопроводу, який буде легким та швидким у виконанні і не буде потребувати зразкового магнітопроводу для порівняння.

Об’єкт дослідження – шихтовані магнітопроводи електричних машин загального призначення

Предмет дослідження – високочастотні та швидкоплинні процеси в шихтованих магнітопроводах.

Наукова новизна полягає:

1. Вперше встановлено зв’язок параметрів магнітопроводу різного ступеню дефектності при високочастотних впливах з питомими втратами в шихтованому осерді при промисловій частоті та індукції 1 Тл, що відповідає нормативних методам оцінки питомих втрат у тороїдальних шихтованих магнітопроводах

2. Вперше запропоновано метод оцінки стану міжлистової ізоляції шихтованих осердь ЕМ, який полягає в тому, що рівень дефектності магнітопроводу визначається не шляхом порівняння властивостей дефектного магнітопроводу з бездефектним в просторі, а шляхом реакції магнітопроводу на високочастотний вплив на різних частотах, тобто оцінка відбувається в часовому вимірі.

Методи дослідження чисельне моделювання електромагнітних процесів в шихтованих магнітопроводах в програмному математичному пакеті COMSOL multiphysics, методи теорії планування експерименту, розрахунок рівнянь методом наближення кривої в програмному математичному пакеті Wolfram Alpha.

Практична цінність полягає у тому, що розроблений метод можна використовувати на ремонтних підприємствах і тим самим покращити надійність післяремонтної експлуатації, збільшити час до повторного звернення до ремонту. Метод є простим у виконанні і не потребує ні багато часу, ні еталонного магнітопроводу для порівняння з ним.

Публікації. За темою опубліковано 2 статті:

1. Духно Р.П. Частотний метод технічного контролю якості шихтованого магнітного осердя / Коваленко М.А., Низкогуз П.В., Духно Р.П. // Тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково практичної конференції. Новината за напреднали наука, глава 17. – Софія: «Бял Град-БГ ОДД», 2018. С. 40-44.
2. Духно Р.П. Визначення втрат у шихтованому магнітопроводі польовим методом при живленні напругою змінної частоти / Коваленко М.А., Вівчаренко О.О., Духно Р.П. // Тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково практичної конференції. Новината за напреднали наука, глава 23. – Софія: «Бял Град-БГ ОДД», 2018. С. 35-40.

Зв'язок з науковими програмами – робота пов'язана з планом науково-дослідної роботи з теми “Використання частотних характеристик для оцінки стану ізоляції обмоток електричних машин”, державний реєстраційний номер 0118U000543.

Опис проблеми. При проектуванні електричної машини її робочі характеристики, оптимальні режими роботи, тепловий стан та багато інших факторів розраховуються використовуючи номінальні значення параметрів сталі, обмоток та загалом усіх матеріалів, які використовуються у машині. Проте, ці матеріали не завжди мають заявлені характеристики і якість. Наприклад під час виготовленні та штампування листів електротехнічної сталі вона зазнає значного рівня впливу, який певним чином впливає на її характеристики. До того ж, навіть якщо припустити, що під час виробництва всі етапи виготовлення матеріалу прийшли бездоганно, стан і як наслідок параметри матеріалів та ЕМ в цілому змінюються під час експлуатації в результаті аварійних ситуацій або навіть простого старіння і зносу.

Тож зважаючи на ці факти, стає зрозуміло, що під час запланованих чи незапланованих ремонтних робіт має сенс перевіряти стан матеріалів, ізоляції, оскільки від їх стану залежить допустимі навантаження, температурний режим і т.п. Зокрема стан магнітопроводу значною мірою визначає температуру навколо провідників в пазах і як результат визначає скільки реально прослужить обмотки на відміну від зазначеного терміну

експлуатації та номінальної потужності на якій варто використовувати цю ЕМ.

Поняття стан магнітопроводу можна розділити на стан електротехнічної сталі та стан її ізоляції. Перша складова досить слабо змінюється під час експлуатації та загалом викликана “старінням” сталі якщо не брати до уваги якісь серйозні пошкодження в результаті аварійних ситуацій, проте вона може бути порушена під час виготовлення. А ось саме друга складова зазнає значного впливу під час експлуатації і значним чином визначає якість магнітопроводу в цілому.

Тож проблема полягає у тому, як приклавши якомога менше зусиль, що з точки зору бізнесу означає якомога дешевше, зробити оцінку стану магнітопроводу.

Аналіз літератури та існуючих методів. Аналіз зарубіжної літератури показав що, більшість наукових публікацій які вдалося знайти під дослідженням сталі магнітопроводів мають на увазі дослідження сталі, яка ще не зібрана в пакет статора.

Найпоширенішим методом є вимірювання втрат, представлений в [1], що називається вимірюванням петлі гістерезису. У цьому методі сердечник намотується як трансформатор з двома обмотками: первинна обмотка використовується для збудження, а вторинна для вимірювання індукованої напруги. Втрати в осерді можуть бути розраховані шляхом інтегрування добутку вимірюваної напруги та струму, що проходить через первинну обмотку. Хоча цей метод має деякі недоліки, такі як необхідність віднімання втрат обмотки від вимірюваних втрат та фазових розбіжностей, обумовлених фізичними явищами, або фізичними обмеженнями вимірювальних пристроїв [2], [3], це вважається найкращим способом вимірювання втрат сердечника завдяки його швидкості та точності [4].

Метод петлі гістерезису, який широко використовується [5], [6], використовує дві обмотки, поміщені на випробуваний сердечник.

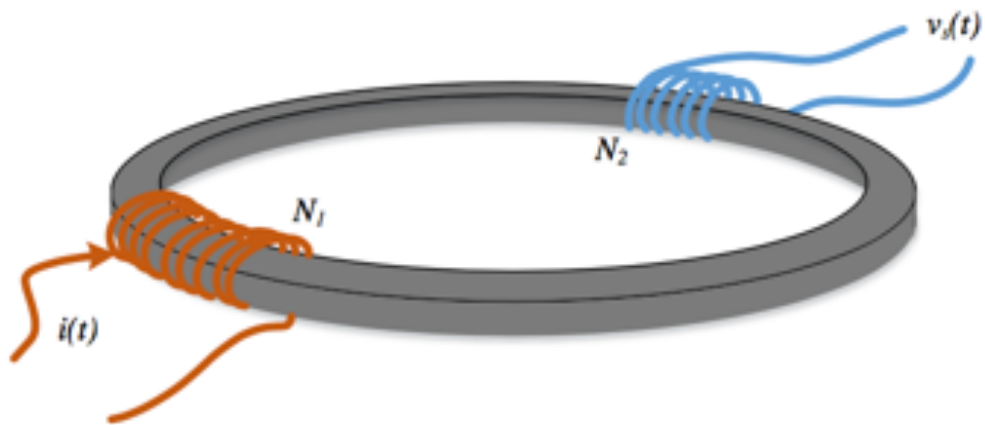


Рисунок 1 – Експериментальне вимірювання втрати сердечника методом вимірювання петлі гістерезису [6].

Первинна обмотка призначена для збудження, а вторинна – для відстеження індукції. Інтегрування наведеної напруги вторинної обмотки дає магнітну індукцію:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A_e} \int_0^T \nu_s(\tau) d\tau \quad (1)$$

де N_2 – кількість витків вторинної обмотки;

A_e – площа ефективної поперечного перерізу досліджуваного магнітопроводу.

Наведений струм від первинної обмотки дає намагніченість магнітного поля H ,

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l_e} \quad (2)$$

де N_1 – число оборотів первинної обмотки;

l_e – довжина магнітного шляху.

Втрати на одиницю об'єму можна представити як:

$$\frac{P}{V} = f \int H dB \quad (3)$$

Рівняння (3) можна записати в наступній формі:

$$\frac{P}{V} = \frac{f \int_0^T i_1(t) \frac{N_1}{N_2} v_2(t) dt}{A_e l_e} \quad (4)$$

де P – втрати сердечника;

V – об'єм сердечника;

f – частота напруги живлення;

$v_2(t)$ – наведена напруга у вторинній обмотці.

Дискретна форма рівняння (4) може бути описана як:

$$\frac{P}{V} = \frac{\frac{1}{K} \sum_0^K i_1(k) \frac{N_1}{N_2} v_2(k)}{A_e l_e} \quad (5)$$

де K – кількість зразків за один період.

Вимірювання втрат магнітопроводу, що виконуються виробниками магнітної електричної сталі, проводять для декількох робочих точок, таких як 50 Гц - 60 Гц при 1 Т, 1,5 Т і т. д. Ці дані використовуються для отримання кривої намагнічування. Існує кілька стандартів вимірювання втрат основних частот для виробників, які слідує [7]-[9]. Хоча різні виробники дотримуються різних стандартів та номенклатури відносно свого продукту, такі властивості матеріалу, як втрати, опір і проникність, вважаються такими ж самими для однієї марки сталі. Щоб збільшити електричний опір і проникність і, таким чином, зменшити втрати, до матеріалу додають кремній та алюміній. Властивості матеріалу, такі як рівень магнітострикції та температура Кюрі, які визначаються відсотками складових у сплаві, використовуються для рівня визначення стандартизації матеріалу Американським інститутом металургійного виробництва (AISI). Оскільки низькосортні матеріали мають найвищий відсоток кремнію, вони мають найвищий питомий опір і проникність, а отже, найнижчі втрати серцевини. Товщина ізоляції також впливає на продуктивність матеріалу, зменшуючи втрати вихрового струму.

Існує три різних типи основних тестів для визначення втрат; а саме рама Епштейна, тороїд та тестер одного листа, як показано на рисунку 2.

Міжнародна асоціація випробувань та матеріалів (ІТМ) має стандарти для підготовки матеріалів, експериментальної установки та методів тестування для всіх видів тестування, згаданих вище [7] - [9].

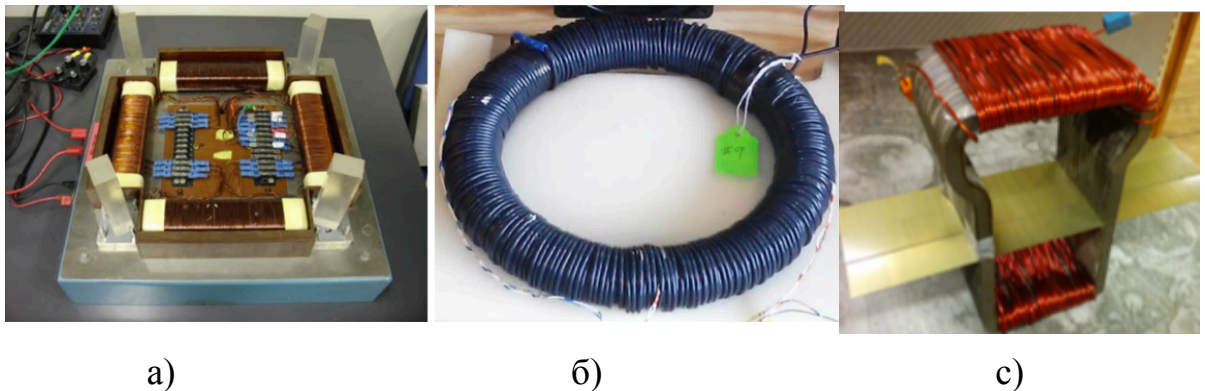


Рисунок 2 – Дослідження якості сталі а) методом Рами Епштейна, б) методом Тороїда, с) методом Одного листа [10]

Відповідно до стандартів ІТМ, сталеві листи розрізаються на кільцеві ізолювані частини та складаються разом. По-перше, вторинна обмотка розташована безпосередньо на сталевий тороїд, тоді первинна обмотка намотується поверх неї. Кількість витків визначають рівень струму та напруги, що треба прикласти до первинної обмотки на заданій частоті. На вторинній обмотці можуть бути декілька кнопок, щоб регулювати кількість витків, щоб дозволити варіації частоти. Низькочастотні вимірювання проводяться шляхом підключення кількох обмоток (вторинних, третинних тощо) послідовно для покращення точності, а високочастотні вимірювання виконуються лише за допомогою однієї вимірювальної обмотки. Для перевірки ізоляції двигуна тороїдний тестер є найбільш підходящим способом визначення втрат сердечника через його замкнуту магнітну петлю та подібність між його геометричною структурою та структури реального електродвигуна. Недоліком тороїдного тестера є те, що підготовка зразка займає багато часу.

У тестування рамою Епштейна ізолюваний магнітний матеріал нарізаний на смужки, які укладені, вторинні та первинні обмотки намотуються на раму, а потім вкладені в раму. Встановлення великої кількості ізолюваних листів допомагає зменшити магнітний опір на низьких

частотах, отже, точність збільшується. Хоча тест методом рами Епштейна є розповсюдженим методом тестування, він має деякі недоліки. Головний недолік цього тестера полягає в тому, що між складовими рами виникає повітряний зазор, що підвищує як магнітний опір, так і втрати. Крім того, підготовка листів також вимагає багато часу.

Тестування одного аркушу є найпоширенішим методом тестування, що використовується виробниками сталі завдяки легкості його відтворення; метод дає змогу перевіряти лише один лист. Метод визначення втрат одного листа потрібно використовувати разом з одним із попередніх методів, оскільки після кожного вимірювання потрібно проводити калібрування. Крім того, стандартний тест вимірює потік тільки в центрі листа, отже, він не повністю відображає властивості матеріалу. Для того, щоб подолати цю проблему, існує покращена версія цього метода, яка вимірює потік через сталевий лист [10].

Хоча очікується, що результати вимірювань втрат кожним з методів тестування будуть однакові, фактичні вимірювання відрізняються. У дослідженні [11] - [13] порівнюється якість різних тестерів відповідно до різних стандартів. Дослідження показують, що тороїдний метод має більші значення втрат сердечника, ніж інші методи на всіх частотах. Цей факт пояснюється впливом різання при підготовці ізольованих листів, що призводить до низької проникності та підвищеної втрати сердечника.

Для вірного і точного вимірювання втрат сердечника важливим є правильне розуміння різних помилок вимірювання. Деякі аспекти, які впливають на точність вимірювальної системи – це фазова розбіжність між вимірюваною напругою та сили струму (через погану частотну характеристику даного датчика струму), температури магнітопроводу тощо.

Фазовий зсув між вимірюваною напруги та струмом фактично є основним джерелом помилок, особливо на високих частотах. Навіть невелика затримка від одного з датчиків може дати неточні результати. Зазвичай, датчик струму має затримку і погану частотну характеристику, яку потрібно

компенсувати перед початком розрахунку втрат основного струму. Відсоток похибки вимірювання може бути виражений як [1]:

$$E = 100 \frac{\cos(\theta + \alpha) - \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (6)$$

де E – значення похибки у відсотках;

θ – фактичний зсув фази між виміряною напругою та сили струму струму;

α – похибка вимірювання фактичного кута фази.

Кут вимірювання α можна описати як функцію від часу затримки t_d та прикладеної частоти f наступним чином [1]:

$$\alpha = ft_d 360^\circ. \quad (7)$$

Відповідно до [5], коли рівняння (7) підставити в рівняння (6) і вирішене для t_d , можна отримати допустимий час затримки.

Ємнісні з'єднання також призводять до помилок, і їх слід уникати. Дослідники [14] стверджують, що ємності, пов'язані з первинною та вторинною обмотками, ємності між витками та ємністю між обмотками та сердечником збільшуються, якщо сердечник заземлено. Тож сердечник не повинно бути заземленим. Крім того, менша кількість витків також є кращою, щоб зменшити ємності між обмотками. Щоб мати змогу виробляти рівномірно розподілену щільність потоку, первинна обмотка повинна бути намотана по всьому сердечнику. Існує компроміс між зниженням кількості витків, що зменшує ємності та подачею високих струмів для досягнення бажаних рівнів напруженості магнітного поля для насичення магнітопроводу.

Інший важливий аспект – це зміна температури сердечника. Вимірювання повинні проводитися при постійній температурі (25°C). Кожний індивідуальний тест повинен бути зроблений за короткий проміжок часу, щоб отримати найвищу точність від вимірювань. Автоматизована

система збудження дуже допомагає отримувати вимірювання в дуже короткий проміжок часу.

Також вдалося знайти декілька методів в англomовній літературі та літературі країн СНД, які підходять для дослідження якості магнітопроводу та їх можна розділити на дві підгрупи: теплові та магнітні.

Теплові:

1. **Температурно-часовий метод** має за основу той факт, що втрати які відбулися в якійсь частині машини можуть бути отримані шляхом виміру енергії, яка була поглинута або виділена при зміні умов роботи. При забезпеченні постійних умов охолодження на час експерименту, початкова швидкість зміна температури пропорційна поданому теплу в точці виміру [15].

$$\rho = c * \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

де ρ – питомі втрати магнітопроводу $\frac{Вт}{К\cdot\text{с}}$;

c – питомі втрати матеріалу;

$\frac{d\theta}{dt}$ – початкова швидкість зміни температури, отримана з графіку

залежності температури від часу.

Основними недоліками цього методу є складність установки, калібрування термо-датчиків та ізоляція від навколишнього середовища.

2. **Калориметричний метод** – втрати в електричних машинах в основному розсіюються як тепло, внаслідок чого збільшується температура машини і стає вище температури навколишнього середовища. В основному, в калориметричному методі створюють теплоізоляційну замкнуту камеру і встановлюють її навколо машини та вимірюється розподіл тепла всередині камери. Під час тесту умови в середині машини на безпосередньо навколо машини не повинні суттєво відрізнятися від норм експлуатації заданих даних машині, тобто температура калориметричної камери не повинна

перевищувати встановлену максимальну температуру навколишнього середовища для випробувальної машини [16]. Тож машина вимагає якийсь спосіб охолодження, для того, щоб відводити тепло, яке виділяє досліджувана машина, поза камеру і таким чином підтримувати постійну температуру навколо ЕМ. Потужність тепла, що було виділене тестовою ЕМ описується формулою:

$$P_{\text{тепл}} = c_p * \rho * Q_v * \Delta T_{\text{тепл}} \quad (9)$$

де c_p – питома теплоємність теплоносія;

ρ – щільність теплоносія;

Q_v – це швидкість потоку теплоносія;

$\Delta T_{\text{тепл}}$ – це збільшення температури теплоносія.

Точно вимірявши Q_v та $\Delta T_{\text{тепл}}$ і припускаючи, що значення c_p та ρ є постійними на всьому відрізку температур тесту можна з високою точністю визначити втрати в тестовій ЕМ використовуючи рівняння (9).

Для даного метода існує два типи калориметрів:

Відкритого типу. Калориметр такого типу втягує і віддає повітря в оточуючу середу, що зображено на рисунку 3.

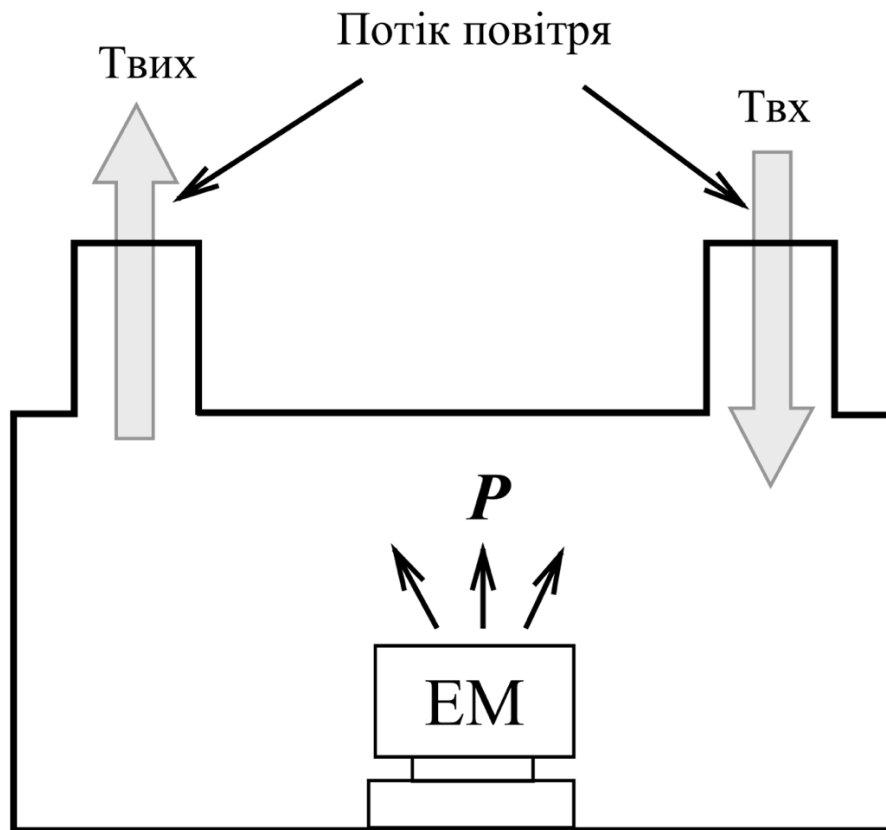


Рисунок 3 – Калориметр відкритого типу

Питома теплоємність і щільність атмосферного повітря залежать від відносної вологості та складових газів, а також змінюється від температури. Незважаючи на те, що питома теплота і щільність повітря для охолоджуючої рідини можна вважати постійною над входом і виходом, температура і профіль потоку повітря значно змінюються.

Щоб визначити тепло, що розсіюється від прямого вимірювання, необхідно вимірювати відносну вологість, барометричний тиск та температуру навколишнього повітря для точної оцінки щільності та питомої теплоти повітря. До того ж необхідне вимірювання профілю потоку та температури над входом і виходом, що є дуже важкою задачею.

Закритого типу. У закритому калориметрі є теплообмінник та вторинний теплоносій (як правило, вода) для розсіювання тепла від первинного теплоносія (повітря) до вторинного теплоносія. Закритий тип калориметра є герметичним, а первинний теплоносій циркулює як за природною конвекцією, так і внутрішнім вентилятором, що зображено на

рисунку 4. Теплообмінник та циркуляційний вентилятор збільшують складність вимірювальної камери.

Перевага калориметра закритого типу полягає в тому, що, на відміну від відкритого типу, вимірювання потоку та температури води є відносно легким, а зміна питомої теплоти і щільності води надзвичайно низькою в умовах великого робочого температурного діапазону. Однак час, необхідний для досягнення стаціонарного стану для калориметра закритого типу, дуже високий в порівнянні з калориметром відкритого типу.

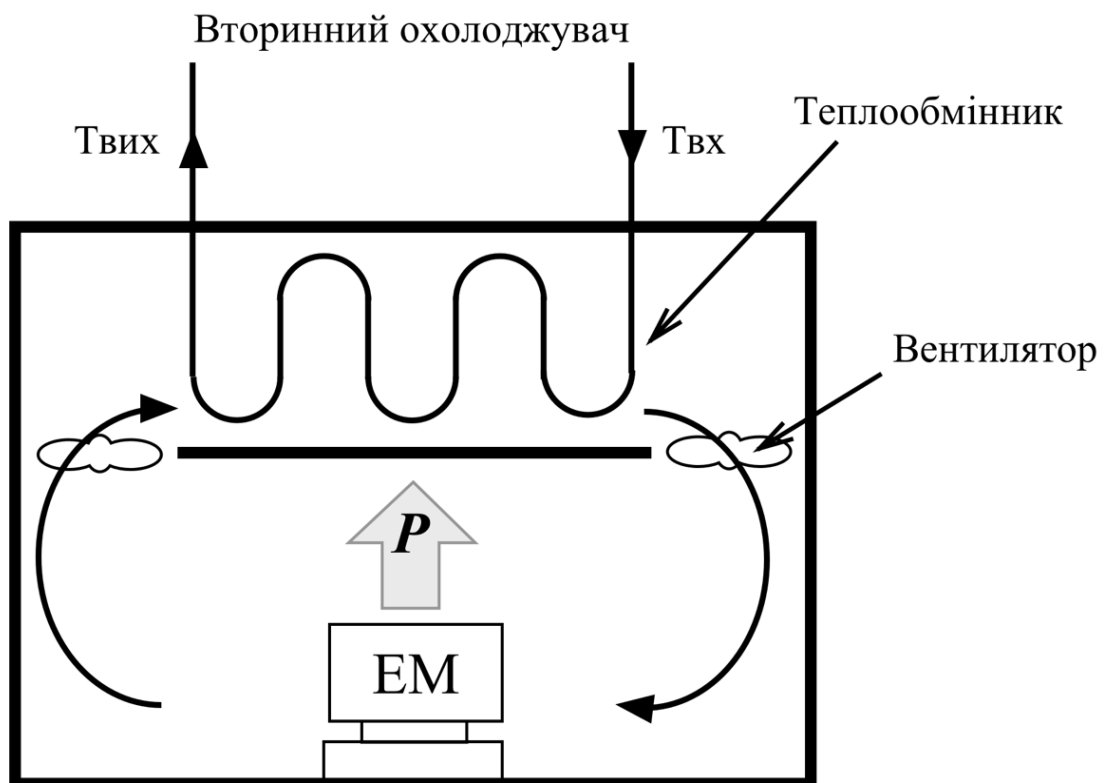


Рисунок 4 – Калориметр закритого типу

Методи експлуатації. Калориметр може працювати трьома способами, а саме прямим методом, методом калібрування та методом балансу. Прямий спосіб вимагає визначення всіх можливих втрат тепла від вимірювальної камери, тобто втрати тепла від стіни вимірювальної камери, металевого основного кріплення випробувальної машини та валу випробувальної машини. Далі прямий метод вимагає знання потоку та температурного профілю на вході та виході разом із точним вимірюванням відносної

вологості та атмосферного тиску для точного визначення питомої теплоємності повітря.

У процесі калібрування вимірювальна камера нагрівається з відомим джерелом живлення, а калібрування установки відбувається із збільшенням температури, що забезпечує постійну швидкість потоку охолоджувача, тобто крива для розсіювання тепла складається в залежності від зміни температури охолоджуючої рідини при постійній заданій швидкості потоку охолоджуючої рідини. Після проведення калібрування цього тесту проводиться фактичний тест при однаковій швидкості потоку теплоносія і підвищення температури теплоносія використовується для визначення втрат на тестовій машині на основі калібрувальної кривої. Теплові втрати з вимірювальної камери вважаються однаковими для калібрувального випробування та фактичного випробування. Крім того, метод калібрування також вимагає вимірювання відносної вологості та атмосферного тиску, який використовується разом з калібрувальною кривою для визначення тепла, яке було випромінене.

У методі балансу для кожного вимірювання є дві фази. По-перше, це фактичний тест, в якому двигун працює на бажаному навантаженні, доки стабільний стан не буде досягнуто, тобто підвищення температури охолоджувача постійне. Потім на другій фазі незбуджений двигун обертається зовнішнім двигуном постійного струму на тій же обертовій швидкості, що і під час фактичного випробування. Це робиться для забезпечення аналогічного стану потоку теплоносія на обох етапах. Потім камеру нагрівають альтернативним джерелом нагрівання, а потужність що буде розсіюватись налаштовується, щоб забезпечити підвищення температури охолоджуючої рідини, аналогічну фактичному випробуванню. Точність методу балансу в основному визначається точністю ватметра, підключеного до альтернативного джерела, і точністю вимірювання температури [16]. Вологість та контроль температури впускного охолоджувача додатково підвищують точність установки.

Експериментальну установку для калориметричного методу зображено на рисунку 5.

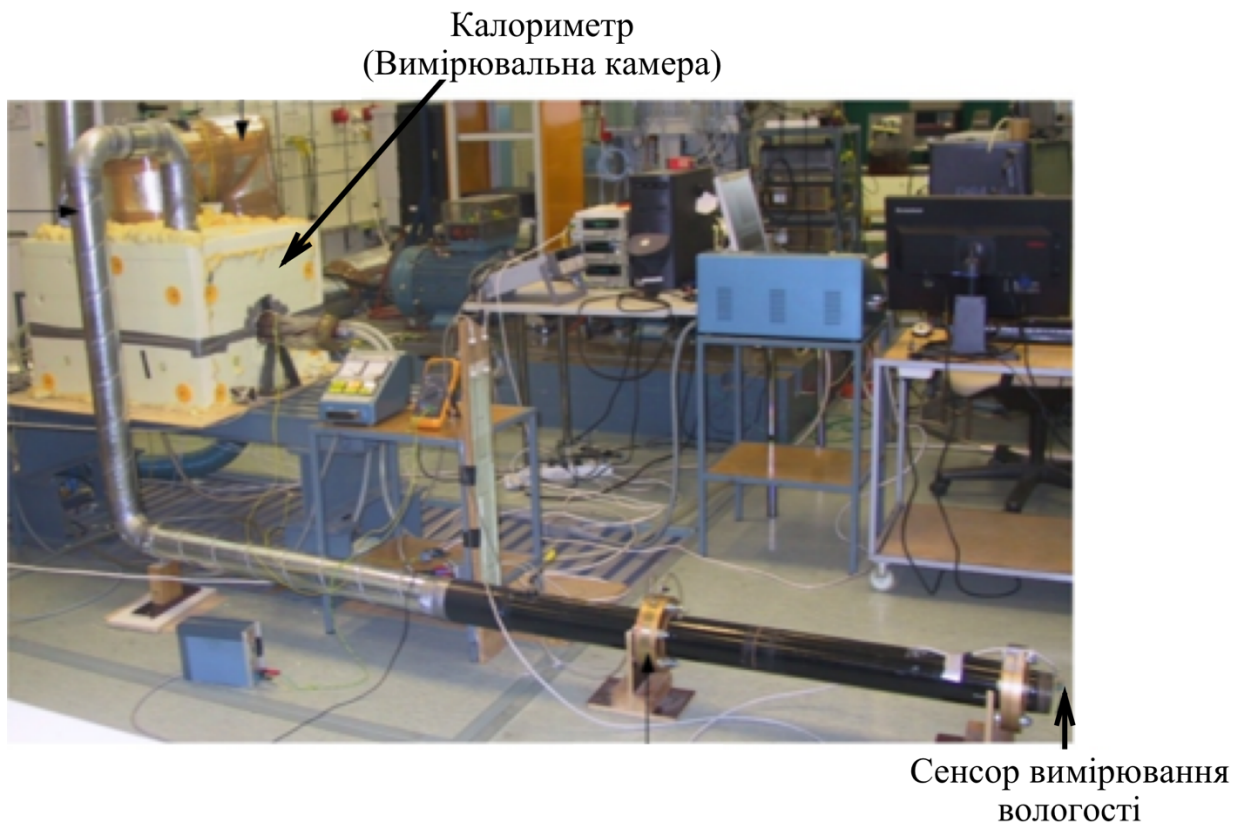


Рисунок 5 – Приклад експериментальної установки для калориметричного методу [17].

Магнітні:

1. **Ватметровий метод.** Для застосування цього метода, якщо машина вже зібрана, виймають ротор або якір з електричної машини, заземлюють обмотку статора, і намотують робочу і контрольну обмотки на осердя, як зображено на рисунку 6. В активній сталі статора наводиться індукція рівна 1Тл за допомогою робочої обмотки. Наведену індукцію вимірюють за допомогою контрольної обмотки. За показами вольтметра, включеного на затискачі контрольної обмотки, визначають індукцію з виразу:

$$B_c = \frac{10^4 \cdot U}{4,44 \cdot W \cdot f \cdot q} \quad (10)$$

де U – напруга на контрольній обмотці, В;

q – перетин активної сталі статора, см²;

f – частота напруги живлення робочої обмотки, Гц;

W – число витків робочої обмотки.

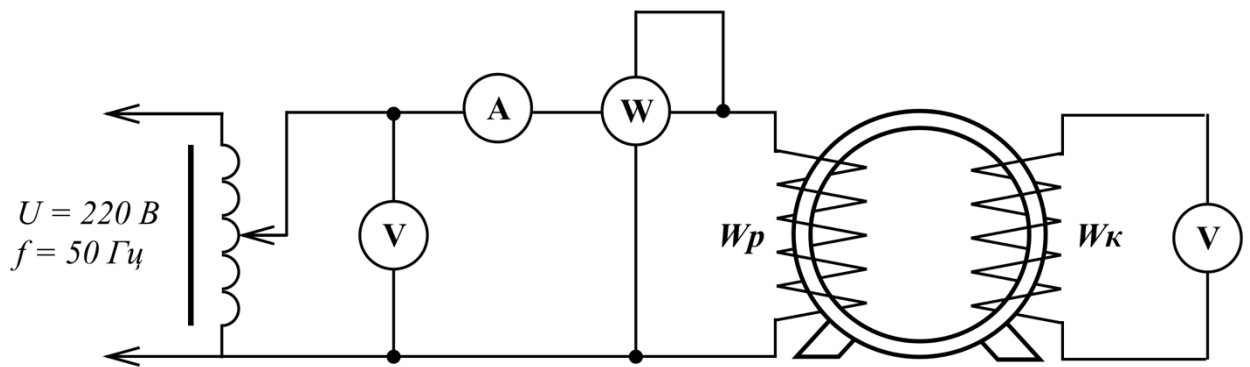


Рисунок 6 – Схема метода ватметра для вимірювання втрат у сталі

За показами ватметра визначають втрати P_c в сталі статора електричної машини, наведені при індукції 1 Тл за формулою:

$$P_C = P_1 \cdot \left(\frac{1}{B_C}\right)^2 \quad (11)$$

де P_1 – втрати, виміряні ватметром, Вт.

Таким чином, маючи втрати в сталі та масу сталі:

$$\rho = \frac{P_C}{m_a} \quad (12)$$

де m_a – маса сталі спинки магнітопроводу, кг.

Оскільки при такому способі дослідження магнітний потік проходить не так, як у зібраній ЕМ, а саме – він майже не заходить у зубці, тому в цьому методі вважається, що всі втрати відбуваються в спинці магнітопроводу. Саме тому в формулі питомих втрат ділити треба на масу сталі спинки статора, а не на повну масу сталі магнітопроводу [18].

Номінальні питомі втрати сталі магнітопроводу вказуються виробниками сталі. Для визначення місць, де саме наявне замикання листів сталі магнітопроводу, його нагрівають індукційним методом при індукції 1 Тл протягом 1 години. Якщо по закінченню нагрівання поверхня магнітопроводу в розточці має рівномірну температуру і питомі втрати не перевищують номінального значення, у такому випадку технічний стан магнітопроводу вважається задовільним. У свою чергу, нерівномірний нагрів магнітопроводу

в розточці статора свідчить про проблему місцевого порушення ізоляції між листами сталі магнітопроводу.

Нагрів поверхні магнітопроводу в різних точках можна виміряти за допомогою термопари «мідь-константан» або термометрами. Коли вимірюється температура нагріву, намагнічуюча обмотка, що намотана на осердя, повинна бути відключена від електричної мережі.

Перевагою цього метода є можливість визначення якості магнітопроводу без збирання електричної машини. А також достатня простота виконання.

До недоліків можна віднести: потребує багато часу, необхідно мати чимало вимірювальних пристроїв.

2. Метод неробочого ходу. Для зібраних двигунів втрати в сталі можна визначити в режимі неробочого ходу. При неробочому ході потужність P_0 , яка споживається електричним двигуном з мережі живлення, витрачається на покриття втрат у сталі P_c та механічних втрат P_m . Як відомо при неробочому ході потужність, споживана двигунами з мережі живлення, лінійно залежить від квадрата напруги, саме тому, якщо виміряти і побудувати графік цієї залежності, можна легко визначити механічні втрати, а потім вже і втрати в сталі.

З цією метою ватметром вимірюють потужність, споживану електро-двигуном у режимі неробочого ходу при різних значеннях напруги, що підводиться до двигуна (наприклад, при $0,75 U_H$, $0,5 U_H$, $0,25 U_H$). Потім згідно отриманих даних будують графік, приклад якого наведено на рисунку 7, залежності споживаної потужності від квадрата напруги $P_0 = P_c + P_m = f(U_0)^2$.

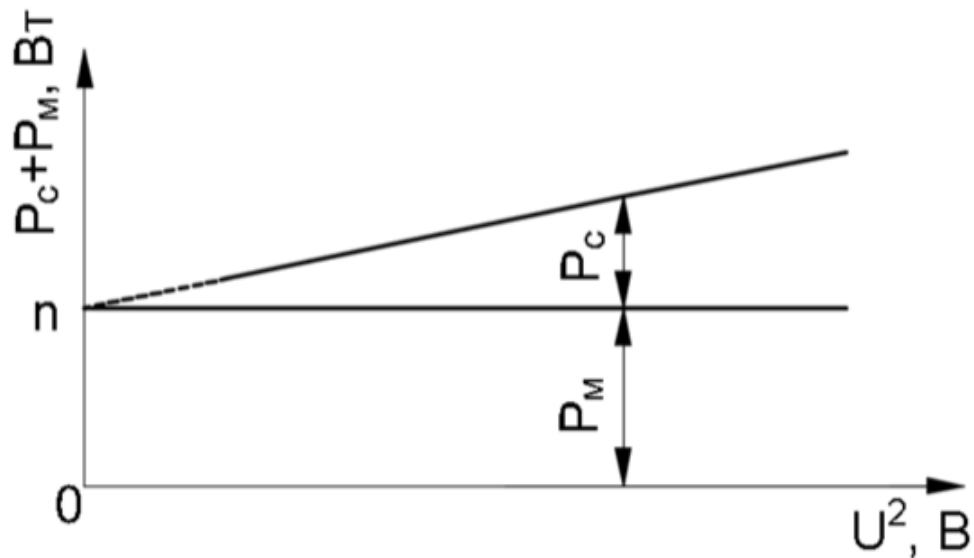


Рисунок 7 – Розподіл втрат при неробочому ході електродвигунів:

P_c – втрати в сталі; P_m – механічні втрати.

Втрати в активній сталі визначаються як різниця втрат неробочого ходу при номінальному значенні напруги та механічних втрат:

$$P_c = P_0 - P_m \quad (13)$$

Таким чином отримуємо втрати в сталі. Масу магнітопроводу можна дізнатися з технічної документації двигуна. Поділивши втрати на масу, отримаємо питомі втрати в сталі магнітопроводу двигуна, які не повинні перевищувати 2,5 Вт/кг.

Перевага цього методу – отримуємо значення питомих втрат, яке фактично буде в сталі при роботі ЕМ. Тобто всі фізичні процеси відповідають робочому режиму, тому не буде неочікуваного зростання втрат, як це відбувається, коли магнітопровід досліджувався окремо, а потім зібрали ЕМ, і вже питомі втрати інші, ніж при дослідженні.

Недоліками цього методу є: необхідність збирати електричну машину, великі затрати часу, необхідність проведення певних розрахунків та додаткові вимірювальної апаратури, неможливість судити про стан ізоляції магнітопроводу до збірки ЕМ.

3. Метод тарованого індуктора. Якщо для порівняння якості магніто-

проводів двигунів однієї серії використовувати залежність повних втрат на гістерезис та вихрові струми від максимального потоку, то достатньо порівняти величину втрат при однаковому значенні магнітного потоку в різних двигунах.

Згідно даного метода втрати визначаються на основі використання статора чи ротора (що залежить від об'єкта дослідження) як тарованого індуктора. У випадку дослідження магнітопроводу статора АД тарованим індуктором є шихтований пакет ротора двигуна певного типу, що має стільки ж пазів, скільки в досліджуваного двигуна. Пази індуктора мають прямокутну форму. На нього намотано дві обмотки: намагнічуючу та контрольну. Його особливістю є те, що втрати в ньому заздалегідь відомі.

Цей тарований індуктор встановлюють у статор, на якому також дві обмотки. Подавши змінну напругу на статор і на ротор, у машині відбуваються процеси, дуже близькі до зібраного двигуна. У цьому випадку магнітний потік буде проходити таким же чином, як і в зібраного двигуна. Тобто, на відміну від ватметрового метода, тут будуть враховані втрати в зубцях та і загалом статор знаходиться в стані максимально приближеному до реального робочого стану. Втрати знімаються ватметровим методом і дорівнюють сумарним втратам у тарованому роторі та досліджуваному магнітопроводі. Від виміряних втрат віднімають заздалегідь відоме значення втрат у роторі і, таким чином, отримують втрати в сталі статора.

Для підвищення точності цього метода тарований індуктор виконують з мінімальними втратами, що зменшує похибку вимірювання. З цією метою ротор виконують із листів електротехнічної сталі завтовшки 0,35 мм та мінімальними питомими втратами. Таким чином цей метод є чимось середнім між ватметровим методом і дослідженням повністю зібраної машини [18].

Значна перевага цього метода – не збираючи повністю двигун, а лише маючи підходящий ротор і намотавши обмотки на статор і ротор можна отримати повні втрати як у зібраного двигуна. Для порівняння двигунів однієї серії можна використовувати один і той же тарований індуктор, тобто залишається лише намотати обмотки на досліджуваний статор.

Недоліком є необхідність виготовлення тарованого ротора, що не завжди є можливим, а також метод потребує не мало часу, оскільки втрати знімаються ватметровим методом.

Доцільність дослідження. Як видно з аналізу вище описаних методів жоден з них не є швидким та простим, що звісно є проблемою. Тож пошук методики і метода визначення стану ізоляції сталі магнітопроводу є відкритим питанням.

Навіть якщо не брати до уваги необхідність у такій методиці для наукових цілей, що дозволить економити чималу кількість часу дослідникам, то необхідність у такій методиці є в підприємств, що займаються ремонтом ЕМ. Це дозволить позбавитись ситуацій, коли вже непридатний для використання магнітопровід, тобто такий, що має дуже пошкоджену міжлистову ізоляцію сталі і, як наслідок, великі питомі втрати, перемотують з розрахунку, що це дасть змогу даній ЕМ працювати ще певний час, але така ЕМ знову вийде із ладу значно швидше ніж на це розраховують і перемотка може знову повторитись і так декілька разів. Описані вищі методи не використовуються, тому що потребують багато часу для проведення і таким чином перевірка магнітопроводу стає нерезонною.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПОЯВИ ТА РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ У ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ

1.1 Загальні відомості про втрати в магнітопроводі, типи та класифікація дефектів магнітопроводу

Магнітопровід виконує в якості основної функції магнітний зв'язок у системі, концентрацію та проведення магнітного потоку. З цієї точки зору – основний показник – магнітна проникність. Від цього показника залежить величина струму намагнічування. Магнітна проникність залежить від складу і структури матеріалу.

Класифікація дефектів магнітопроводів, в яких приведено деякі з дефектів зображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація дефектів магнітопроводу

Міжлистова ізоляція магнітопроводу може пошкоджуватися як у процесі експлуатації, так і при ремонтних роботах. В окремих випадках, при серйозних порушеннях технології, міжлистова ізоляція може пошкоджуватися і при виготовленні магнітопроводу.

Основні типи пошкоджень можна розділити на дві групи:

1. Інтегральні дефекти ізоляції – точкові перекриття, розподілені по ширині пакета по стохастичному закону.

2. Локальні дефекти – місцеві короткозамкнуті зони, які перекривають частину пакета, котрі, як правило, розташовані на активній поверхні магнітопроводу, не розповсюджуючись вглиб.

За наявності пошкоджень міжлистової ізоляції магнітна провідність майже не змінюється [19], тобто струм намагнічування залишається практично постійним. Однак, при цьому стрімко зростають вихрові струми, які можуть циркулювати по дефектним контурам. У той час як втрати на гістерезис фактично зберігають свою величину. На промислових частотах визначальною є складова гістерезисних втрат, яка в декілька разів перевищує вихрову складову втрат.

За наявності дефектів збільшується складова втрат на вихрові струми. Для суттєвого збільшення питомих втрат у магнітопроводі, втрати на вихрові струми повинні збільшитися в десятки разів.

Зростання втрат у сталі призводить не стільки до погіршення робочих характеристик – збільшується тільки активна складова струму неробочого ходу, скільки до погіршення умов роботи – робить тепловий режим більш жорстким.

Якщо існують локальні дефекти, то збільшення повних втрат може бути незначним, але за рахунок локального виділення тепла мають місце локальні перегріви, які можуть вивести з ладу ізоляцію обмотки. У цьому випадку складно дати загальну оцінку стосовно допустимих меж порушень, оскільки ефект залежить не лише від ступеня дефекту, а й від габаритів і навантаження магнітної системи, місця та характеру дефекту.

1.2 Складові втрат в магнітопроводі

Складові частини обертових електричних машин піддаються дії магнітного поля. Два характерних явища, а саме рух доменної стінки та вихрові струми, відбуваються у магнітопроводі, який в основному виготовляють із феромагнітних матеріалів, які також є джерелом втрат у магнітопроводі і називаються втратами на гістерезис та втратами на вихрові токи відповідно.

1.2.1 Втрати на гістерезис

У феромагнітному матеріалі є елементарні магніти, відомі як домени Вайса. Ці домени Вайса відділені один від одного стінками Блока, які є перехідною областю на межі між магнітними доменами. Кожен домен Вайса складається з ряду атомів, які ідеально вирівняні в одному напрямку, тому окремо кожен домен є постійним магнітом.

Магнітні домени в феромагнітному матеріалі розміщуються таким чином, що чистий магнітний момент тіла дорівнює нулю. Під впливом зовнішнього магнітного поля, ті магнітні домени, які вже вирівняні в напрямку зовнішнього поля, як правило, намагаються рости за рахунок невирівняних доменів, що приводить до руху доменних стінок, рисунок 1.2. Це триває до точки, що є відомою як точка насичення на кривій намагнічування, де всі магнітні домени вирівняні, і значне збільшення напруженості поля призводить до мінімального збільшення магнітного потоку.

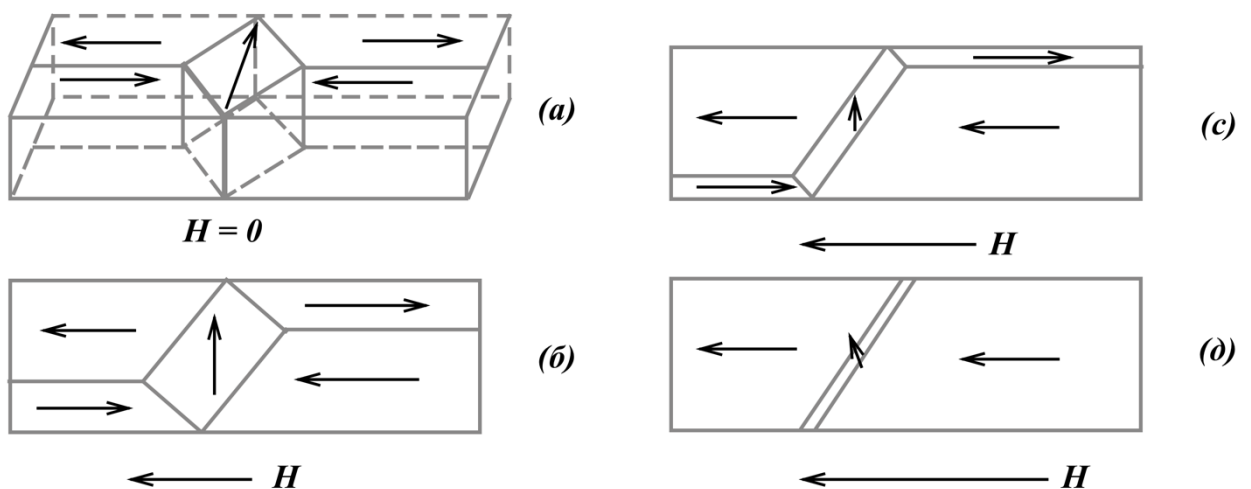


Рисунок 1.2 – Рух стіни домену. а) сила зовнішнього поля дорівнює нулю; б), в) поступове збільшення сили зовнішнього магнітного поля; г) насичення

Коли зовнішнє магнітне поле буде прибрано, не всі магнітні домени повертаються до попереднього стану, залишаючи певний залишковий потік, рисунок 1.3. Енергія споживається рухом доменної стінки під час намагнічування, в першу чергу через домішки та неоднорідність, присутні в

матеріалі [20]. Кількість втрат енергії за цикл визначається площею петлі гістерезису.

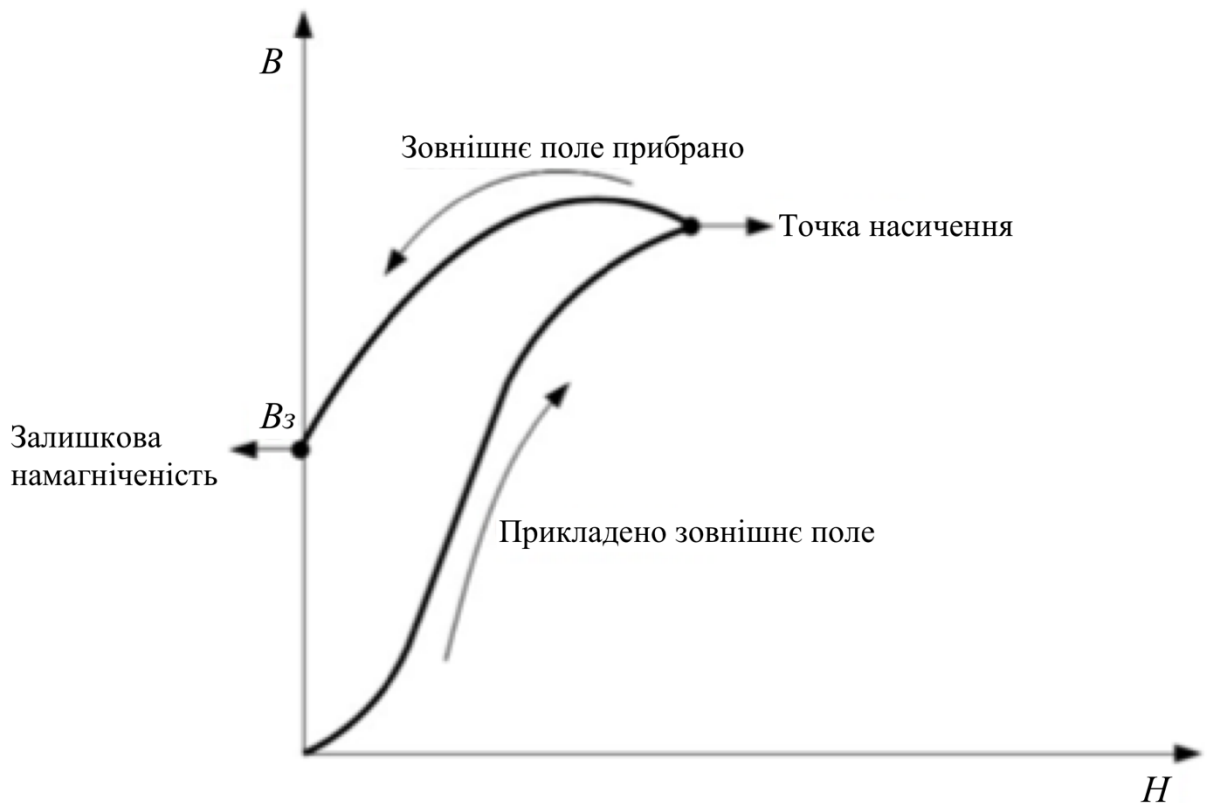


Рисунок 1.3 – Точка насичення та залишковий потік [20]

1.2.2 Втрати на вихрові струми

Вихрові струми наводяться у провідному матеріалі, якщо помістити його у змінне в часі магнітне поле, як показано на рисунку 1.4 та в рівняннях (1.1) та (1.2):

$$\Delta \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}, \quad (1.1)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (1.2)$$

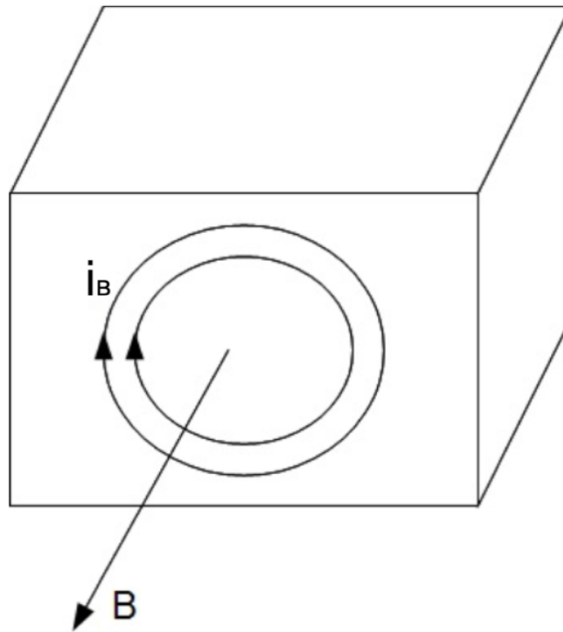


Рисунок 1.4 – Вихровий струм

Втрати на вихрові струми в одному листі визначається за рівнянням (1.2), де V – об’єм листа, f – частота мережі, B_{max} – пікове значення індукції і δ , ρ – товщина і питомий опір листа відповідно [9].

$$P_z = \frac{V \pi^2 f^2 \delta^2 B_{max}^2}{6\rho} \quad (1.3)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що втрати на вихрові струми пропорційні квадрату частоти, квадрату пікової індукції і квадрату товщини листа та обернено пропорційні питомому опору матеріалу.

1.2.3 Сумарні втрати в магнітопроводі

Виробники електротехнічної сталі зазвичай дають втрати матеріалу на одиницю маси при певному піковому значенні магнітної індукції та частоти. Втрати на вихрові струми та на гістерезис не розділені. Під час розрахунку вручну магнітний шлях ділиться на n частин, а саме зубець і ярмо, та обчислюється маса кожної частини. Загальні втрати розраховуються за даними виробника, використовуючи рівняння (1.4) [20].

$$P_{\text{маг}} = \sum_n k_{Fe,n} P_x \left(\frac{\hat{B}_n}{xT} \right)^2 m_{Fe,n} \quad (1.4)$$

де P_x – втрати потужності на одиницю об'єму;

x – рівень індукції, ці обидві величини беруться з даних виробника;

$k_{Fe,n}$ – коефіцієнт корекції;

$m_{Fe,n}$ – маса n -ної частини.

Коефіцієнти корекції для різних машин наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Коефіцієнти корекції [20]

Тип машини	Зубці	Осердя
Синхронна ЕМ	2.0	1.5 – 1.7
Асинхронна ЕМ	1.8	1.5 – 1.7
ЕМ постійного струму	2.5	1.6 – 2.0

1.3 Причини дефектів магнітопроводу

Листи електричної сталі піддаються різним процесам виробництва під час виготовлення магнітопроводів для електричних машин. Кожен з цих процесів виробництва змінює фізичні та магнітні властивості матеріалу листа.

Найбільш поширені етапи виробництва та їх наслідки розглядаються нижче.

1.3.1 Різання

Для отримання необхідної форми листа магнітопроводу листи електротехнічної сталі штампують або ріжуть, що викликає деформацію поблизу лінії взаємодії. Ці деформації погіршують проникність та погіршують продуктивність електричної машини, негативно впливаючи на розподіл щільності потоку та збільшення втрат.

Існує чимало методів різання, штампування та лазерний розріз – найбільш розповсюджені серед них. Ступінь деформації кристалічної

молекулярної структури залежить від багатьох факторів процесу різання та властивостей матеріалу листа, рисунок 1.5. Зношений ріжучий інструмент під час штампування, повільна швидкість різання лазерного різання, великий розмір зерна і високий вміст кремнію збільшують ступінь зносу. Крім того, деформація матеріалу (задирки) прямо на межі штампування чи розрізу створює додаткові короткозамкнуті контури при збирання пакетів магнітопроводу, що збільшує втрати на вихрової струми.

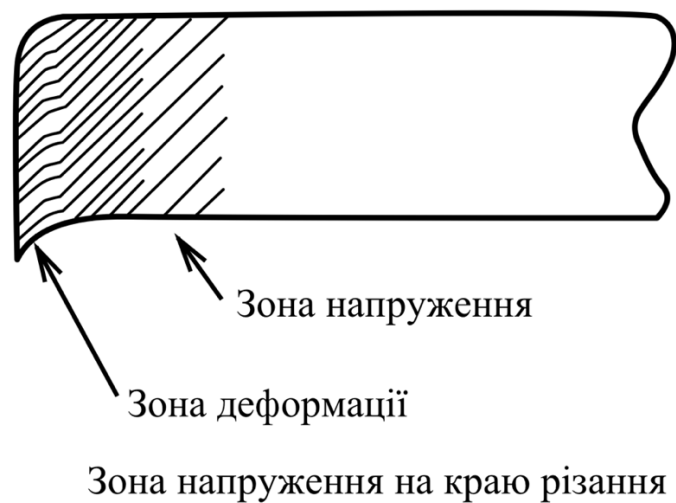


Рисунок 1.5 – Формування задирки [22]

Було проведено багато досліджень щодо аналізу та моделювання деформацій викликаних різанням. Деякі з них експериментально аналізують ефекти різних типів різання. У роботі [23] приходять до висновку, що деградація магнітних властивостей ізотропної електротехнічної сталі, що викликана штампуванням, проникає до 10 мм від краю штампування; суттєве погіршення помітно аж до 5 мм від краю. Подібні результати були отримані в [24], в іншій експериментальній установці.

У [27] досліджували ефект штампування на розподіл магнітного поля і втрату потужності в області зубів. Автор моделював ефект штампування як безперервне експоненціальне зменшення проникності від центру зубця до його країв, рівняння (1.5), (1.6).

$$\mu_{\text{Зубця}} = \mu_{\text{Листа}} e^{-\alpha x/d}, \quad (1.5)$$

$$\hat{B} = \mu_{\text{Листа}} \hat{H}. \quad (1.6)$$

Незважаючи на високу щільність потоку (при якому зупиняється існування ефекту штампування) та порівняно невелику ділянку, що постраждала в результаті пробивання в області зубів, спостерігається збільшення потоку намагнічування приблизно на 5-10%.

Порівняння штампування та лазерного різання були представлені в дослідженні [28]. На відміну від популярного думки, погіршення матеріалу є набагато більш значущим для лазерного різання, ніж штампування. Це можна пояснити викликаним тепловими напруженнями та зменшенням питомого опору теплоізоляції листів через надзвичайно високу температуру на краю при лазерному різанні.

Аналогічно, [25] дійшов висновку, що втрати лазерного різання були вищими при низькому рівні індукції, але нижчі для високого рівня індукції порівняно з пробиванням і аналогічна поведінка існує для проникності.

1.3.2 Зусилля пресування

Забезпечення достатньої міжлистової ізоляції та збільшення густини пресування являється в технологічному процесі двома протилежними діючими тенденціями.

При збільшенні тиску пресування одночасно із збільшенням коефіцієнта заповнення сердечника сталлю відбувається напруження листів, зменшується електричний опір між листами сердечника і, відповідно, збільшуються вихрові струми.

Для сердечників, скріплених скобами, зваркою і т.д., після зняття зусиль, помітних погіршень параметрів статорів не спостерігається навіть при тисках 100-150 МПа.

Фактичний питомий тиск листів один відносно одного в готовому сердечнику після скріплення і зняття тиск пресування значно відрізняється від питомого тиску, що створюється в процесі його пресування.

Максимальні напруження в сердечнику залишаються при його скріпленні методом заливки. У такому випадку:

- в процесі заливки сердечники піддаються досить значним тиском пре совки (при заливці статорів АД малої і середньої потужності питомий тиск досягає 550 МПа);
- забезпечується максимальна площа контакту елементів конструкції скріплення із торцевими і діаметральними поверхнями сердечника; на сердечник діють додаткові тиски, створені в процесі охолодження залитих статорів.

Збільшення питомого тиску пресування приводить до значного погіршення характеристик сердечників. При тисках порядку 550 МПа збільшення питомих втрат в сталі при індукції $B = 1.5$ Тл при $f = 50$ Гц склало 46%; при зменшенні тиску з 550 до 60 МПа питомі втрати зменшуються на 10% [29].

1.3.3 Скріплення пакетів у суцільний магнітопровід

Два найбільш поширених методи скріплення – зварювання та стяжка скобами. Зварювання разом із задирками створюють додаткові міжлистові короткозамкнуті контури для вихрових струмів рисунок 1.6, що є причиною збільшення втрат.

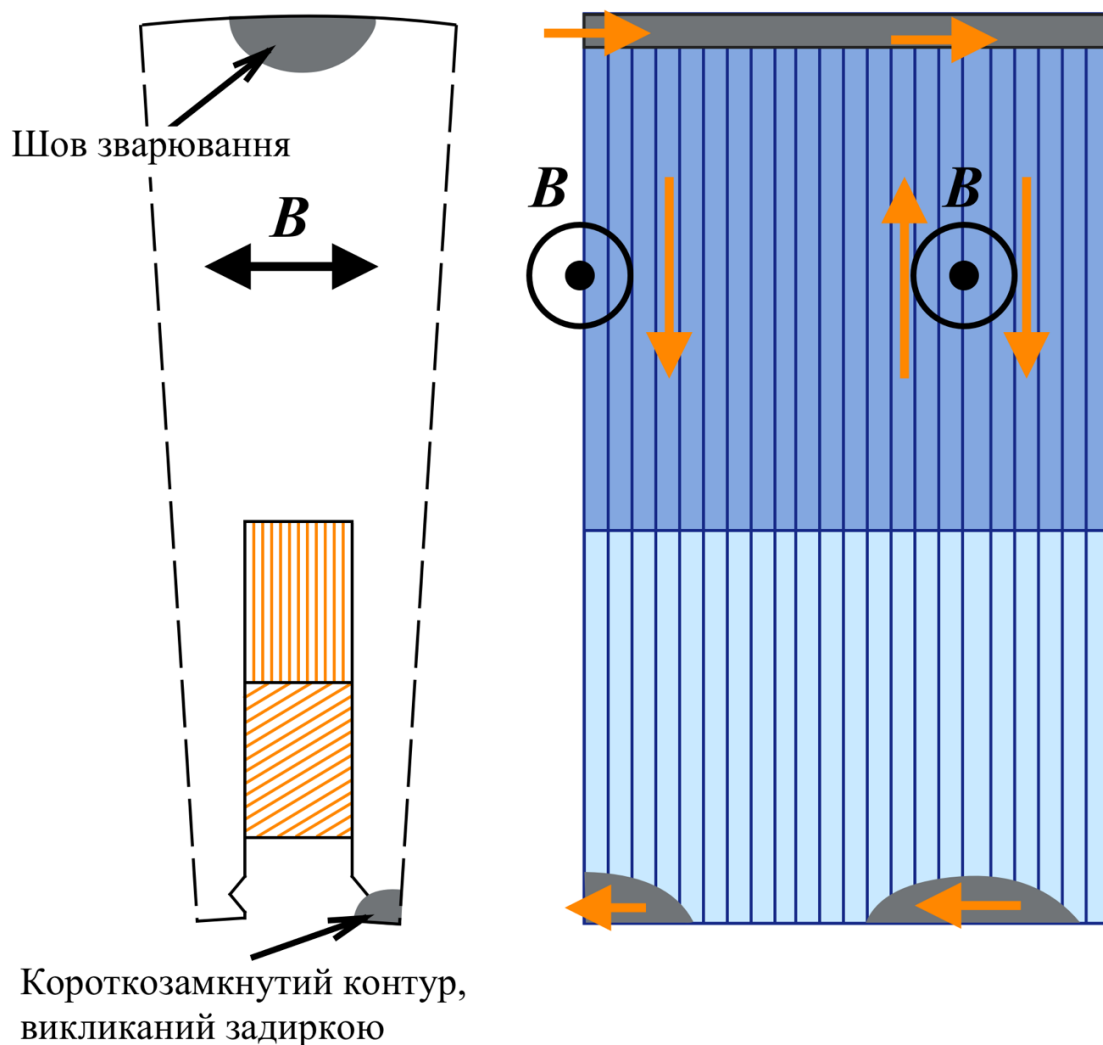


Рисунок 1.6 – Циркуляція струму між листами

У дослідженні [30], виявлено, що збільшення втрат при зварюванні вище для крупнозернистої електротехнічної сталі.

1.3.4 Віджигання

Як описано в назві, віджигання робиться для полегшення залишкового напруження, викликаного процесами виробництва. Внаслідок економічних обмежень, віджигання не є загальною практикою при виготовленні магнітопроводів.

Віджигання передбачає рівномірний нагрів до заданої температури, підтримання такої температури протягом періоду часу, після чого відбувається рівномірне охолодження. Дуже важливо, щоб охолодження було рівномірним, інакше в матеріалі можуть створитися залишкові напруження, рівні або навіть більше, ніж ті, які були до віджигання. Заздалегідь визначена

температура залежить від типу ізоляційного покриття на ламінування. Додаткова вартість відпалу для поліпшення магнітних властивостей може бути виправдана лише для дуже тонких листів [25].

Дослідження, про дію різання [26] [27], також експериментували на зразках, що пройшли віджигання, і виявили помітне зменшення втрат у порівнянні зі зразками, які його не проходили. Рисунок 1.7 показує вплив віджигання на відрізаний край 30-мм анізотропного сталевго аркуша.

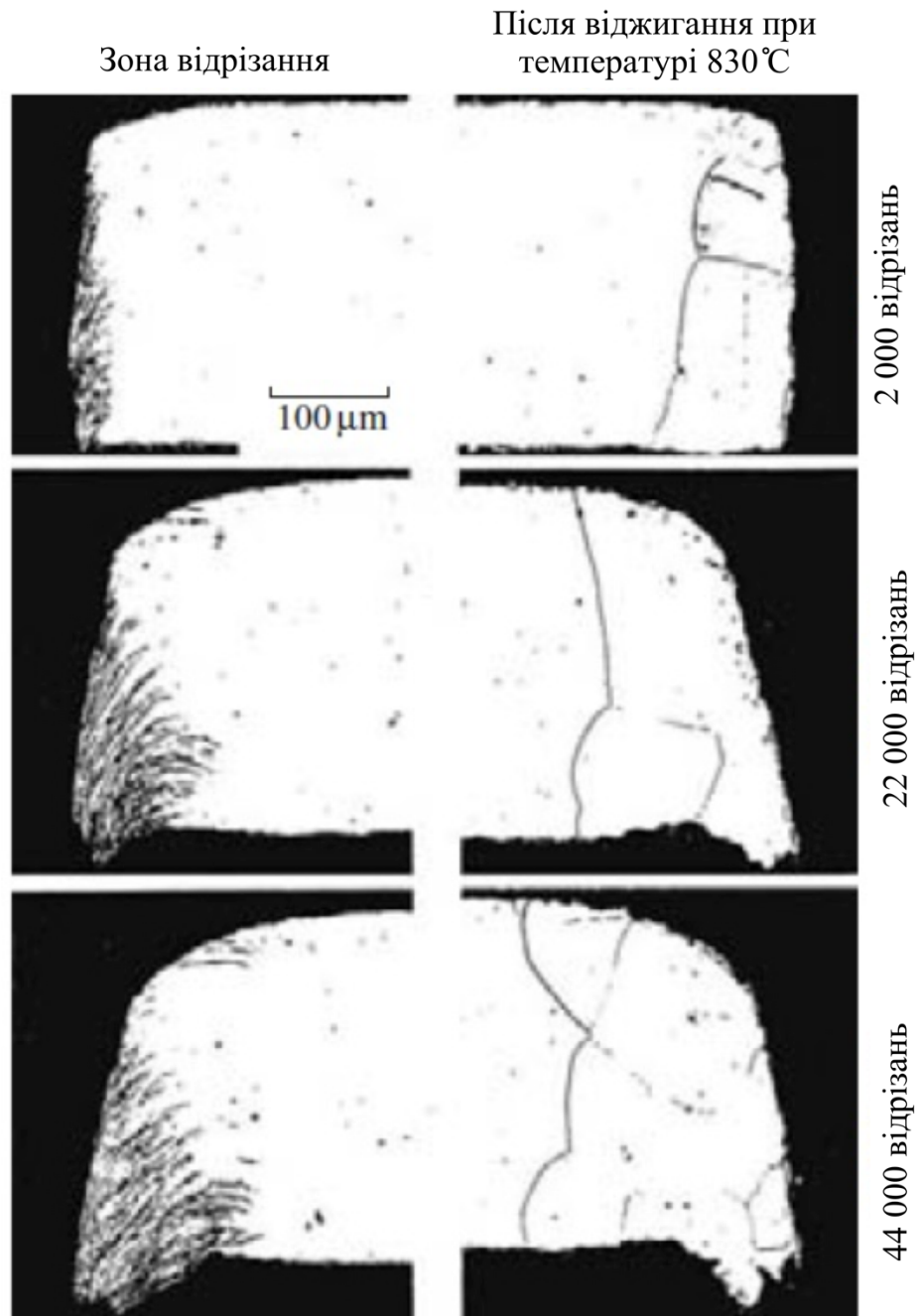


Рисунок 1.7 – Вплив використання зношеного штампу та віджигання [27]

1.3.5 Поміщення магнітопроводу в корпус ЕМ

Магнітопровід статора гідравлічно запресовують до корпусів для кращої теплопровідності між магнітопроводом і корпусом.

Якщо корпус нагрівати, для полегшення вставки сердечника, а потім охолоджувати, це спричиняє сильний радіальний натиск на стержень статора.

У роботі [31] вивчали вплив радіального стресу на ядро електричної машини. Вони прийшли до висновку, що радіальний стрес збільшує обертовий магнітний потік за зубами і зменшує його за пазами. Це порушення в розподілі магнітного потоку збільшувало локалізовані втрати за зубами. Цікаво, що застосування критичного тиску в 2 МПа призвело до збільшення втрат у всіх регіонах магнітопроводу.

1.3.6 Локальні дефекти магнітопроводів

У процесі виробництва, особливо при статичному способі пресування в окремих зонах осердя, скоріш всього в зубцевій зоні, існує збільшення тиску, обумовлене структурою поверхні листів сталі, рівною товщиною, наявністю задирок. У таких випадках можливе порушення ізоляції; у зонах пошкодження циркуляційні струми створюють місцеві спалахи підвищеного тепло-виділення.

На рівні з величиною питомих втрат у сталі тепловий опір осердя та його окремих частин характеризує якість його виготовлення.

Основний паразитний контур вихрових струмів у магнітопроводі, обумовлений технологічним процесом, замикається так: замкнена зовнішня поверхня – замкнена поверхня в результаті задирок (зубцева зона) – крайні листи статора. Якщо провідність задирок по всій площі розточки приблизно однакова, то це можна віднести за рахунок інтегрального погіршення стану магнітопроводу.

Якщо ж провідність задирок в якій-небудь зоні значно перевищує середню, і густина вихрових струмів при роботі двигуна в цій зоні збільшується, то це вже локальний дефект, оскільки існує зона підвищеного тепловиділення.

Ремонту часто піддаються двигуни, в яких у результаті аварії бочка ротора зривається із своєї осі і прокачується, залишаючи за собою сильний дефект зубцевої зони, так званого «зализування» частини поверхні розточки, пластичної деформації пластин.

У багатьох випадках дефект полягає в «вириванні» пластин із зубця. Ізоляція між листами в цьому випадку може порушитися по всій висоті зубця.

У ремонтних цехах вирвані та деформовані пластини зубців випрямляють в початкове положення спеціальними скобами.

У цих випадках можна говорити про частковий і навіть повний ефект масивного магнітопроводу в окремій області шихтованого магнітопроводу. Все це приводить до додаткових втрат потужності.

Але небезпека локальних дефектів полягає в іншому. Магнітопровід, що має локальний дефект, цілком може задовольнити інтегральному рівню якості, укладаючись в задані питомі втрати. У той же час частина обмотки, що знаходиться суміжно із дефектними зубцями, попадає в область підвищеного тепловиділення, що різко скорочує її термін служби. У деяких випадках можливий навіть тепловий пробій ізоляції.

Потрібно відмітити, що необхідність врахування локальних дефектів значно вища для двигунів, що знаходяться в експлуатації та які пройшли ремонт, ніж у процесі виробництва.

Зазвичай якість магнітопроводу оцінюється по питомим втратам при перемагнічуванні шляхом порівняння вимірних значень із табличними значеннями питомих втрат даної марки сталі із врахуванням технологічних коефіцієнтів механічної обробки і наклепу. При цьому локальні втрати є складовими загальних втрат, а їх вплив складно врахувати правильно.

Висновок до розділу 1

У цьому розділі розглянуто складові втрат у сталі – втрати на гістерезис та втрати на вихрові струми, їх фізичну природу та дію. Що показує на скільки непрості явища відбуваються в сталі відносно втрат.

Також у цьому розділі зазначено основні дефекти в магнітопроводах під час експлуатації та під час виробництва. Це дає змогу зрозуміти якій кількості різноманітних впливів піддається магнітопровід під час виробництва та експлуатації. А також те, що навіть новий магнітопровід може мати збільшені питомі втрати, якщо виробник не дотримувався технологічного процесу.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ВТРАТ У СТАЛІ ВІДОМИМИ РОЗРАХУНКОВИМИ І МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

2.1 Визначення питомих втрат в сталі експериментальним методом в окремо взятому магнітопроводі

Для експериментального визначення питомих втрат в магнітопроводі було проведено експерименти згідно ватметрового методу визначення втрат (рисунок 2.1), який описано у вступі, в магнітних методах. Замість звичайного ватметра використовувався мультиметр, що значно спростило проведення експериментів.

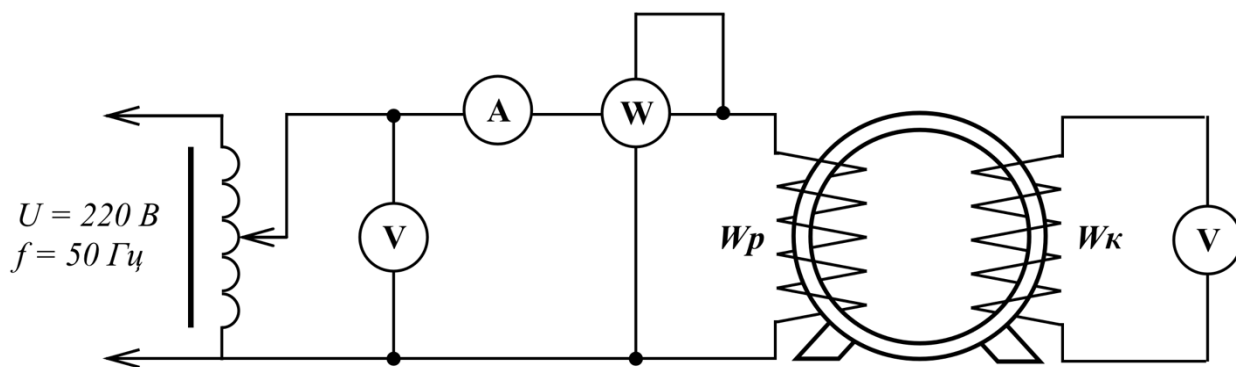


Рисунок 2.1 – Схема ватметрового методу визначення питомих втрат у сталі

Далі буде наведено повний розрахунок питомих втрат на основі результатів експерименту на прикладі одного магнітопроводу, для всіх інших досліджуваних магнітопроводів будуть наведені експериментальні дані у вигляді таблиць та значення питомих втрат.

Спочатку необхідно розрахувати яке значення напруги необхідно навести на контрольній обмотці при відомій кількості витків, щоб досягти необхідного значення індукції, при дослідженні магнітопроводу від асинхронного двигуна 4AA63B4Y3 0,37 кВт, що зображений на рисунку 2.2.

$$B_c = \frac{10^4 \cdot U}{4,44 \cdot W \cdot f \cdot q} \quad (2.1)$$

де U – напруга на контрольній обмотці, В;

q – перетин активної сталі статора, см²;

f – частота напруги живлення робочої обмотки, Гц;

W – число витків робочої обмотки.



Рисунок 2.2 – Магнітопровід АД серії 4AA63B4Y3 0,37 кВт в корпусі
З рівняння (2.1) напруга буде дорівнювати:

$$U = \frac{B_c \cdot 4,44 \cdot W \cdot f \cdot q}{10^4} = \frac{1 \cdot 4,44 \cdot 24 \cdot 50 \cdot 11,1}{10^4} = 6 \text{ В} \quad (2.2)$$

Забезпечивши розраховане значення напруги на контрольній обмотці були зафіксовані значення, що представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Дані ватметрового метода визначення втрат у магнітопроводі АД серії 4AA63B4Y3 0,37 кВт

I – струм робочої обмотки	$I = 14,7 \text{ А}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 2,34 \text{ В}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,3$
P_1 – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_1 = 10,97$ Вт

Мультиметр, який використовувався при проведенні експериментів, був налаштований на таку схему вимірювання, що при розрахунку втрат потужності використовувалась напруга U_2 , що звісно неправильно, тож втрати P_1 необхідно було розраховувати по отриманим у ході експерименту даним.

$$P_1 = U_1 \cdot I \cdot \cos\varphi = 2,34 \cdot 14,7 \cdot 0,319 = 10,97 \text{ Вт} \quad (2.3)$$

Втрати в сталі P_{Cm} визначаються за формулою:

$$P_{Cm} = P_1 \cdot \frac{1}{B_c^2} = P_1 = 10,97 \quad (2.4)$$

Оскільки ми розраховуємо значення напруги, щоб навести індукцію саме 1 Тл, цей крок не є необхідним і втрати в сталі дорівнюють P_1 .

Щоб отримати питомі втрати в сталі спочатку необхідно розрахувати масу сталі. Для цього необхідно заміряти зовнішній діаметр магнітопроводу, що дорівнює 116 мм. А також довжину сталі і висоту ярма статора, що відповідно дорівнюють 77 мм і 14,5 мм.

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{CT1} \cdot k_{C1} \cdot \gamma_C = \pi \cdot (0,116 - 0,0145) \cdot 0,0145 \cdot 0,077 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 3,48 \text{ кг} \quad (2.5)$$

де D_a – зовнішній діаметр статора, м;

h_a – висота ярма статора, м;

l_{CT1} – довжина сталі магнітопроводу, м;

k_{C1} – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю;

γ_C – питома маса сталі, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Оскільки магнітний потік майже не заходить у зубці статора при дослідженні розібраного двигуна та розрахунку питомих втрат маса зубців не враховується, бо втрат в них майже нульові. І тоді питомі втрати становлять:

$$\rho = \frac{P_{Cm}}{m_a} = \frac{10,97}{3,48} = 3,15 \frac{Вт}{кг} \quad (2.6)$$

За допомогою намотаного на статор провідника змодельюємо збільшення втрат на вихрові струми, як показано на рисунку 2.3. Коли розглядають дефективний магнітопровід для відокремлення частини втрат, що викликані дефектами, часто кажуть про інтегральний контур паразитних струмів. Намотавши цей виток ми збільшуємо сумарний опір цього інтегрального контуру. При цьому потрібно слідкувати за значенням напруги на контрольній обмотці та збільшувати напругу після намотування додаткового провідника, щоб U_2 була незмінною і дорівнювала 5,6 В для цього магнітопроводу.

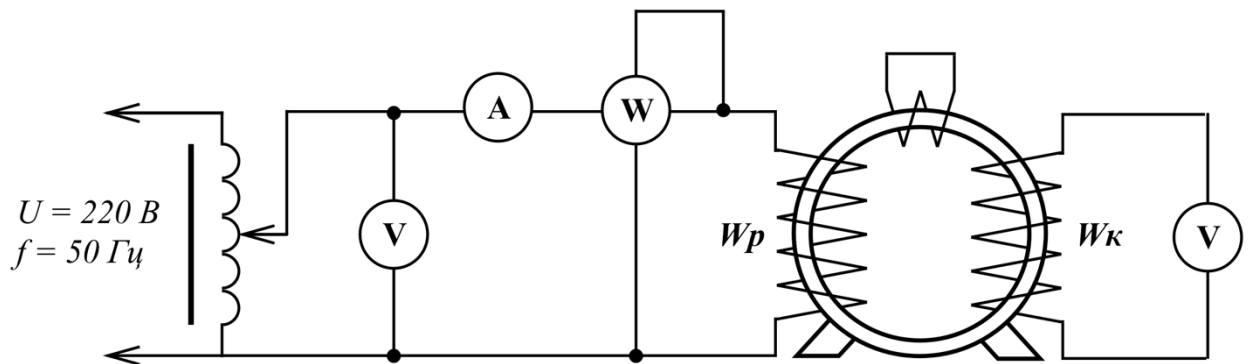


Рисунок 2.3 – Схема ватметрового методу визначення питомих втрат в сталі з моделюванням збільшених втрат

Таблиця 2.2 Дані ватметрового методу визначення втрат у магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт з додатковим витком

I – струм робочої обмотки	$I = 18,3 \text{ A}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 2,34 \text{ B}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ B}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,47$
P_1 – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_1 = 20,34$ Вт

$$P_1 = U_1 * I * \cos\varphi = 2,34 * 6 * 0,475 = 20,34 \text{ Вт} \quad (2.7)$$

А питомі втрати в такому випадку становлять:

$$\rho = \frac{20,34}{3,48} = 5,85 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \quad (2.8)$$

Аналогічним чином було виконано експерименти та розрахунки для ще чотирьох магнітопроводів, результати представлено нижче.

Магнітопровід АД серії 4А71В4У3 0,75 кВт, що є насправді половиною справжнього магнітопроводу, зображено на рисунку 2.4.

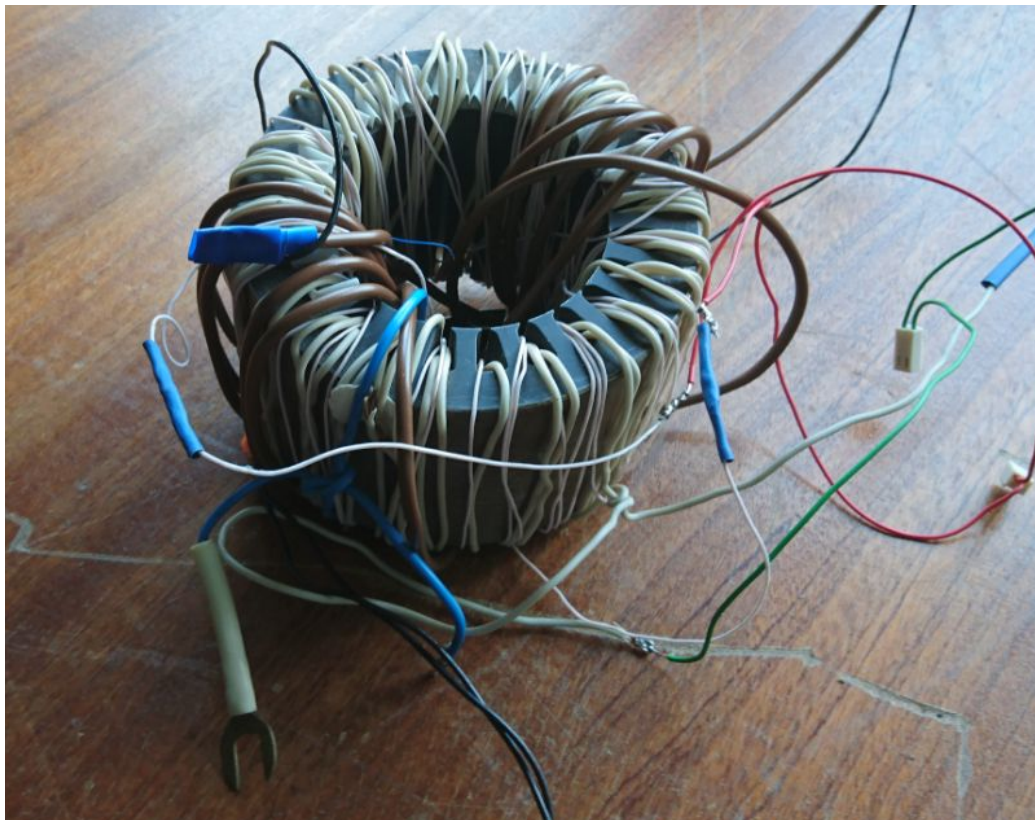


Рисунок 2.4 – магнітопровід АД серії 4А71В4У3 0,75 кВт

Таблиця 2.3 – Результати дослідження магнітопроводу АД серії 4А71В4У3 0,75 кВт ватметровим методом

I – струм робочої обмотки	$I = 2,85 \text{ А}$
U_I – напруга робочої обмотки	$U_I = 10,44 \text{ В}$

U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 10,44 \text{ В}$
P_1 – втрати, виміряні ватметром	$P_1 = 9,51 \text{ Вт}$

Таблиця 2.4 – Результати дослідження магнітопроводу АД серії 4А71В4У3 0,75 кВт ватметровим методом з додатковим витком

I – струм робочої обмотки	$I = 3,2 \text{ А}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 10,44 \text{ В}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 10,44 \text{ В}$
P_1 – втрати, виміряні ватметром	$P_1 = 17,7 \text{ Вт}$

Розрахунок питомих втрат на основі експериментальних даних дав наступні результати – $5,03 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ та $6,7 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ для випадку без додаткового витка та з ним відповідно.

Магнітопровід АД серії 4А90Л2У3 3 кВт, що насправді є половиною справжнього магнітопроводу ЕМ, зображено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Частина магнітопроводу АД серії 4А90Л2У3 3 кВт

Магнітопровід АД серії 4А90L2У3 3 кВт було розпиляно на дві частини, рисунок 2.6, одна з яких навмисно пошкодили, заробивши в одному місці замикання двох сусідніх зубців.



Рисунок 2.6 – Розпиляний магнітопровід АД серії 4А90L2У3

Таблиця 2.5 – Результати дослідження частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт ватметровим методом

I – струм робочої обмотки	$I = 21,9 \text{ A}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 1,72 \text{ В}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,68$
P_1 – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_1 = 25,9 \text{ Вт}$

Таблиця 2.6 – Результати дослідження частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт ватметровим методом з додатковим витком

I – струм робочої обмотки	$I = 22,7 \text{ A}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 1,72 \text{ В}$

U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,70$
P_I – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_I = 27,5 \text{ Вт}$

Розрахунок питомих втрат на основі експериментальних даних дав наступні результати – $7,4 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ та $7,85 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ для випадку без додаткового витка та з ним відповідно.

Навмисно пошкоджена частиною цілого магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт зображено на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Навмисно пошкоджена частина магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт

Таблиця 2.7 – Результати дослідження зіпсованої частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт ватметровим методом

I – струм робочої обмотки	$I = 25,7 \text{ А}$
U_I – напруга робочої обмотки	$U_I = 1,72 \text{ В}$

U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,70$
P_I – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_I = 31 \text{ Вт}$

Таблиця 2.8 – Результати дослід з'єднаної частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт ватметровим методом з додатковим витком

I – струм робочої обмотки	$I = 26 \text{ А}$
U_I – напруга робочої обмотки	$U_I = 1,72 \text{ В}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,71$
P_I – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_I = 32,02$ Вт

Розрахунок питомих втрат на основі експериментальних даних дав наступні результати – $8,85 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ та $9,15 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ для випадку без додаткового витка та з ним відповідно.

Магнітопровід 4А100L6У3 2.2 кВт зображено на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Магнітопровід АД серії 4A100L6Y3 2.2 кВт в корпусі

Таблиця 2.9 – Результати дослідження зіпсованої частини магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 3 кВт ватметровим методом

I – струм робочої обмотки	$I = 19,7 \text{ A}$
U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 2,34 \text{ В}$
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 13,6 \text{ В}$
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,57$
P_I – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_I = 26,71$ Вт

Таблиця 2.10 – Результати дослідження зіпсованої частини магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 3 кВт ватметровим методом з додатковим витком

I – струм робочої обмотки	$I = 23,1 \text{ A}$
-----------------------------	----------------------

U_1 – напруга робочої обмотки	$U_1 = 2,34$ В
U_2 – напруга контрольної обмотки	$U_2 = 13,6$ В
$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0,69$
P_I – розраховані втрати в магнітопроводі	$P_I = 26,71$ Вт

Розрахунок питомих втрат на основі експериментальних даних дав наступні результати – $5,04 \frac{Вт}{кг}$ та $7,06 \frac{Вт}{кг}$ для випадку без додаткового витка та з ним відповідно.

2.2 Розподілення магнітної індукції в магнітопроводі

У математичному пакеті COMSOL Multiphysics на базі готової розрахункової моделі було розраховано розподілення магнітної індукції в одному досліджуваному магнітопроводі під час дослідження ватметровим методом. На рисунку 2.9 представлено розподіл магнітної індукції в магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт. Пікове значення індукції відповідає положенню обмотки збудження.

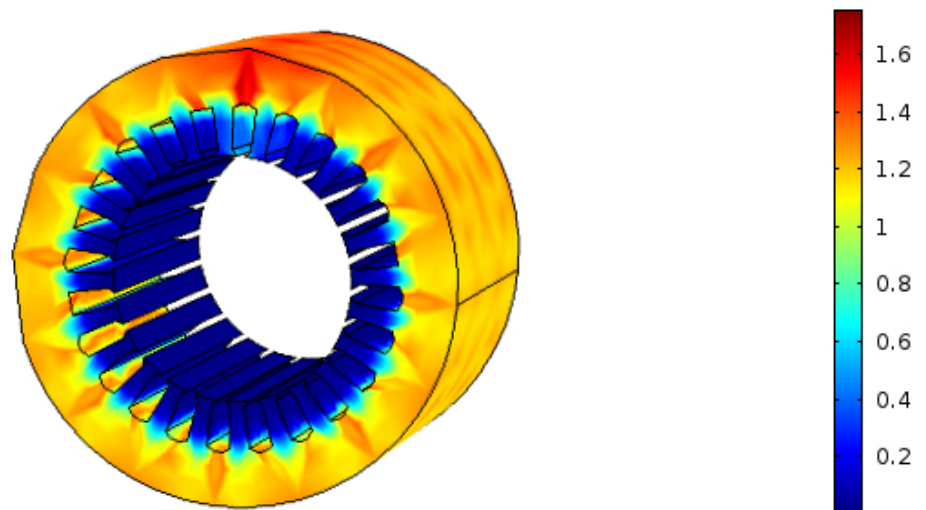


Рисунок 2.9 – Розподіл магнітної індукції у магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт

Цей розрахунок візуально відображає шляхи протікання магнітного потоку, та підтверджує формули, що використовувались під час розрахунків, а саме – магнітний потік не заходить у зубці. Таким чином те, що для розрахунку площі активної стали використовувалась висота лише спинки статора та те, що при розрахунку маси активної сталі розраховується лише маса спинки є теоритично и математично обґрунтованим.

Також на основі готової математичної моделі було розраховано розподіл індукції по товщині листа на різних частотах. Тобто представляє картину впливу поверхневого ефекту. На рисунку 2.10 зображено розподіл магнітної індукції в листі магнітопроводу при різних значеннях частоти.

Так, при частоті 50 Гц якій відповідає фіолетова лінія видно, що індукція розподіляється рівномірно по ширині листа, тобто повністю його пронизує. А зі збільшенням частоти видно, що в центрі листа значення індукції зменшується і майже дорівнює нулю, що говорить про те, що магнітний потік пронизує лист лише на поверхні та не проникає в глиб.

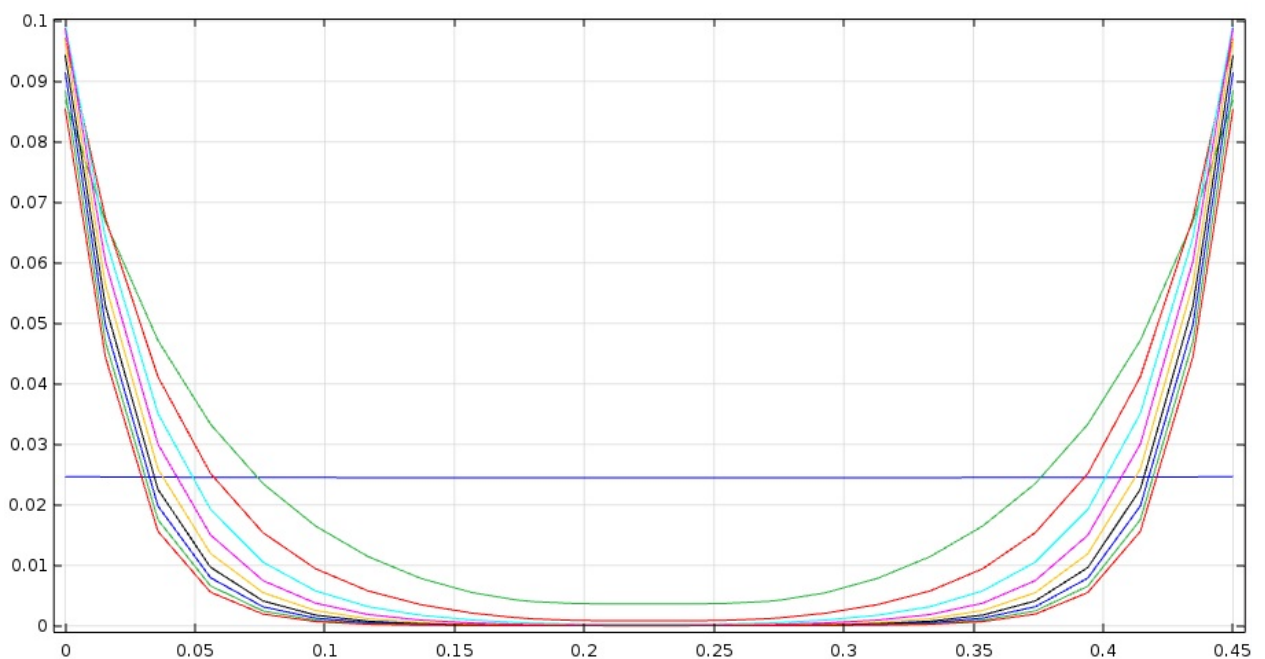


Рисунок 2.10 – Розподіл магнітної індукції по товщині листа в магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт при різних значеннях частоти

2.3 Розділення вимірних втрат на складові

Для перевірки достовірності експериментальних даних варто провести математичних розрахунків втрат в магнітопроводі та порівняти результати. Чарльз Протеус Штейнменц (Charles Proteus Steinmetz) запропонував перший математичний спосіб визначення втрат в сталі в 1894 [21]. У наш час вчені у всьому світі досі пропонують нові моделі на методи більш точного визначення та моделювання втрат в довільних умовах в електричних машинах. Покращені версії початкового виразу Штейнмеца ще й досі використовуються для розрахунку втрат в сталі магнітопроводу ЕМ. Однак, найбільш новітні публікації використовують використовують модель розподілу втрат сталі, що ще часто називається модель Бертотті (Bertotti model), яка розділяє втрати в сталі на втрати на гістерезис, втрати на вихрові струми та, інколи, надлишкові втрати. Більш прогресивні моделі втрат в сталі намагаються математично описати фізичні характеристики гістерезису матеріалу. Проте такі моделі вимагається більшої кількості вхідних даних та потребуються значно більшого часу на розрахунок. Таким чином, існує компроміс між прикладеними зусиллями і часом та точністю результатів.

Варто мати на увазі, що інженерний підхід розподілу втрат в сталі на різні складові і пов'язані з ним моделі розрахунку представляють собою емпіричний підхід, який намагається розділити різні фізичні впливи, через зміну частоти на індукції в електромагнітній системі, на різні компоненти. Однак, він безпосередньо не пояснює справжнє фізичне явище втрат в стали. З фізичної точки зору, обидва види втрат на вихрові струми та на гістерезис у провідному феромагнітному матеріалі базуються на Джоулевому теплі [32]. Вони викликані тим самим фізичним явищем – кожна зміна в намагніченості являє собою рух магнітних доменних стінок та створює вихрові струми, які, в свою чергу, створюють Джоулеве тепло. Факто того, що втрати на гістерезис виникають на майже нульовій частоті обумовлене тим фактом, що навіть якщо макроскопічна зміна намагніченості відбувається дуже повільно, місцева намагніченість всередині доменів змінюється швидко і протягом скінченного відрізка часу, що призводить до утворення вихрових

струмів [32]. Тим не менш, розподіл втрат у більшості випадків показує хорошу кореляцію з вимірними даними і має своє підтвердження в електроенергетиці.

2.3.1 Огляд та аналіз існуючих моделей розрахунку втрат

На рисунку 2.11 представлено огляд найбільш популярних методів визначення втрат в сталі. Всі моделі поділені на три групи. Перша група включає в себе моделі, які напряду базуються на рівнянні Штейнмеца. Моделі у другій групі намагаються розділити загальні втрати в сталі на декілька складових і базуються вони на впливі фізичних змінних (частота, індукція, гармонічний склад і т.п.). Остання група – це математичні моделі втрат на гістерезис. Ці моделі намагаються описати поведінку гістерезису магнітного матеріалу математично або емпірично. Втрати в сталі в такому випадку визначаються площею охопленою змодельованими динамічними кривими гістерезису.

МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ В СТАЛІ



Рисунок 2.11 – Моделі визначення втрат у сталі електричної машини

2.3.1.1 Моделі, що базуються на рівнянні Штейнмеца

Перша група моделей має за свою основу рівняння Штейнмеца (*Steinmetz Equation – SE*) [21]:

$$p_{Cm} = C_{SE} f^{\alpha} \hat{B}^{\beta} \quad (2.9)$$

де p_{Cm} – питомі втрати сталі $\frac{Wm}{kg}$;

$\hat{B}$ – пікове значення індукції в листі;

f – частота змінної напруги.

Три коефіцієнти C_{SE} , α та β визначаються математичним методом приближення моделі втрат до експериментальних даних. Оскільки класичне рівняння Штейнмеца, рівняння (2.9) справедливе лише для синусоїдальної напруги, було розроблено декілька модифікацій за останні декілька десятиріч років, для того щоб розширити рівняння і воно давало правдиві результати і для несинусоїдального сигналу.

Одна з таких модифікацій до *SE* для розрахунку втрат в магнітопроводі для довільної форми сигналу називається модифіковане рівняння Штейнмеца (*Modified Steinmetz Equation – MSE*) [33], [34]. Ідея що лежить за *MSE* полягає у тому, що треба ввести еквівалентну частоту, що залежить від макроскопічної швидкості повторного намагнічування $\frac{dM}{dt}$. Оскільки

швидкість повторного намагнічування пропорційна швидкості зміни індукції $\frac{dB}{dt}$, еквівалентна частота, що залежить від цієї швидкості визначається

наступним чином:

$$f_{екв} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^\pi \frac{dB^2}{dt} dt \quad (2.10)$$

де $\Delta B = B_{max} - B_{min}$.

Поєднавши рівняння (2.10) з SE отримуємо наступне рівняння:

$$P_{Cm} = C_{SE} f_{eq}^{-\alpha} \hat{B}^\beta f. \quad (2.11)$$

Попереднє намагнічення зміщення по постійного струму також можна врахувати, ввівши другу корелюючу складову. Ця складова містить два коефіцієнти, які також мають бути визначені з результатів експериментів при різних частотах на індукції [33]. Недоліком *MSE* є те, що вона втрачає точність для хвиль з невеликою основною частотною частиною.

Більш нова модифікація *SE* називається узагальнене рівняння Штейнмеца (*Generalized Steinmetz Equation – GSE*), описана і порівняна з модифікованим рівнянням Штейнмеца в [35]. Ця модифікація основана на ідеї, що миттєве значення втрат в сталі це однозначна функція, що залежить від індукції B та швидкості зміни індукції $\frac{dB}{dt}$, не беручи до уваги історію форми кривої індукції. Існує формула, яка використовує цю однозначну функцію і поєднує її з коефіцієнтами з *SE*.

$$P_{Cm} = \frac{1}{T} \int_0^T C_{GSE} \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha |B(t)|^{\beta-\alpha} dt \quad (2.12)$$

де C_{GSE} – коефіцієнт пов'язаний з C_{SE} .

Перевагою *GSE* в порівнянні з *MSE* є те, що *GSE* враховує зміщення по постійного струму не вимагаючи додаткових коефіцієнтів чи вимірів. Крім того, *GSE* також може бути використаний для одержання еквівалентної частоти або еквівалентної амплітуди, яку можна застосувати в класичному рівнянні Штайнмеца (подібно до *MSE*). З цією метою пропонуються різні підходи в [35].

Недоліком GSE є обмеження точності, у випадку якщо третя або трохи вища гармоніка індукції стає значною. Це випадок, коли у формі кривої індукції є декілька піків. Через незначні петлі в петлі гістерезису в таких випадках може бути необхідним враховувати аналітичні моделі втрат гістерезису. Для подолання цієї проблеми попередньо отримана GSE оптимізована до так званого покращеного узагальненого рівняння Штайнмеца (*improved Generalized Steinmetz Equation - iGSE*) [35]. Ідея $iGSE$ полягає в тому, щоб розділити сигнал на один основний та один або кілька незначних циклів, щоб розглядати незначні цикли в повній основній петлі гістерезису для розрахунку втрат. Тому в роботі [36] представлений рекурсивний алгоритм, який розподіляє форму сигналу густини потоку на основні та малі цикли та обчислює втрати заліза для кожної визначеної петлі x окремо за формулою (2.13).

$$P_{Cm_x} = \frac{1}{T} \int_0^T C_{GSE} \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha |\Delta B|^{\beta-\alpha} dt \quad (2.13)$$

де ΔB – пік-пік індукція поточної великої або малої петлі кривої.

Недоліком $iGSE$ є те, що він не має чутливості до зміщення постійного струму, як GSE , оскільки $iGSE$ є функцією ΔB , а не $B(t)$.

Подібний підхід до $iGSE$ був опублікований як натуральніше розширення Штайнмеца (*Natural Steinmetz Extension – NSE*) [37], де також враховується пік-пік значення індукції ΔB :

$$P_{Cm} = \left(\frac{\Delta B}{2} \right)^{\beta-\alpha} \frac{C_{SE}}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha dt \quad (2.14)$$

У такому підході форма сигналу не ділиться на основні та малі петлі. Замість цього він безпосередньо застосовується до хвилі всього періоду (незначними петлями в петлі гістерезису нехтують). Вона фактично зосереджена на впливі прямокутних сигналів перемикавання (наприклад, схем модуляції ширини імпульсу).

Підводячи підсумки різних підходів, що базуються на рівнянні Штайнмеца та їх коефіцієнтах, можна зазначити, що вони пропонують простий і швидкий спосіб прогнозування втрат заліза без необхідності попередньо вимірювати втрати використаного матеріалу. Таким чином, для хвиль з високим вмістом гармонік може бути важко знайти придатні коефіцієнти, які дають хороші результати у повному діапазоні частот застосовуваної форми сигналу.

Крім того, для великих діапазонів частот, точність в середньому нижче, ніж у моделях втрат гістерезису Прайзаха (*Preisach*), представлених у підрозділі 2.3.1.3. Особливо при низьких частотах втрати обумовлені головним чином ефектом гістерезису і, таким чином, стають більш-менш незалежними від форми сигналу.

Також, варто зазначити, що для ламінування сталевих листів електричних машин [37] досліджували лише модель *MSE*. Інші моделі, розроблені на базі рівняння Штейнмеца, були розроблені з фокусом на ферити на більш високих частотах, і, скоріш за все, вони не перевірялись на типових кремній-металічних сплавах, які зазвичай використовуються в ЕМ.

2.3.1.2 Моделі, що базуються на розділенні втрат

Іншим типом рівнянь втрат у сталі, які базуються на розділенні втрат на різні фізичні складові. У [38], Джордан розділив втрати по принципу їх залежності від змін частоти (f та f^2). Це означає, що втрати були розділені на *статичні*, тобто втрати на гістерезис та *динамічні*, тобто втрати на вихрові струми.

$$p_{Cm} = p_z + p_v = C_z f \hat{B}^2 + C_v f^2 \hat{B}^2 \quad (2.15)$$

де C_z та C_v – коефіцієнти гістерезису та вихрових струмів відповідно.

У підході Джордана вважається, що втрати на гістерезис пропорційні площі кривої намагнічування матеріалу на низьких частотах ($f \rightarrow 0$ Гц). Складові втрат від вихрових струмів p_v можуть бути отримані шляхом апроксимації рівнянь Максвелла:

$$p_v = \frac{d^2 \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2}{12\rho\gamma} \quad (2.16)$$

де $B(t)$ – індукція як функція часу;

d – товщина ізолюваного листа;

ρ і γ – питомий опір і щільність матеріалу листів відповідно.

Було доведено, що рівняння (2.15) дає правильні результати для нікель-залізних сплавів, але має недостатню точність для кремній-залізних сплавів [39]. Через це, Прі та Біном [40] було введено імперативний коефіцієнт поправки $\eta_{над}$, що називається фактором надлишкових втрат (часто також називають коефіцієнтом аномальних втрат). Таким чином рівняння (2.15) приймає вигляд:

$$p_{Cm} = p_z + \eta_{над} p_v = C_z f \hat{B}^2 + \eta_{над} C_v f^2 \hat{B}^2 \quad (2.17)$$

$$\text{де } \eta_{над} = \frac{P_{в_виміряне}}{P_{в_розраховане}} > 1.$$

Для анізотропної (орієнтованої) електротехнічної сталі $\eta_{над}$ досягає значень в межах від 2 до 3 [39].

Інший підхід до покращення рівняння (2.15) полягає в тому, щоб ввести додатковий термін втрати $p_{над}$ для врахування надлишкових втрат як функція індукції та частоти.

$$p_{Cm} = p_z + p_v + p_{над} = C_z f \hat{B}^2 + C_v f^2 \hat{B}^2 + C_{над} f^{1.5} \hat{B}^{1.5}. \quad (2.18)$$

Оскільки надлишкові втрати в рівнянні (2.18) все ще ґрунтуються на емпіричних чинниках, Бертотті розробив теорію, що призвела до створення статистичної моделі для розрахунку втрат заліза шляхом введення так званих магнітних об'єктів, що призвели до фізичного опису на функції коефіцієнту втрат $C_{над}$ від активних магнітних об'єктів та руху доменних стінок [41].

$$C_{над} = \sqrt{SV_0\sigma G} \quad (2.19)$$

де S – площа поперечного перерізу ізолюваного листа;

$G \approx 0,136$ безрозмірний коефіцієнт затухання вихрових струмів;

σ – електропровідність ізолюваних листів;

V_0 – характеризує статистичний розподіл місцевих коерцитивних полів та враховує розмір зерна матеріалу [41].

В останніх дослідженнях було зазначено, що втрати гістерезису листи з високолегованих електротехнічних та інших сплавів не відповідають дійсності відносно першого члена в рівнянні (2.18) щодо його квадратичної залежності від індукції. Таким чином, вводиться інший придатний коефіцієнт α , який зазвичай має значення в межах 1,6 і 2,2 для феромагнітних матеріалів і сплавів. Включення цього фактору призводить до наступного рівняння, яке в наші дні також часто використовується при обчисленнях методом кінцевих елементів в програмному забезпеченні: або з $\alpha = 2$ [42] або змінною α [43], [44]:

$$P_{Cm} = p_z + p_v + p_{над} = C_z f \hat{B}^\alpha + C_v f^2 \hat{B}^2 + C_{над} f^{1.5} \hat{B}^{1.5}. \quad (2.20)$$

Слід зазначити, що магнітні поля, як передбачається, є змінними в попередніх моделях. Це, як правило, справедливо в електричних трансформаторах. Проте в електричних машинах потік в статорі з часом обертається. У роботах [44] - [48] введені декілька підходів, що зосереджують увагу на втратах в сталі внаслідок обертальної намагніченості в листах (також називають обертовими втратами). Огляд методів і моделей

вимірювання втрат за допомогою обертового заліза можна знайти в [49] та [50], а також міжнародне дослідження порівняння та вимірювання обертових втрат сталі представлено в [51].

Втрати заліза в електричних машинах, викликані обертовою намагніченістю, відбуваються в основному в наконечниках зубців і в ділянках перетину між зубами та ярмом. У більшій частині машини, тобто в середині зубів і в середині ярма, намагніченість в основному односпрямована.

Еквівалентний підхід до моделі розділення втрат у (2.18) був вибраний для обертових втрат, і було показано, що обертові втрати демонструють подібну нелінійну поведінку як змінні втрати заліза [52]. Крім того, у цій же статті показано, що співвідношення обертових втрат до змінних втрат ($\frac{P_{об}}{P_{змін}}$)

монотонно зменшується з збільшенням щільності потоку B .

Часто застосовуваний практичний підхід до втрат в сталі в електричних машинах – це модель розподілу після процесів намагнічування. Це означає, що втрати, спричинені зміною намагніченості, намагніченості обертання та вищими гармоніками, додаються для визначення загальних втрат заліза в машині [53]:

$$P_{Ст} = C_1 P_{змін} + C_2 P_{об} + C_3 P_{гарм} \quad (2.21)$$

де $P_{змін}$ – це втрати, викликані зміною намагніченості;

$P_{об}$ – втрати, обумовлені обертовою намагніченістю;

$P_{гарм}$ – втрати, спричинені вищими гармоніками;

C_x – емпіричний коефіцієнт, що залежить від матеріалу та геометрії, отримуються завдяки експериментам та математичним наближенням за допомогою кривих. Вони також можуть враховувати фактори корекції виробництва [53].

Інший шлях розрахунку втрати сталі внаслідок обертової намагніченості полягає у введенні додаткового корекційного коефіцієнта в

модель розподілу втрат з двома складовими, рівняння (2.15). Це робиться в [54], де коефіцієнт обертових втрат за рахунок намагніченості обертання додають до складової вихрових струмів.

$$p_{Cm} = \alpha_2 f \hat{B}^2 + (\alpha_1 + \alpha_4 \hat{B}^{\alpha_3}) f^2 \hat{B}^2 \quad (2.22)$$

$$\text{де } \alpha_1 = C_\phi, \quad \alpha_2 = C_\epsilon \left(1 + \frac{B_{min}}{B_{max}}(r - 1)\right);$$

r – коефіцієнт обертового гістерезису;

B_{min} і B_{max} – мінімальне і максимальне значення функції $B(t)$ за час одного періоду;

α_3 і α_4 використовуються для точного представлення втрат в сталі при великих значеннях поля шляхом введення більш високого порядку густини потоку B . Тож, їх називають факторами втрат високого порядку. Крім того, α_3 залежить від товщини ізоляції. Термін надлишку втрат C_{nad} є незначним порівняно з іншими складовими цієї моделі і таким чином не розглядається в рівнянні (2.22).

2.3.1.3 Моделі гістерезису

Щоб отримати більш високу точність прогнозування втрат заліза, математичні гістерезисні моделі можуть бути використані, якщо існують вимірювання кривих повного гістерезису досліджуваного матеріалу або навіть більше параметрів доступні. Поряд із добре задокументованими класичними гістерезисними моделями від Прейзаха [55], [56] та Джайлса і Атерона [57], є кілька вдосконалених та модифікованих моделей втрати заліза, що застосовуються для сталевих листів та повних електричних машин. Як правило, вони потребують більших вимірювань та даних про матеріал листів у порівнянні з простими моделями Штейнмеца та розподілом втрат. Проте, вони також дають кращі результати з точки зору точності за рахунок більш складних симуляцій. Крім того, можна також розглянути малі петлі та

попередню намагніченість постійного струму за допомогою модифікацій цих моделей [58]. Втрати в сталі можна розрахувати в цих моделях шляхом визначення площі повної кривої намагнічення за формулою:

$$P_{Cm} = \frac{1}{T} \int_0^T H dB \quad (2.23)$$

Деякі застосовні покращені та модифіковані моделі гістерезису, серед іншого, містять динамічну модель Преїсаха [56], модель поверхні втрат [59], магнітодинамічну модель на основі в'язкості [60], модель гістерезису як магнітного тертя [61] та модель Опера [62]. Вони обговорюються більш детально в наступних підрозділах. Оскільки перші чотири згаданих моделей гістерезису базуються на класичній моделі Преїсаха чи пов'язані з нею, короткий вступ до моделі Преїсаха наведено нижче.

Динамічна модель Преїсаха розширює класичну модель Преїсаха [55], вводячи коефіцієнт залежності для кожного елементарного прямокутної петлі моделі гістерезису [63], [64]. Цей коефіцієнт, що залежить від швидкості, враховує час затримки індукції B від напруженості магнітного поля H . Таким чином, можна врахувати збільшення петлі гістерезису зі збільшенням частоти та, таким чином, моделювати втрати на вихровий струм і надмірні втрати.

Залежний від швидкості коефіцієнт $\frac{df}{dt}$ враховується в функції ваги

$w(\alpha, \beta, \frac{df}{dt})$, де залежно від моделі гістерезису f представлена або

індукцією B , або напруженістю магнітного поля H . Функція для визначення значень операторів гістерезису залежить від матеріалу та визначається за різними вимірюваннями динамічного гістерезису. У роботах [65] та [66] порівнюється динамічна модель Преїсаха, яка використовується для прогнозування втрат заліза в магнітопроводах електричних машинних для різних чисельних реалізацій з використанням методів моделювання методом кінцевих елементів.

Інша динамічна та скалярна модель гістерезису – модель поверхні втрат, представлена в роботі [59]. Магнітне поле H визначається як поверхнева функція S , яка розділена на статичну та динамічну частину:

$$S = H\left(B, \frac{dB}{dt}\right) = H_{стат}(B) + H_{дин}\left(B, \frac{dB}{dt}\right) \quad (2.24)$$

де B – магнітна індукція;

$\frac{dB}{dt}$ – швидкість зміни магнітної індукції.

Модель пов'язує намагніченість поле H на поверхні листів з щільністю потоку B у товщині листа. Статична частина моделюється класичною моделлю Прейсаха (незалежна від швидкості). Вхідні значення визначаються вимірюваннями основної петлі та кривих зміни напрямку першого порядку. Динамічна частина моделі складається з двох лінійних аналітичних рівнянь, що описують низькі та високі значення похідних густини потоку $\frac{dB}{dt}$ після віднімання статичної частини магнітного поля $H_{стат}$. Ці два лінійних вирази динамічної частини зв'язані поліномом другого порядку.

Магнітодинамічна модель на основі в'язкості. Схожою моделлю для моделі поверхні втрат є магнітодинамічна модель на основі в'язкості [60]. Він також базується на статичній (незалежній від швидкості) моделі гістерезису Прейсаха, але використовує диференціальне рівняння в'язкості для опису часу затримки між магнітною індукцією $B(t)$ та намагніченості магнітного поля $H(t)$. Це диференціальне рівняння визначає форму динамічної частини петлі та динаміку моделі для врахування надлишкових втрат. Необхідними матеріалами для даної моделі є статична основна петля гістерезису та кривих зміни напрямку першого порядку, а також дві динамічні петлі разом з товщиною листа та його опором.

Напівемпірична реалізація моделі гістерезису доступна в деяких програмних продуктах. Вона зосереджена на простому методі вхідних даних,

як показано в [67]. Основна симетрична повна петля гістерезису BH використовується для визначення траєкторії функцій та екстраполяції незначних циклів математично. Вони безпосередньо використовуються в електромагнітних розрахунках для визначення магнітного поля та розподілу потоку в симуляційній моделі. У цьому процесі також враховується історія намагніченості в кожному елементі. Втрати гістерезису визначаються енергією та ко-енергією в кожному елементі моделі. Втрати вихрової потужності визначаються в кожному елементі за рівнянням Максвелла, як показано в рівнянні (2.16).

2.3.2 Розділення втрат

Для цього було обрано метод Джордана, формула якого наступна:

$$p_{Cm} = p_z + p_v = C_z f \hat{B}^2 + C_v f^2 \hat{B}^2. \quad (2.25)$$

Тож для розрахунку складових втрат необхідно отримати значення коефіцієнтів C_z і C_v . Ці коефіцієнти є емпіричними. Для їх визначення були проведені експерименти по визначення втрат в магнітопроводі при різних значеннях частоти та індукції за схемою на рисунку 2.12. Результати дослідження магнітопроводу зазначені в таблиці 2.3.

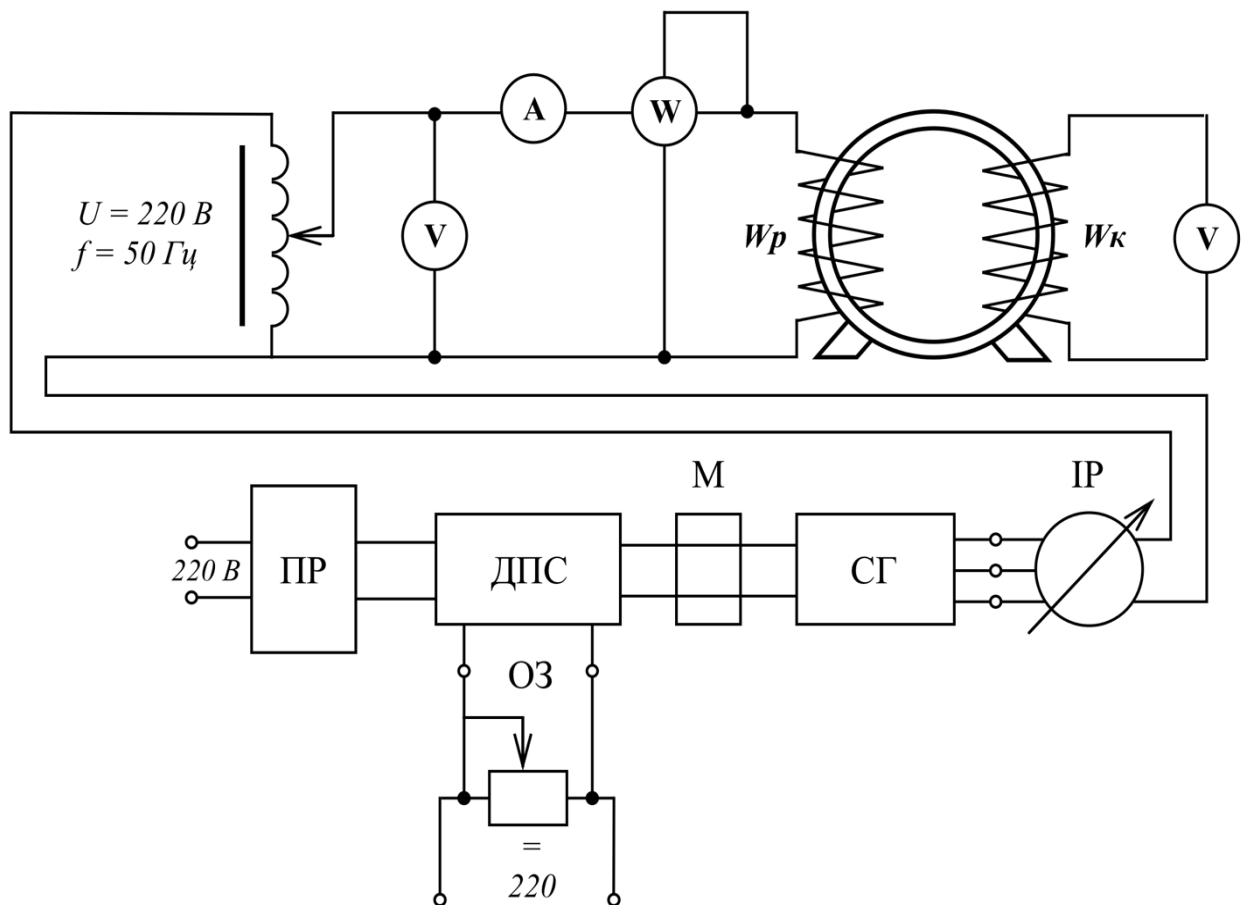


Рисунок 2.12 – Схема ватметрового методу для роботи на частоті відмінній від 50 Гц

Таблиця 2.11

B	f	P
1	45	41,81
1	50	46,1
1,2	50	66,02
1,4	50	90,1

Після чого, використовуючи отримані дані та математичний метод наближення за допомогою кривих (curve fitting) в програмному пакеті Wolfram Alpha було отримано значення коефіцієнтів C_2 і C_6 та результати розподілу представлено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12

B	f	P	P_z	P_v
1	45	41,81	30,6	11,21
1	50	46,1	34	12,1
1,2	50	66,02	48,46	17,56
1,4	50	90,1	66,64	23,46

Також проведемо аналогічні розрахунки, використовуючи експериментальні дані з використанням додаткового витка, що намотується на магнітопровід з метою збільшення питомих втрат в сталі цього магнітопроводу. Результати експериментів представлено в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13

B	f	P
1	45	50,19
1	50	56,18
1,2	50	83,38
1,4	50	115,98

Таблиця розподілу втрат для магнітопроводу зі штучно погіршеним станом міжлистової ізоляції, змодельованого за допомогою додаткового вита, показано в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14

B	f	P	P_z	P_v
1	45	50,19	30,6	19,59
1	50	56,18	34	22,18
1,2	50	83,38	48,46	34,42
1,4	50	115,98	66,64	49,34

На основі результатів розподілу втрат було побудовано графік залежності кожного виду втрат від повного значення втрат для обох випадків, рисунок 2.13, рисунок 2.14.

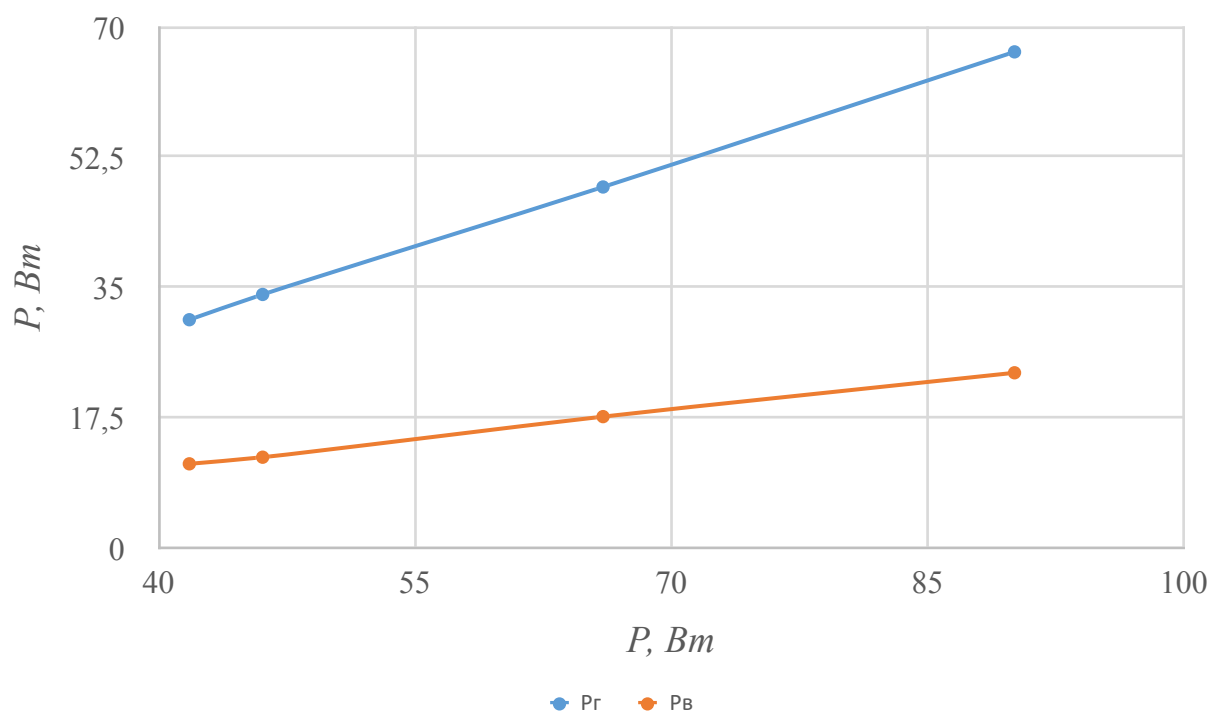


Рисунок 2.13 – Графік залежності обох складових втрат у сталі від повних втрат в сталі

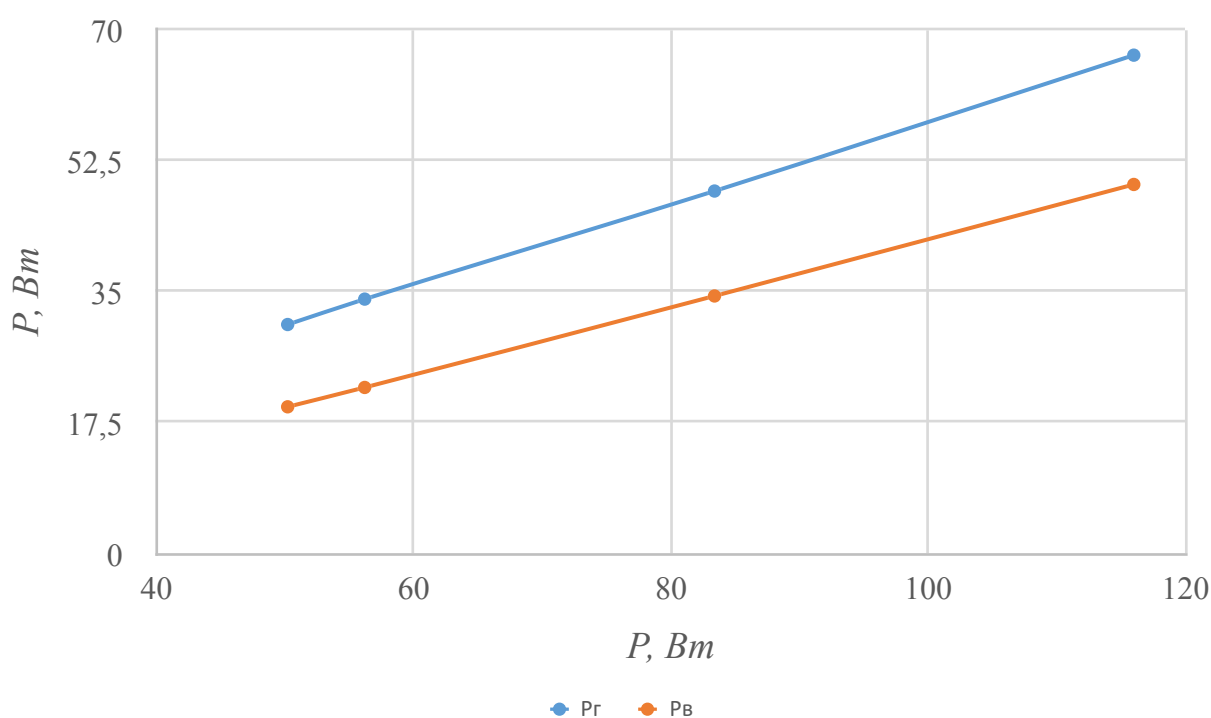


Рисунок 2.14 – Графік залежності обох складових втрат у сталі від повних втрат в сталі для випадку зі штучним дефектом

При порівнянні двох графіків видно, що з появою дефекту пряма втрат на вихрові струми стала більш крутою, що говорить про збільшення саме цієї складової втрат, в той час як характер прямої втрат на гістерезис не змінився.

Як видно з розрахунків, додатковий виток збільшує сумарний опір так званого інтегрального контуру паразитних струмів і цим збільшує втрати саме на гістерезис. Тож, майбутній метод буде базуватись на цьому факті та використовувати певні фізичні явища, характерні для вихрових струмів.

2.4 Визначення питомих втрат в зібраному двигуні із застосуванням досліджуваного магнітопроводу

Оскільки в наявності не має двох однакових магнітопроводів відповідної серії без дефектів і з дефектами, не можна зробити порівняння, на основі яких можна було б зробити певні висновки про якість досліджуваних магнітопроводів. Коли магнітопровід статора АД досліджується окремо, в ньому відбуваються не зовсім ті процеси, що в зібраній машині. Наприклад, при дослідженні окремо магнітопроводу, в ньому наводять значно меншу індукцію, ніж та, що наводиться в зібраному АД. У розібраному вигляді дослідження проводились для значення індукції 1 Тл, а в зібраних двигунах воно складає 1,4 Тл та 1,7 Тл, що відповідають індукції в спинці статора та індукції в зубцях.

До того ж лінії магнітного потоку зовсім по-іншому пронизують магнітопровід у разі дослідження розібраного АД. У робочій ЕМ лінії магнітного поля проходять від полюса до полюса і повністю пронизують зубці. У розібраній же машині, ці лінії проходять по спинці статора і зовсім трохи заходять у зубці. Немає змоги теоретично розрахувати втрати в магнітопроводі статора розібраного АД певної серії. Тому для порівняння необхідно зібрати двигун з даними, що відповідають серії магнітопроводу статора, який досліджується. А необхідні дані про АД з магнітопроводом без дефектів можна отримати, виконавши типовий розрахунок АД, опираючись на довідникові дані про серійні двигуни.

Формула основних втрат у сталі магнітопроводу статора:

$$P_{Cm.осн} = p_{1,0/50} * \left(\frac{f_1}{50} \right) * (k_{\partial a} B_a^2 m_a + k_{\partial z} B_{ZCP}^2 m_{Z1}) [70] \quad (2.26)$$

де $p_{1,0/50}$ – питомі втрати певної марки сталі при індукції в 1 Тл і частоті живлячої мережі в 50 Гц;

$k_{\partial a}$ і $k_{\partial z}$ – коефіцієнти, що враховують вплив нерівномірності розподілення магнітного потоку по перерізам ділянок магнітопроводу і технологічних факторів на втрати в сталі. Для машин потужністю менше 250 кВт приблизно дорівнюють 1,6 та 1,8 відповідно;

B_a і B_{ZCP} – індукція в ярмі та середня індукція в зубцях статора, Тл;

m_a і m_{Z1} – маса сталі ярма і зубців статора, кг.

Один з магнітопроводів був уже в корпусі, на якому були паспортні дані рисунок 3.1, за якими з [69] було отримано деякі розміри необхідні для розрахунку маси. Також було безпосередньо виміряно ці необхідні величини та їх значення відповідають значенням зі [69]. За допомогою цих розмірів було розраховано масу ярма та зубців. Досліджуваний магнітопровід виявився магнітопроводом АД 2,2 кВт серії 4А100L6У3.

Таблиця 2.15 – Паспортні дані з корпусу досліджуваного магнітопроводу АД 2,2 кВт серії 4А100L6У3

Величина	Значення
f , Гц	50
P , кВт	2,2
$\cos\varphi$	0,73
η , %	81
U_Y , В	380
I , А	5,5

$$m_a = \pi * (D_a - h_a) h_a l_{Cm} \gamma_{Cm} k_3 = 3.14 * (0,168 - 0,012) * 0,012 * 0,121 * 7800 * 0,97 = 5,3 \text{ кг} \quad (2.27)$$

$$m_z = h_{z1} b_{z1} Z_1 l_{Cm} \gamma_{Cm} k_3 = 0,0165 * 0,005 * 36 * 0,121 * 7800 * 0,97 = 2,49 \text{ кг} \quad (2.28)$$

Маючи значення мас:

$$P_{Cm.осн} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{ZCP}^2 \cdot m_{Z1}) = 2,5 * \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} * (1,6 * 1,4^2 * 5,3 + 1,8 * 1,7^2 * 2,49) = 73,75 \text{ Вт} \quad (2.29)$$

Таким чином ми отримали значення втрат в сталі в зібраній ЕМ, яка використовує якісний, бездефектний магнітопровід.

Тепер математичним шляхом визначимо втрати в сталі, при використанні досліджуваного магнітопроводу, що має погіршений стан ізоляції і як наслідок збільшені питомі втрати, а саме $p_{1,0/50} = 5,04 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$.

$$P_{Cm.осн} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{ZCP}^2 \cdot m_{Z1}) = 5,04 * \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} * (1,6 * 1,4^2 * 5,3 + 1,8 * 1,7^2 * 2,49) = 149,06 \text{ Вт} \quad (2.30)$$

Що стосується зібраного двигуна серії 4A100L6Y3 з магнітопроводом, який має певні дефекти, про що свідчить завищені питомі втрати, то втрати в сталі тут визначаються шляхом проведення досліду неробочого ходу і розділом втрат на механічні і втрати в сталі. Зробивши це, було отримано значення втрат в сталі, що склали 192 Вт. Віднімемо додаткові втрати в сталі, щоб отримати значення основних втрат в сталі. Додаткові втрати в сталі на пряму не залежать від якості сталі, але для точності результатів їх також було розраховано. Приблизно додаткові втрати становлять 8 Вт. Тому основні втрати в сталі дорівнюватимуть:

$$P_{Cm.осн} = P_{Cm} - P_{Дод} = 192 - 8 = 184 \text{ Вт} \quad (2.31)$$

Експериментальне значення втрат виявилось приблизно на 20% більше ніж розраховане. Це можна пов'язати з тим, що в зібраній машині відбуваються дуже складні процеси та взаємодія, які дуже складно врахувати у формулі, тому відмінність між результатами не дивна.

Висновок до розділу 2

У цьому розділі експериментальним шляхом визначаються питомі втрати в досліджуваних магнітопроводах. Також проводяться експерименти при моделюванні погіршення стану магнітопроводу, що виконується шляхом намотування витка на спинку магнітопроводу та замикання його кінців на вольтметрі. Це дає змогу отримати в два рази більше ввідної інформації для подальшого дослідження і моделює випадок, коли існують два магнітопроводи однакової серії, але різного ступеню дефектності.

Використовуючи готову математичну модель було розраховано розподіл магнітного поля в магнітопроводі під час дослідження ватметровим методом, що візуально показало шляхи замикання силових ліній та підтвердило спосіб розрахунку втрат у пункті 2.1. Також на основі готової моделі розраховано розподіл індукції по ширині листа на різних частотах, що наглядно відображає дію поверхневого ефекту.

Також математичним методом було розділено втрати отримані під час ватметрового методу на складові. Ці розрахунки мають припущення що втрати на гістерезис зовсім не змінюються при погіршенні стану магнітопроводу, хоча насправді вони трохи змінюються. Цей розподіл показує, що при погіршенні стану магнітопроводу збільшуються саме втрати на вихрові струми і таким чином було вирішено будувати нову методику дослідження на основі дії вихрових струмів та характерних їм явищах.

Ще було проведено експеримент неробочого ходу для ЕМ з використанням одно з досліджуваних магнітопроводів, а саме магнітопровід асинхронного двигуна серії 4A100L6Y3. Результати цього дослідження та розрахунків показують та експериментально доводять, що між питомими втратами окремо взятого магнітопроводу та втратами в сталі зібраної ЕМ існує пряма кореляція – погіршення стану ізоляції магнітопроводу, а, як результат, збільшення його питомих втрат, призводить до збільшення втрат у сталі.

РОЗДІЛ 3

НОВИЙ МЕТОД ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ

3.1 Новий метод та методика дослідження

Як зазначалось в одному з попередніх розділів, існує необхідність у розробці такого методу дослідження, який би не потребував багато часу чи грошей.

Ремонтні підприємства та цехи є основними місцями де потребується легкий метод визначення якості магнітопроводів. Для них конкретне значення питомих втрат магнітопроводу не дуже важливе, для цілей які вони переслідують, а саме – визначити чи можна ще використовувати даний магнітопровід чи він вже дуже поганої якості і краще відмовитись від його використання оскільки його дія на інші складові ЕМ, а особливо на обмотку, будуть руйнівними та ЕМ з цим магнітопроводом відносно скоро знову попаде до ремонту. Таким чином потребується не стільки кількісна характеристика якості магнітопроводу, скільки якісна.

Як було доведено в розділі 2, при погіршенні стану магнітопроводу збільшується складова втрат на вихрові струми, тож варто використати цю особливість у розроблюваному методі. Характерною відмінністю вихрових струмів є те, що вони залежать від квадрату частоти на відміну від втрат на вихрові струми, цей факт також можна використати. Маючи на увазі ці два факти, пропонується використовувати методику, яка базується на впливі вихрових струмів та поверхневого ефекті на частотах, вище промислової.

Ідея методу полягає в наступному: кожен вихровий струм, при протіканні, створює свій власний магнітний потік, потоки від вихрових струмів взаємодіють з основним магнітним потоком і оскільки ці потоки направлені зустрічно, відносно основного, то відбувається послаблення результуючого магнітного потоку. Таким чином, оскільки у проблемного магнітопроводу втрати на вихрові струми збільшені, то в ньому можна спостерігати більш сильне послаблення магнітного потоку.

Для того, щоб отримати більш наглядні та виразні результати пропонується проводити виміри на частотах вище 50 Гц. Оскільки на частоті вище частоти мережі починає проявлятися поверхневий ефект і втрати будуть зростати по квадратичному закону. В даному випадку він є корисним і користь від нього полягає у тому, що при поверхневому ефекті вихрові струми будуть концентруватись біля країв листа і потоки від цих струмів будуть більш сильними і як наслідок результуючий потік буде ослаблений ще більше. При збільшенні частоти діють дві протидіючі тенденції, перша – зі збільшенням частоти зростають втрати в сталі, а саме втрати на гістерезис зростають лінійно, а втрати на вихрові струми зростають квадратично і друга тенденція – проявляється поверхневий ефект, що призводить до зменшення активного перерізу листа магнітопроводу і як результат падає потік і втрати також зменшуються. Тому не достатньо просто задатися високим значенням частоти, а необхідно визначати найбільш підходящі значення частоти, на яких розмагнічуючий ефект від вихрових струмів є найбільш наглядним.

А методика яка базується на цьому методі буде наступний – на магнітопровід необхідно намотати декілька витків робочої обмотки, на яку буде подаватися живлення від генератора частоти та один виток вимірювальної обмотки. Схема запропонованої методики зображена на рисунку 3.1.

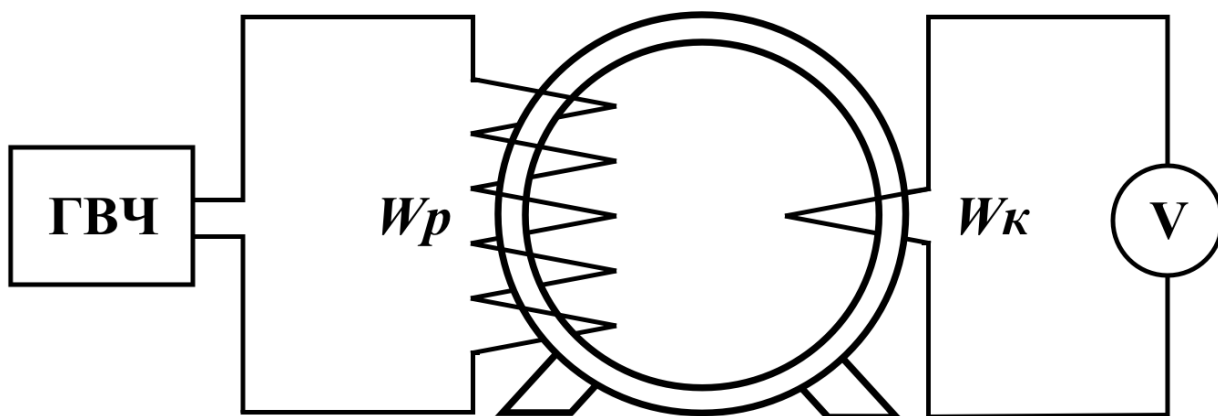


Рис 3.1 – Схема запропонованої методики

Провести виміри для двох значень частоти підтримуючи значення напруги на робочій обмотці постійним. Потім необхідно знайти відношення

між значеннями напруги на вимірювальній обмотці у цих двох точках. Згідно нашої теорії, якщо f_1 і f_2 – частоти для яких було знято експериментальні точки, де f_1 – частота що відповідає більшому значенню ЕРС – E_1 , а f_2 – частота що відповідає меншому значенню ЕРС – E_2 , значення відношення E_2/E_1 буде більшим для якісного магнітопроводу і, відповідно, меншим для магнітопроводу з наявними дефектами.

При яких значеннях частоти краще всього знімати точки, ще варто дізнатись. Треба знайти такі значення при яких різниця між значеннями ЕРС для дефектного та бездефектного магнітопроводу будуть суттєві. Для цього необхідно провести експерименти та розрахунки і визначити такі точки.

Але, оскільки майже ніколи не трапляється ситуація, що одразу є один дефектний магнітопровід і один бездефектний, при якій можна було б порівняти значення цього відношення, то необхідно провести ряд дослідів для різних магнітопроводів, різних ступеней дефектності для отримання статистичних даних. Це дозволить робити не порівняльний аналіз, а просто звірятись зі статистичними даними робити висновок щодо стану магнітопроводу. Таким чином необхідність у еталонному екземплярі відпадає, що робить цей метод достатньо простим у виконанні і підходящим використання. До того ж в ремонтних цехах є спеціальні скоби які можна одягати на спинку магнітопроводу і таким чином навіть не потрібно витрачати час на намотку витків.

3.2. Експериментальна перевірка методу

Щоб перевірити чи запропонована методика справді має результати які очікуються опираючись на фізичні залежності, було проведено низку експериментів на магнітопроводах різних розмірів та стану міжлистової ізоляції. Для цього було зібрано схему, зображену на рисунку 3.1 та знято значення напруги на вторинній обмотці при діапазоні частот від 50 Гц до 20 кГц. Далі будуть приведені результати експериментів для кожного з досліджуваних магнітопроводів.

Таблиця 3.1 – Результати експериментального дослідження осердя АД серії 4AA63B4Y3 0,37 кВт

$f, \text{Гц}$	$U, \text{мВ без витка}$	$U, \text{мВ з витком}$
50	2,25	2,25
100	3	3
150	3,75	3,65
200	4,5	4,35
250	5,2	5
300	5,6	5,4
450	6,2	6
500	6,6	6,05
750	6,8	6,2
1000	7,7	6,54
1500	7,75	6,54
2000	7,75	6,54
2500	6,75	5,5
3000	6,75	5,5
3500	7	5,5
4000	7	5,5
5000	7	5,5
10000	7	5,5
30000	7	5,4
35000	7	5,4

Графік залежності напруги від частоти для магнітопроводу АД серії 4AA63B4Y3 0,37 кВт показано на рисунку 3.2.

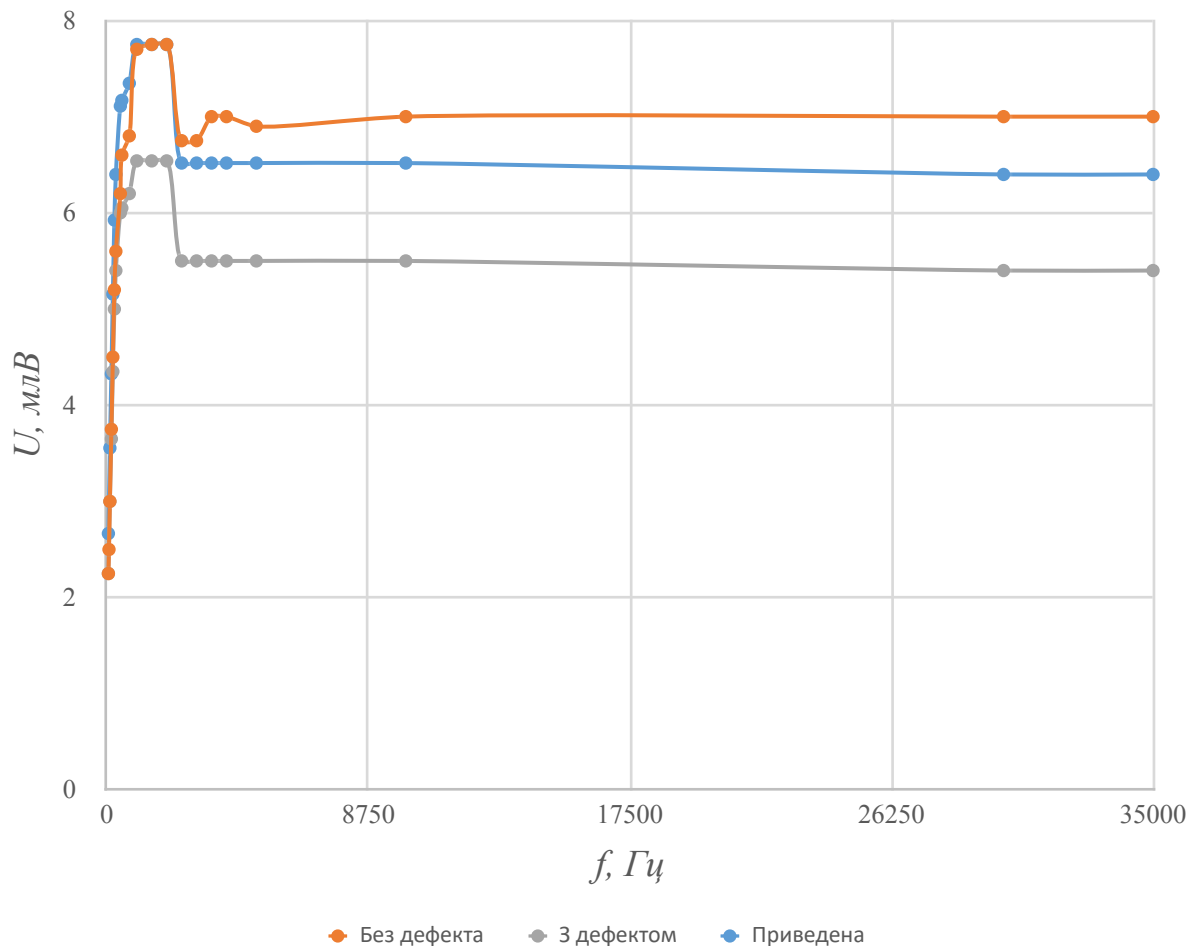


Рисунок 3.2 – Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для магнітопроводу АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт

Приведення виконувалось наступним чином, кожна точка кривої для випадку з витком було помножено на коефіцієнт, що являє собою відношення між значеннями у точці максимального значення напруги. У цьому випадку це точка 750 Гц, а визначення коефіцієнта представлено в рівнянні (3.1).

$$k = \frac{U_{\text{max. без витка}}}{U_{\text{max. з витком}}} = \frac{7,75}{6,54} = 1,1 \quad (3.1)$$

Таким чином максимальне значення графіка для випадку без витка та приведеної кривої будуть співпадати і буде дуже наглядно видно різницю між дефектним та бездефектним магнітопроводом. Аналогічні кроки було виконано для магнітопроводів, де точки значення напруги при частоті 1 кГц не співпадають.

Кривій для магнітопроводу без дефекту відповідають питомі втрати $3,92 \frac{Вт}{кг}$, а з дефектом - $5,85 \frac{Вт}{кг}$.

Таблиця 3.2 – Результати експериментального дослідження осердя АД 4А71В4У3 0,75 кВт

<i>f, Гц</i>	<i>U, мВ без витка</i>	<i>U, мВ з витком</i>
50	1,2	1,2
100	1,8	1,7
150	2,1	2
200	2,15	2,1
250	2,3	2,2
300	2,3	2,25
450	2,35	2,35
500	2,4	2,35
750	2,45	2,35
1000	2,4	2,35
1250	2,4	2,35
1500	2,4	2,35
2000	2,4	2,3
2500	2,4	2,2
3000	2,35	2,1
3500	2,35	2,1
4000	2,35	2
4500	2,3	2
5000	2,3	1,95
10000	2	1,67
20000	1,67	1,43

Графік залежності напруги від частоти для магнітопроводу АД 4A71B4Y3 0,75 кВт показано на рисунку 3.3.

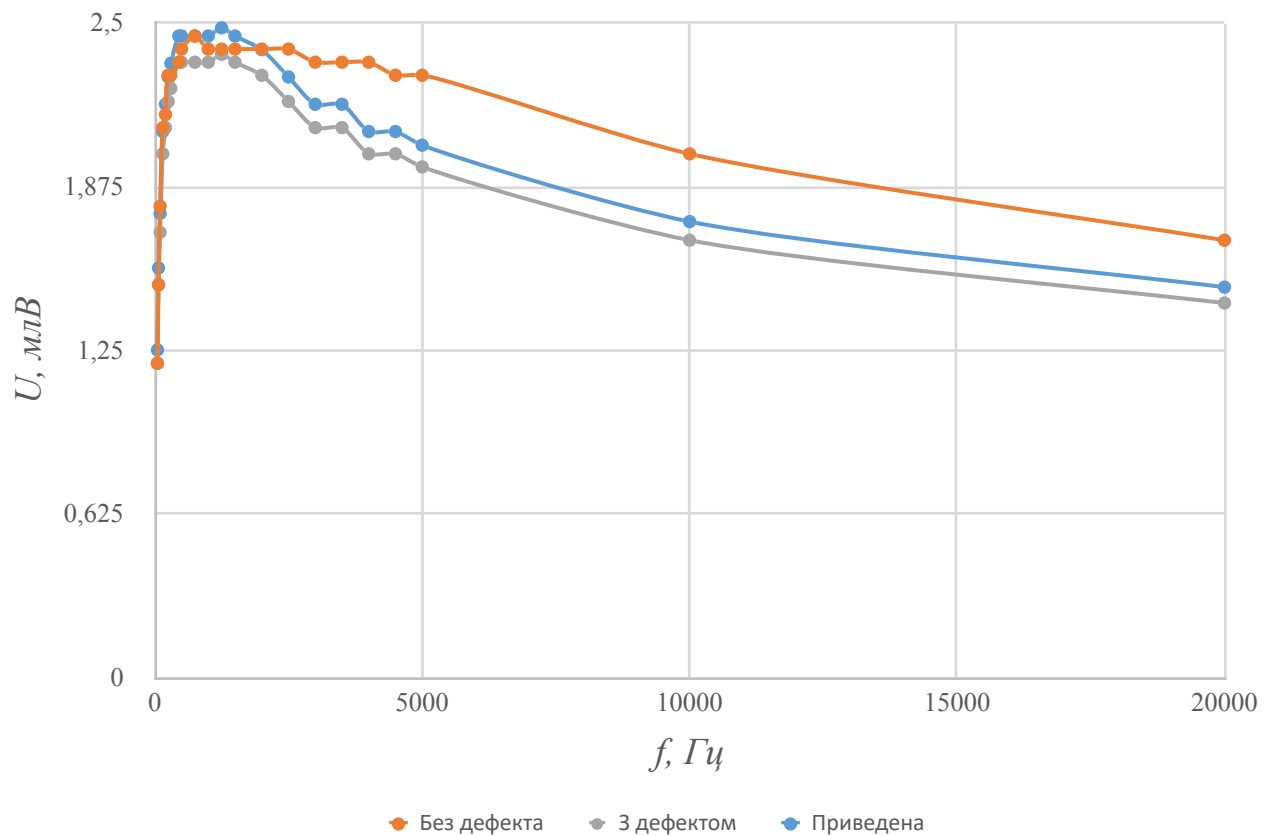


Рисунок 3.3 – Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для магнітопроводу АД серії 4A71B4Y3 0,75 кВт

Кривій для магнітопроводу без дефекту відповідають питомі втрати $5,03 \frac{Вт}{кг}$, а з дефектом - $6,7 \frac{Вт}{кг}$.

Таблиця 3.3 – Результати експериментального дослідження частини осердя АД серії 4A90L2Y3 3 кВт

$f, Гц$	$U, мВ$ без витка	$U, мВ$ з витком
500	10	10
750	9,375	9,25
1000	9	8,75
1250	8,25	8,15
1500	8,25	7,75

2000	7,25	6,875
2500	6,75	6,875

$f, \text{Гц}$	$U, \text{мВ}$ без витка	$U, \text{мВ}$ з витком
3000	6,75	6,5
3500	6,4	6,25
4000	5,9	5,7
4500	5,9	5,7
5000	5,5	5,3
30000	2,25	2,15
50000	1,8	1,75

Графік залежності напруги від частоти для частини магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 3 кВт показано на рисунку 3.4. У цьому випадку не знадобилося робити приведення, оскільки максимальне значення напруги співпадає для обох випадків.

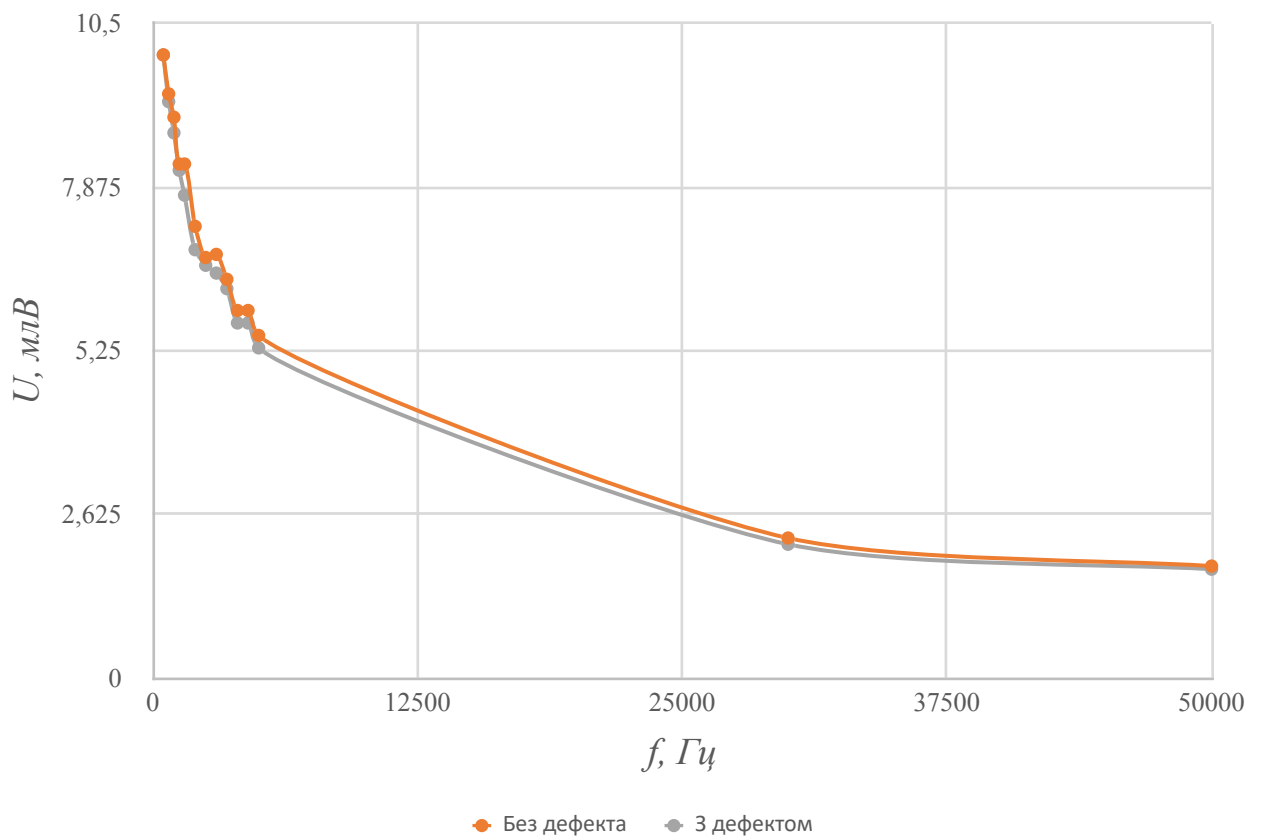


Рисунок 3.4 – Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт

Кривій для магнітопроводу без дефекту відповідають питомі втрати $7,4 \frac{Вт}{кг}$, а з дефектом – $7,85 \frac{Вт}{кг}$.

Таблиця 3.4 – Результати експериментального дослідження осердя АД серії 4А90L2У3 3 кВт

$f, Гц$	$U, мВ$ без витка	$U, мВ$ з витком
500	8,75	8,25
750	8,25	7
1000	7,75	6,625
1250	7,5	6,5
1500	7,25	6,25
2000	6,75	6,25
2500	6,5	6
3000	6	5,5
3500	6,2	5,6
4000	5,9	5,4
4500	5,6	5,6
5000	5,3	4,84
30000	2,84	2,6
50000	2,36	2,2

Графік залежності напруги від частоти для пошкодженої частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт показано на рисунку 3.5.

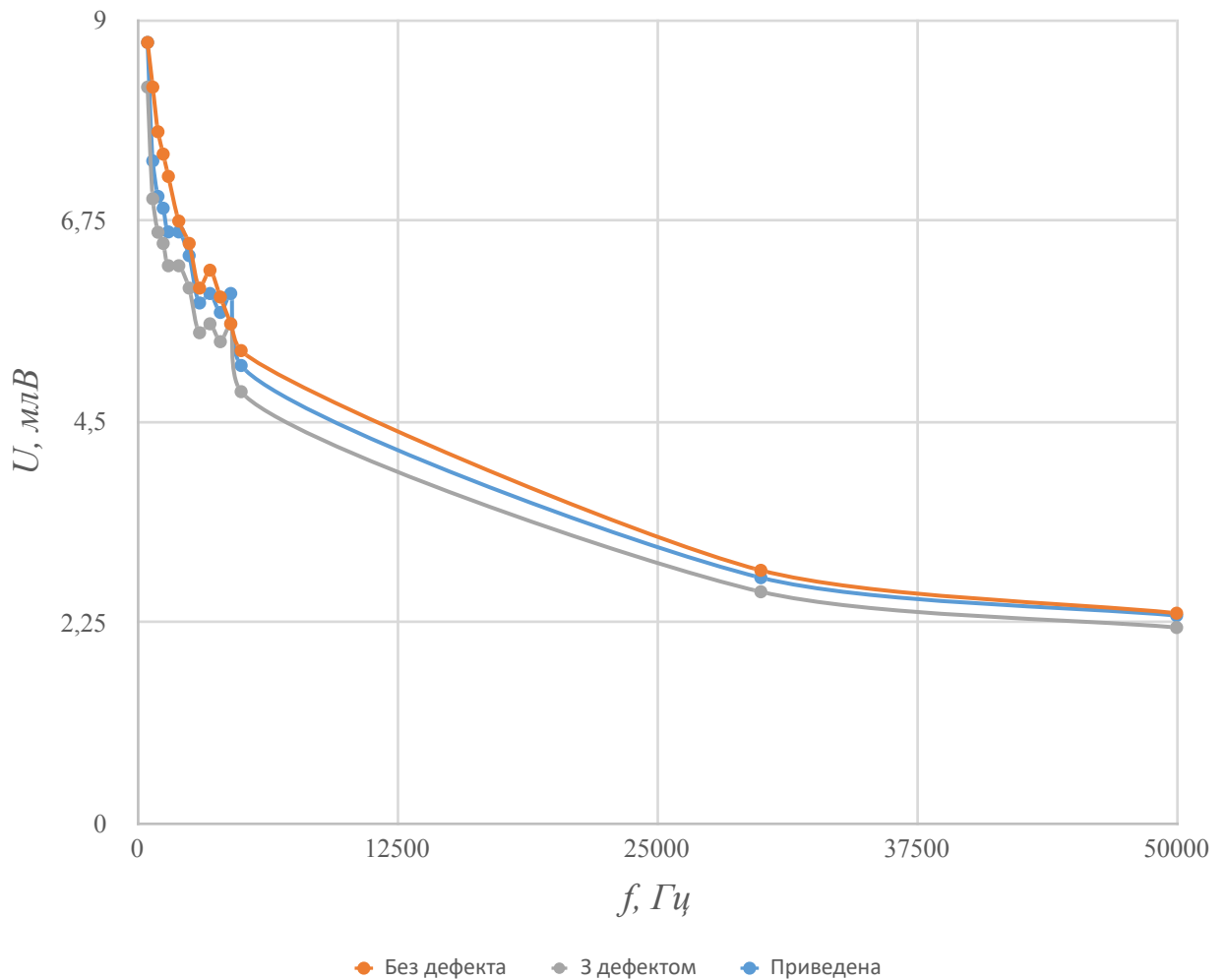


Рисунок 3.5 – Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для пошкодженої частини магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт

Кривій для магнітопроводу без додаткового витка відповідають питомі втрати $8,85 \frac{Вт}{кг}$, а з дефектом – $9,15 \frac{Вт}{кг}$.

Як видно з результатів експериментів, методика підтверджується стосовно того, що магнітопроводи з більшими питомими втратами мають менше значення напруги на вимірювальній обмотці. Для магнітопроводу АД серії 4А90L2У3 3 кВт різниця між випадком без витка та з ним не зовсім наглядна, хоча й результати дослідження третього магнітопроводу підтверджують загальну тенденцію. Оскільки цей магнітопровід навіть без витка має високе значення втрат, то його подальше погіршення не так сильно позначається на результатах, у порівнянні з іншими магнітопроводами.

3.3 Математичний розрахунок значень напруги та втрат для магнітопроводів різного ступеню дефектності

При розрахунку пакету зібраного з листів можна знехтувати взаємодією всіх листів всередині і враховувати лише вплив крайніх листів на їх сусідні листи [70].

В одиниці об'єму пластини відповідатимуть виразу:

$$P = \frac{B_{cp}^2 \gamma \omega^2 b^2}{6} F(\xi) \quad (3.2)$$

де

$$F(\xi) = \frac{3}{\xi} * \frac{sh\xi - \sin\xi}{ch\xi - \cos\xi} \quad (3.3)$$

а

$$\xi = \frac{2b}{a} \quad (3.4)$$

Ця функція представлена на рисунку 3.6.

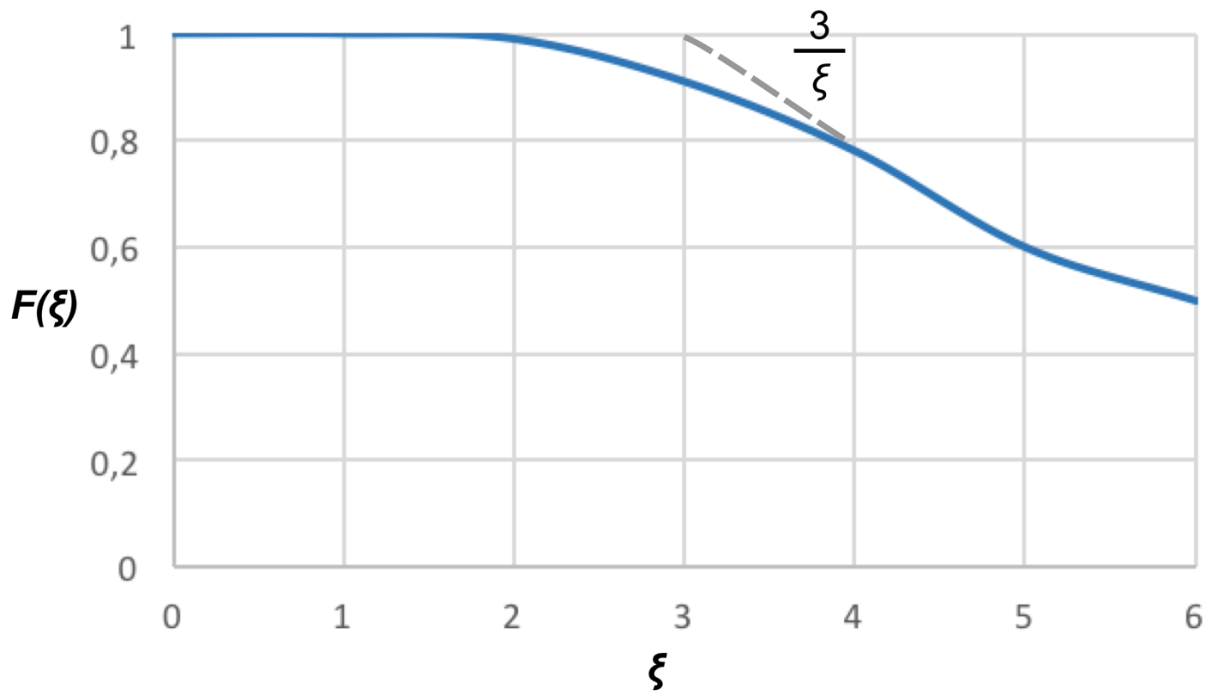


Рисунок 3.6 – Функція $F(\xi)$

Відповідно, у пакеті пластин з об'ємом V втрати на вихрові струми будуть визначатися виразом:

$$P = \frac{1}{6} B_{cp}^2 \gamma \omega^2 b^2 V F(\xi) \quad (3.5)$$

Цікаві обидва крайніх значення функції $F(\xi)$ при малих та великих ξ . Для малих ξ має місце відношення:

$$F(\xi) \approx 1 \quad (3.6)$$

Тож джоулеві втрати можна виразити наступним чином:

$$P = \frac{1}{6} B_{cp}^2 \gamma \omega^2 b^2 V \quad (3.7)$$

З приведеної формули видно, що на низьких частотах втрати пропорційні другій степені частоти і другій степені товщини пластини. Тому зменшуючи товщину пластин втрати в них можна значно знизити. Для великих ξ отримаємо:

$$F(\xi) \approx \frac{3}{\xi} \quad (3.8)$$

Тому втрати на високих частотах при постійній магнітній індукції будуть функцією:

$$b \omega^{\frac{3}{2}} \quad (3.9)$$

Значне ослаблення поля внаслідок дії поверхневого ефекту настає при $\xi = 1$. Частота, яка відповідає цьому значенню ξ при заданій товщині пластини, називається граничною частотою. Для цієї частоти справедливий вираз [72]:

$$f_{ep} = \frac{1}{4\pi\mu\gamma b^2} \quad (3.10)$$

З цього виразу видно, що граничну частоту, з одного боку, можна збільшити зменшенням товщини пластин, а з другого – вибором матеріалу пластини з якомога меншою провідністю.

Приведений вище розрахунок використовується для розрахунку втрат на вихрові струми з врахуванням поверхневого ефекту. Втрати розраховувались для значення індукції 0,001 Тл, що відповідає значенню індукції під час проведення запропонованого методу визначення стану магнітопроводу. Також було розраховано напругу на робочій обмотці за формулою напруги з ватметрового методу. Результати не зовсім відповідають експериментальним даним у тому, що на відміну від експериментів, напруга завжди зростає зі збільшенням частоти. У той час як експерименти показують, що після досягнення максимального значення напруга починає спадати. Відмінність розрахункових даних пояснюється тим, що в них не враховується зменшення індукції зі збільшенням частоти, викликане посиленою дією вихрових струмів, що послаблюють основний магнітний потік і як результат – індукцію. Не було знайдено математичного способу це врахувати. Окрім цього розрахунки вірні і поверхневий ефект враховувався. Слід зазначити, що для зазначення збільшених втрат використовувалося припущення, що це рівносильно збільшенню товщини листа, тож розрахунки були проведені для різних товщин листа.

Таблиця 3.5 – Розрахунки для товщини листа 0,5 мм

$f, \text{Гц}$	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$	$q, \text{см}^2$	$U, \text{В}$
50	0,26	1	1,26625E-06	12,8	0,00028416
300	0,65	1	4,5585E-05	12,8	0,00170496
500	0,83	0,999	0,000126498	12,8	0,0028416
750	1,02	0,998	0,000284336	12,54901961	0,004178824
1000	1,18	0,997	0,00050498	10,84745763	0,004816271

5000	2,63	0,932	0,011801449	4,866920152	0,010804563
------	------	-------	-------------	-------------	-------------

$f, \text{Гц}$	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{\text{Вт}}{\text{кЗ}}$	$q, \text{см}^2$	$U, \text{В}$
10000	3,73	0,793	0,040165447	3,431635389	0,015236461
20000	5,27	0,577	0,116900193	2,428842505	0,021568121
25000	5,89	0,513	0,162396552	2,173174873	0,024122241
50000	8,33	0,36	0,455849972	1,536614646	0,034112845

Таблиця 3.6 – Розрахунки для товщини листа 0,6 мм

$f, \text{Гц}$	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{\text{Вт}}{\text{кЗ}}$	$q, \text{см}^2$	$U, \text{В}$
50	0,3160767	0,9999841	1,82337E-	12,8	0,0002841
300	0,7742267	0,9994301	6,5605E-0	12,8	0,0017049
500	0,9995223	0,9984197	0,0001820	12,8	0,0028416
750	1,2241599	0,9964554	0,0004088	10,456150	0,0034818
1 0 0	1,4135381	0,9937261	0,0007247	9,0552917	0,0040205
5 0 0	3,1607673	0,8733680	0,0159249	4,0496495	0,0089902
1 0 0	4,47	0,6821314	0,0497519	2,8635346	0,0127140
2 0 0	6,3215346	0,4762102	0,1389314	2,0248247	0,0179804
2 5 0	7,0676905	0,4244670	0,1934933	1,8110583	0,0201027
5 0 0	9,9952238	0,3001350	0,5472662	1,2806116	0,0284295

Таблиця 3.7 – Розрахунки для товщини листа 0,75 мм

$f, \text{Гц}$	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{\text{Вт}}{\text{кЗ}}$	$q, \text{см}^2$	$U, \text{В}$
50	0,3950959	0,9999613	2,84895E-	12,8	0,0002841
300	0,9677833	0,9986106	0,0001024	12,8	0,0017049
500	1,2494029	0,9961558	0,0002838	10,244893	0,0022743
750	1,5301998	0,9914161	0,0006355	8,3649201	0,0027855
100	1,7669226	0,9849001	0,0011224	7,2442333	0,0032164

Продовження таблиці 3.7

f , Гц	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{Вт}{кЗ}$	$q, см^2$	$U, В$
5 0 0	3,9509591	0,7597262	0,0216450	3,2397196	0,0071921
1 0 0	5,5875	0,5425936	0,0618353	2,2908277	0,0101712
2 0 0	7,9019182	0,3793604	0,1729314	1,6198598	0,0143843
2 5 0	8,8346132	0,3394362	0,2417687	1,4488466	0,0160821
5 0 0	12,494029	0,2401166	0,6841071	1,0244893	0,0227436

Таблиця 3.8 – Розрахунки для товщини листа 0,85 мм

f , Гц	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{Вт}{кЗ}$	$q, см^2$	$U, В$
50	0,4477753	0,9999361	3,65923E-	12,8	0,0002841
300	1,0968211	0,9977111	0,0001314	11,670088	0,0015544
500	1,4159900	0,9936829	0,0003636	9,0396115	0,0020067
750	1,7342265	0,9859628	0,0008118	7,3808119	0,0024578
1 0 0	2,0025123	0,9754707	0,0014278	6,3919706	0,0028380
5 0 0	4,4777536	0,6810110	0,0249213	2,8585761	0,0063460
1 0 0	6,3325	0,4753484	0,0695807	2,0213185	0,0089746
2 0 0	8,9555073	0,3348732	0,1960729	1,4292880	0,0126920
2 5 0	10,012561	0,2996161	0,2741085	1,2783941	0,0141901
5 0 0	14,159900	0,2118655	0,7753141	0,9039611	0,0200679

Таблиця 3.9 – Розрахунки для товщини листа 1 мм

f , Гц	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{Вт}{кЗ}$	$q, см^2$	$U, В$
50	0,5267945	0,9998777	5,06438E-	12,8	0,0002841
3 0	1,2903778	0,9956298	0,0001815	9,9195750	0,0013212

f , Гц	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{Bm}{кг}$	$q, см^2$	$U, В$
500	1,6658706	0,9880088	0,0005004	7,6836698	0,0017057
750	2,0402665	0,9736476	0,0011095	6,2736901	0,0020891
1 0 0	2,3558968	0,9546280	0,0019340	5,4331750	0,0024123
5 0 0	5,2679455	0,5775792	0,0292543	2,4297897	0,0053941
1 0 0	7,45	0,4024376	0,0815338	1,7181208	0,0076284
2 0 0	10,535891	0,2847478	0,2307596	1,2148948	0,0107882
2 5 0	11,779484	0,2546855	0,3224956	1,0866350	0,0120616
5 0 0	16,658706	0,1800860	0,9121356	0,7683669	0,0170577

Таблиця 3.10 – Розрахунки для товщини листа 2 мм

f , Гц	ξ	$f(\xi)$	$\rho, \frac{Bm}{кг}$	$q, см^2$	$U, В$
50	1,0535891	0,9980501	2,02205E-	12,148948	0,0002697
300	2,5807557	0,9366699	0,0006831	4,9597875	0,0006606
500	3,3317412	0,8506621	0,0017234	3,8418349	0,0008528
750	4,0805330	0,7400540	0,0033735	3,1368450	0,0010445
1 0 0	4,7117937	0,6480356	0,0052516	2,7165875	0,0012061
5 0 0	10,535891	0,2847478	0,0576899	1,2148948	0,0026970
1 0 0	14,9	0,2013420	0,1631676	0,8590604	0,0038142
2 0 0	21,071782	0,1423704	0,4615081	0,6074474	0,0053941
2 5 0	23,558968	0,1273400	0,6449772	0,5433175	0,0060308
5 0 0	33,317412	0,0900430	1,8242711	0,3841834	0,0085288

Товщини використані для розрахунку та значення питомих втрат на вихрові струми при такій товщині листа зазначено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Відповідність між товщинами листів та питомими втратами на вихрові струми

$d, \text{мм}$	$\rho, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$
0,5	0,94
0,6	1,35
0,75	2,11
0,85	2,71
1	3,75
2	14,96

Розрахунки були проведені для всіх магнітопроводів, проте через великий масштаб графіків різниці між різними осердями не видно, тому буде представлено графіки лише для одного магнітопроводу. На рисунку 3.7 графік залежності питомих втрат від частоти для магнітопроводів з різним ступенем дефектності. На рисунку 3.8 графік залежності напруги на вимірювальній обмотці від частоти для магнітопроводів з різним ступенем дефектності.

Як видно з графіків, розрахунки підтверджують експериментальні дані стосовно того, що в магнітопроводу з більшими втратами відповідає менше значення напруги.

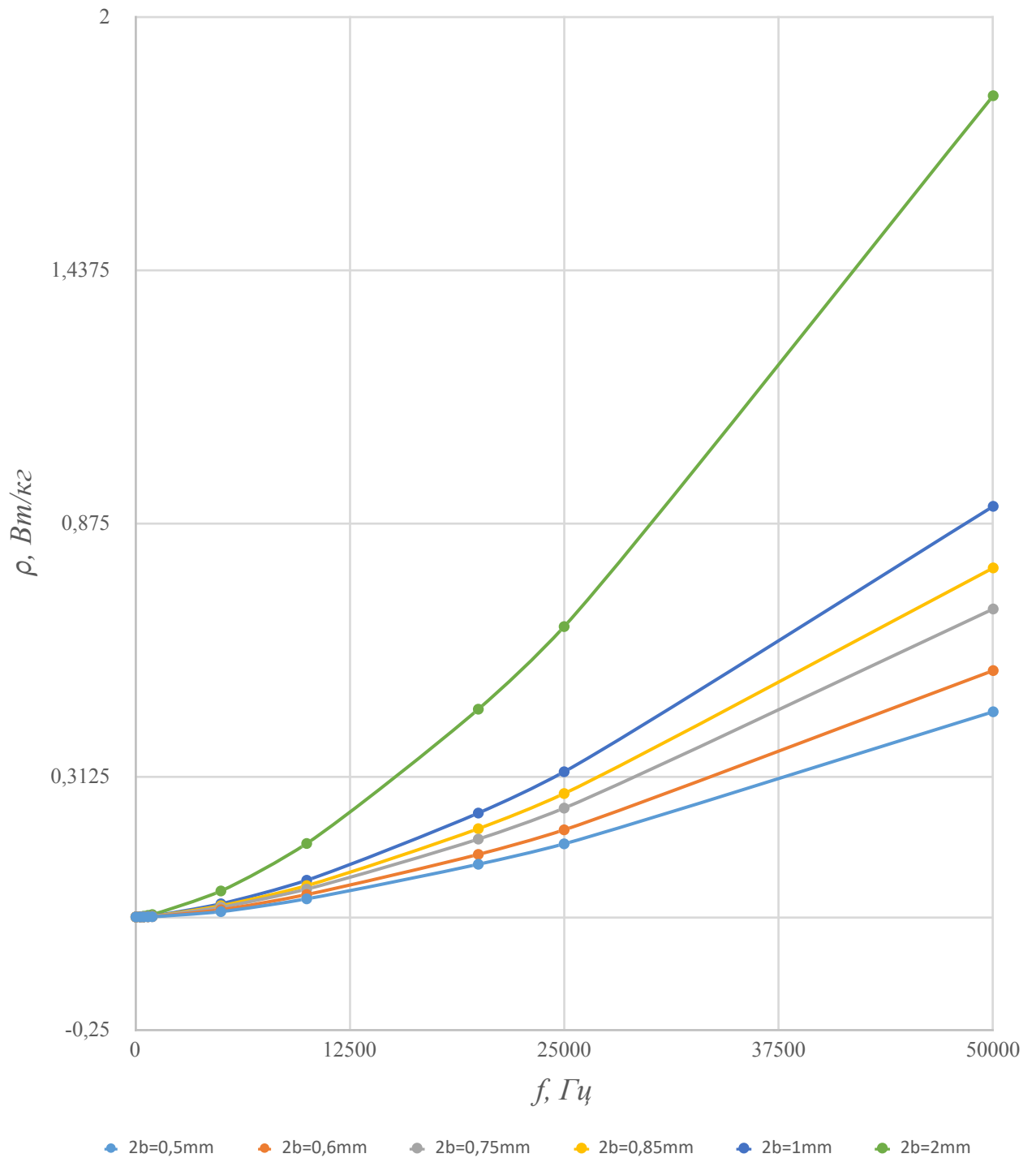


Рисунок 3.7 – Графік залежності питомих втрат від частоти для магнітопроводів з різним ступенем дефектності

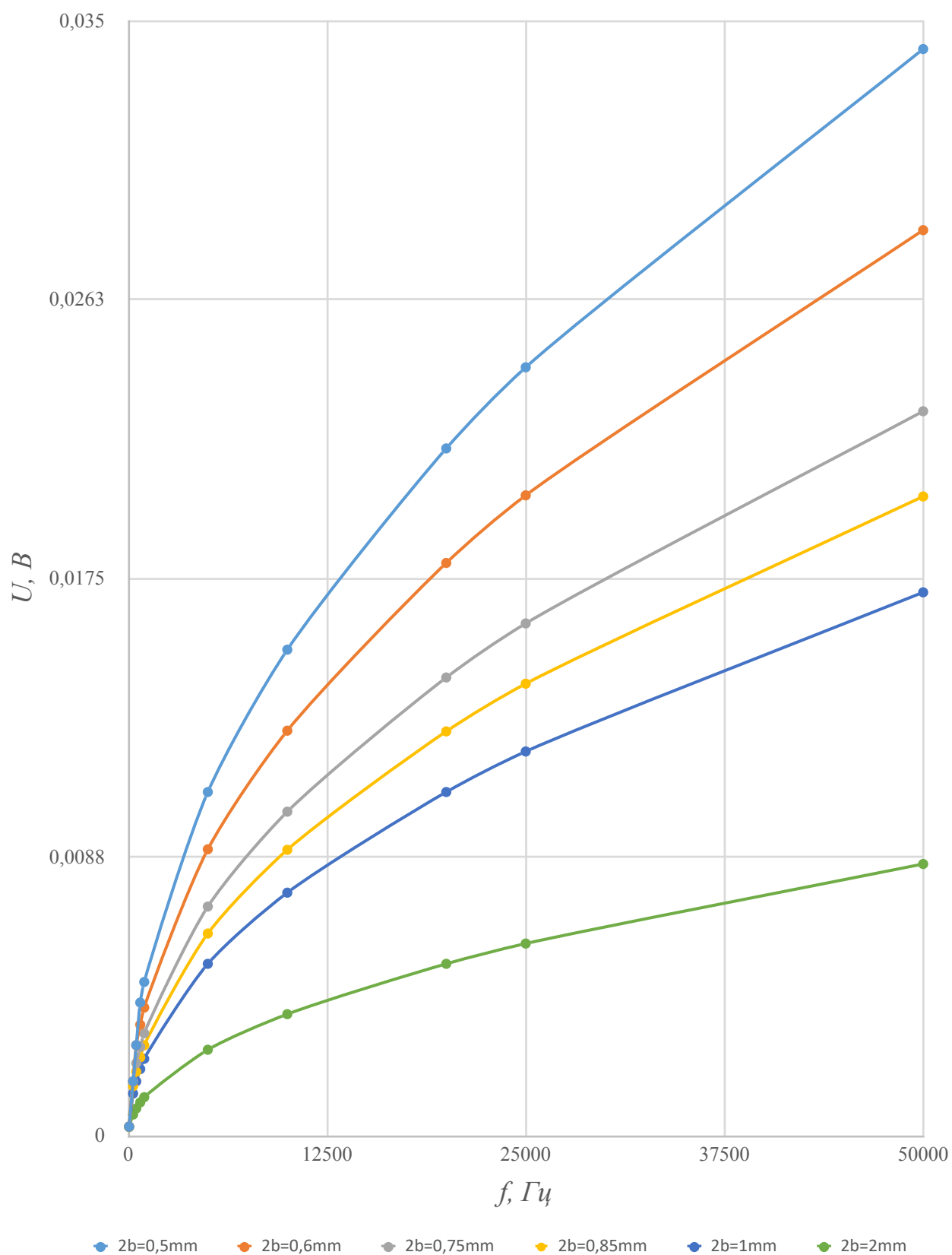


Рисунок 3.8 – Графік залежності питомих втрат від частоти для магнітопроводів з різним ступенем дефектності

3.4 Аналіз експериментів та розрахунків

Як зазначалось вище, і експерименти, і розрахунки підтверджують вірність тверджень, що використовуються у методиці і є її основою – у більш дефектного магнітопроводу буде наводитись менше значення напруги на вимірювальній обмотці.

Тепер необхідно обрати точки для розрахунку відношення, на основі значення якого буде прийматись рішення, щодо стану магнітопроводу. Оскільки розрахункові значення не повністю відображають фізичну картину всіх процесів, що відбуваються їх не можна використовувати для вирішення які саме точки краще вибрати. Тому це рішення буде прийнято на основі експериментальних даних. Проаналізувавши відношення значень напруги при різних частотах для всіх магнітопроводах, було прийнято два значення частоти – 1 кГц та 10 кГц. Де точка 1 кГц буде відповідати більшому значенню напруги, а точка 10 кГц – меншому. Пропонується робити відношення меншого до більшого, хоча це не принципово. У таблиці 3.12 представлені значення цього відношення для різних значень питомих втрат у різних магнітопроводах.

Таблиця 3.12 – Значення відношення напруг та відповідні питомі втрати

$\rho, \frac{Вт}{кг}$	k
3,92	0,91
5,85	0,86
5,03	0,83
6,7	0,71
7,4	0,56
7,85	0,54
8,85	0,49
9,15	0,48

На рисунку 3.9 зображено графік залежності відношення напруг від якості магнітопроводу, де під якістю мається на увазі відношення ідеального значення питомих втрат у сталі до реального значення питомих втрат.

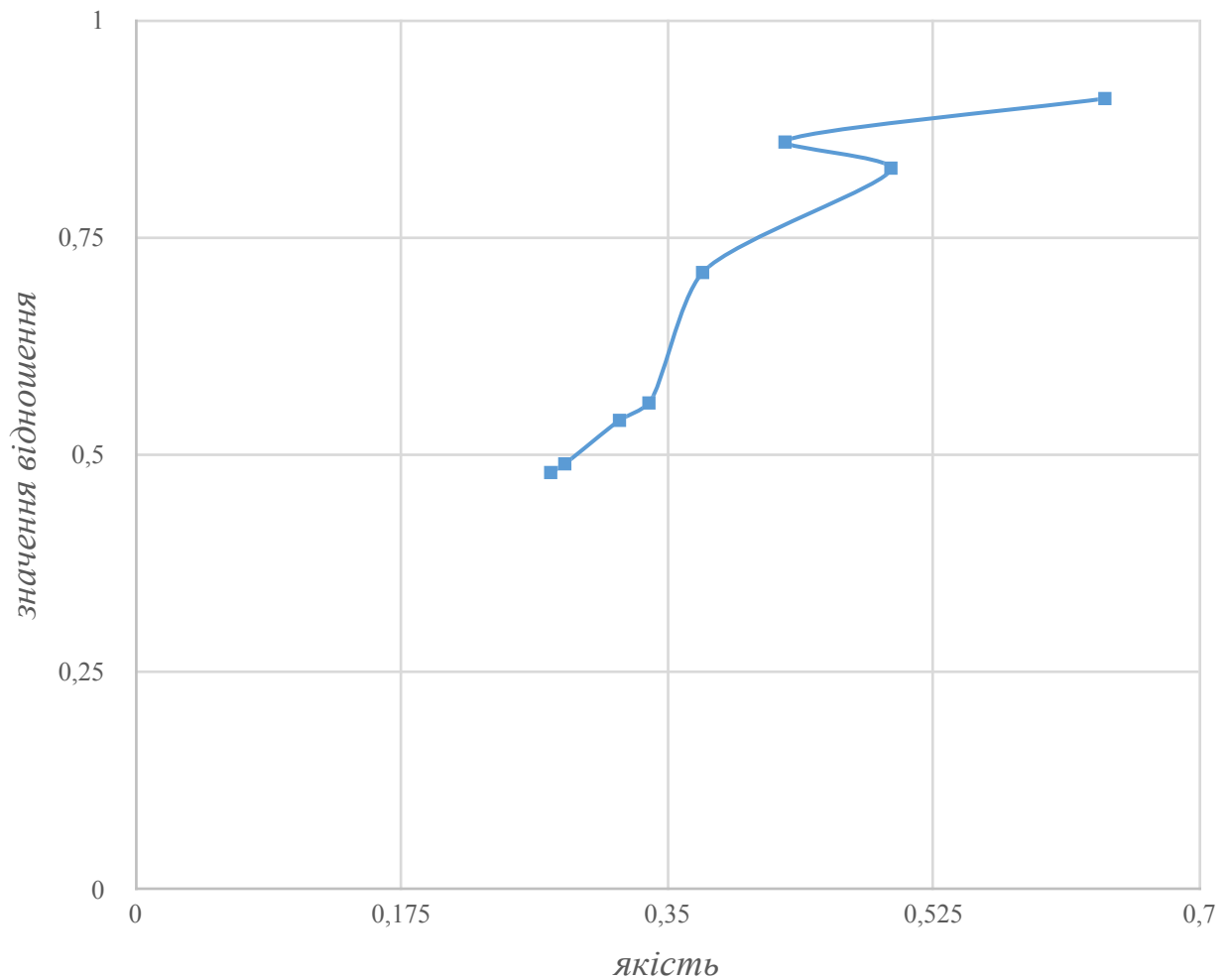


Рисунок 3.9 – Залежність значення відношення напруг від якості магнітопроводу

З таблиці 3.12 та рисунку 3.9 видно, що в цілому значення коефіцієнта менше для більшого значення втрат. Щодо певних неточностей, то збільшення питомих втрат шляхом намотування витка є певним припущенням і це може давати такі результати, до того ж при експериментах на високій частоті та за таких малих значень напруги дуже важливу роль грають контактні з'єднання, що теж вносить певні неточності.

Висновок до розділу 3

У розділі було запропоновано нові метод та методику. Метод ґрунтується на високочастотних вимірах, впливу вихрових струмів на основний магнітний потік та поверхневому ефекті. Методика на основі цього методу підтверджується проведеними експериментами та розрахунками.

Були проведені експерименти, з використанням запропонованої методики, з визначення напруги на вимірювальній обмотці в діапазоні частот 50 Г – 20 кГц. Результати відповідають теоретичному аналізу. На основі експериментів було обрано дві точки для визначення відношення, на основі якого приймається рішення щодо стану магнітопроводу - це 1 кГц та 10 кГц. Значення відношення, якщо використовувати відношення значення напруги при 10 кГц до значення напруги при 1 кГц, в межах 0,99 – 0,65 відповідає

втратам $2 - 6 \frac{Bm}{k\omega}$, що є припустимими значеннями. Значенню відношення в

межах 0,64 – 0,5 та менше відповідає втратам більше $6 \frac{Bm}{k\omega}$, що вже є досить

великим значенням і використовувати такий магнітопровід не варто.

Математичні розрахунки підтвердили основну залежність на якій ґрунтується методика, хоча й мають результати, які не повним чином відповідають експериментальним значенням, що обумовлене певними спрощеннями при розрахунках у тому, що не враховується зменшення значення індукції зі збільшенням частоти і, як результат, вихрових втрат.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. Проведення маркетингового аналізу передбачає виконання нижченаведених кроків.

4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Виготовлення приладу, що реалізує запропоновану в роботі методику	1) Ремонті цехи, ремонтні підприємства 2) дослідники 3) власники ЕМ	1) Підвищення рівня післяремонтної надійності 2) Економія часу 3) Передчасне виявлення проблемних магнітопроводів і попередження відказів по причині сталі магнітопроводу

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї - відносно дешевий та надійний прилад для визначення стану міжлистової ізоляції магнітопроводу. Конкурентами для такої ідеї є інші відомі методи визначення стану міжлистової ізоляції магнітопроводу. Сильною стороною ідеї є швидкість і як результат дешевизна. Слабкою стороною ідеї є те, що галузі де може бути корисним прилад зараз переживають не найкращі часи, а також, прилад не дає кількісний результат стосовно якості в загально прийнятих величинах, а вигляді відношення, що рівносильно якісній оцінці, що не завжди є корисним.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для виготовлення ідеї проекту необхідно розробити принципову схему приладу, на основі якої можна буде почати виготовлення. Для виготовлення приладу за наявності схеми необхідно мати кваліфікований персонал зі збору електроніки та запчастини. Орієнтовані запчастини, які вірогідно будуть необхідними є легкодоступними як на українському ринку, так і на закордонних, серед яких слід виділити Китай, через найкращі цінові пропозиції. Процес збірки не потребує дорогого спеціалізованого обладнання і є цілком доступним.

Тож виготовлення такого приладу є цілком можливим та доступним.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартаппроекту

Даних по існуючих конкурентах не було знайдено, що може свідчити про наявний не зайнятий напрямок бізнесу, хоча ще це може свідчити, про низьку потребу у продукті такого роду.

Далі необхідно створити характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту:

Потреба, що формує ринок – визначення стану магнітопроводу ЕМ;

Цільова аудиторія – ремонті цехи заводів та ремонтні підприємства, дослідники, власники ЕМ.

Вимоги споживачів до товару – правдивість результатів, простота використання приладу, надійність, високий строк служби.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач.

Таблиця 4.2 – Маркетингова концепція товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	К л ю ч о в і переваги
Визначення с т а н у магнітопроводу ЕМ	Економія часу, спрощення процесу визначення якості магнітопроводу, Передчасне виявлення проблемних магнітопроводів і попередження відказів по причині сталі магнітопроводу	Швидкість, простота

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на прилад. Після врахування цін на розхідні матеріали, робітників, приміщення та резерв було прийнято рішення робити ціну в межах 150% – 180% від повної ціни комплектуючих, що дозволить при продажах не менше 200 приладів в місяць давати прибуток.

Оптимальною системою збуту є оптові продажі на заводи та підприємства. Необхідно створити сайт компанії та спробувати запропонувати прилад на існуючі підприємства та заводи України та сусідніх країн.

Висновок до розділу 4

Стартап-проект має гарні перспективи для створення та розвитку, оскільки не було знайдено конкурентів, хоча це може бути причиною низького попиту на такого роду товар. Для безпечного входу в бізнес спочатку пропонується провести дослідження ринку шляхом налагодження контакту з деякими потенційними клієнтами та збору статистичних даних щодо зацікавленості чи не зацікавленості в потенційному товарі.

ВИСНОВКИ

У роботі було проведено та проаналізовано різні методи визначення якості міжлистової ізоляції магнітопроводів електричних машин на прикладі магнітопроводів АД серій 4АА63В4У3 0,37 кВт, 4А71В4У3 0,75 кВт, 4А100Л6У3 2,2 кВт, 4А90Л2У3 3 кВт.

Для досягнення поставленої мети було спочатку було визначено питомі втрати у п'ятьох магнітопроводах для визначення їх реального стану, шляхом ватметрового методу, результати представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Питомі втрати досліджуваних магнітопроводів

Магнітопровід від АД серії	ρ , $\frac{Вт}{кг}$
4АА63В4У3 0,37 кВт	3,15
4А71В4У3 0,75 кВт	5,03
4А100Л6У3 2.2 кВт	5,04
Хороша частина 4А90Л2У3 3 кВт	7,4
Зіпсована частина 4А90Л2У3 3 кВт	8,85

Також під час цих дослідів використовувалось фізичне моделювання наявності інтегральних дефектів у спинці магнітопроводу шляхом намотування провідника вздовж пазів на спинку магнітопровід та замикання його кінців на вольтметр. Результати визначення питомих втрат з використанням фізичного моделювання представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Питомі втрати досліджуваних магнітопроводів за наявності змодельованого дефекту

Магнітопровід від АД серії	ρ , $\frac{Вт}{кг}$
4АА63В4У3 0,37 кВт	5,85
4А71В4У3 0,75 кВт	6,7
4А100Л6У3 2.2 кВт	7,06

Хороша частина 4A90L2Y3 3 кВт	7,85
Зіпсована частина 4A90L2Y3 3 кВт	9,15

Такий спосіб моделювання є досить спрощеним і не повністю відповідає фізичній картині при наявності дефектів, проте в цілому він схожий на наявність інтегрального дефекту. Це дозволило збільшити кількість вхідної інформації у два рази. Це рівносильно випадку, коли б у нас було 5 умовно якісних магнітопроводи та 5 магнітопроводи тих самих серій, але в гіршому стані.

Ще було проведено ватметровий метод на частотах відмінних від 50 Гц та на різних значеннях індукції. На основі результатів цих експериментів було проведено математичний розподіл втрат методом Джордана, що показав – погіршення стану міжлистової ізоляції призводить до сильного збільшення саме складової втрат на вихрові струми, рисунок 1 та рисунок 2.

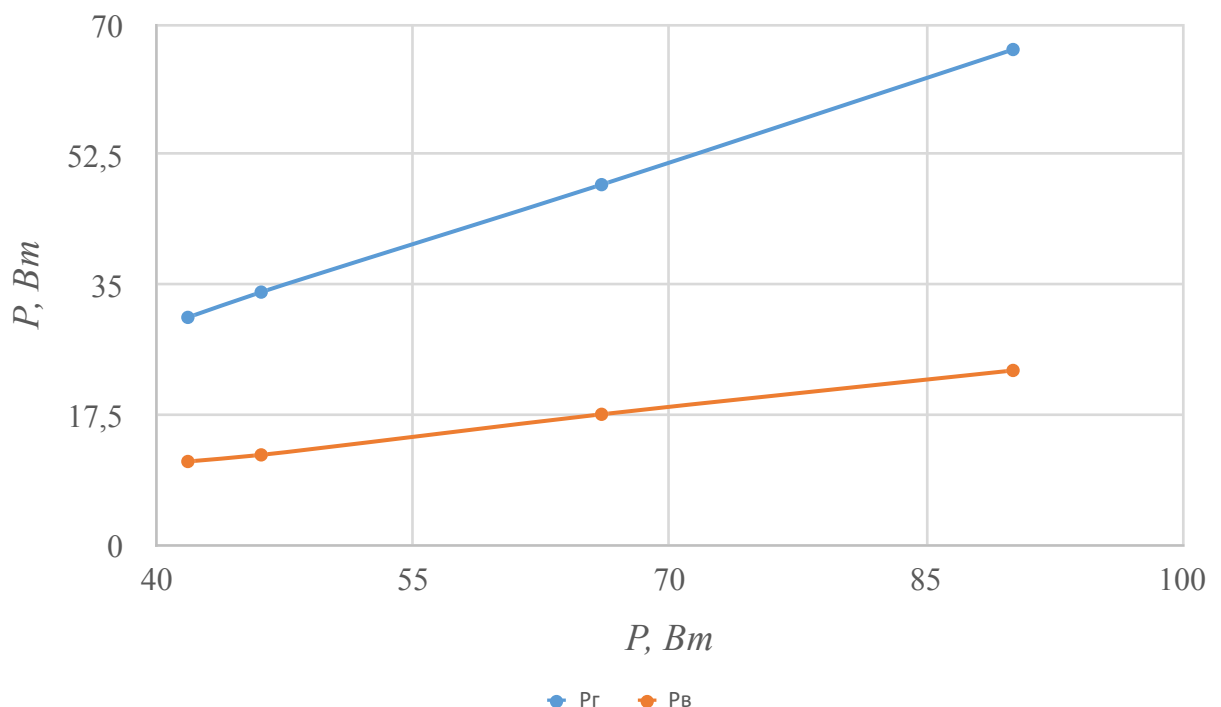


Рисунок 1 – Графік залежності величини втрат кожної з двох складових втрат від повного значення втрат у нормальному магнітопроводі

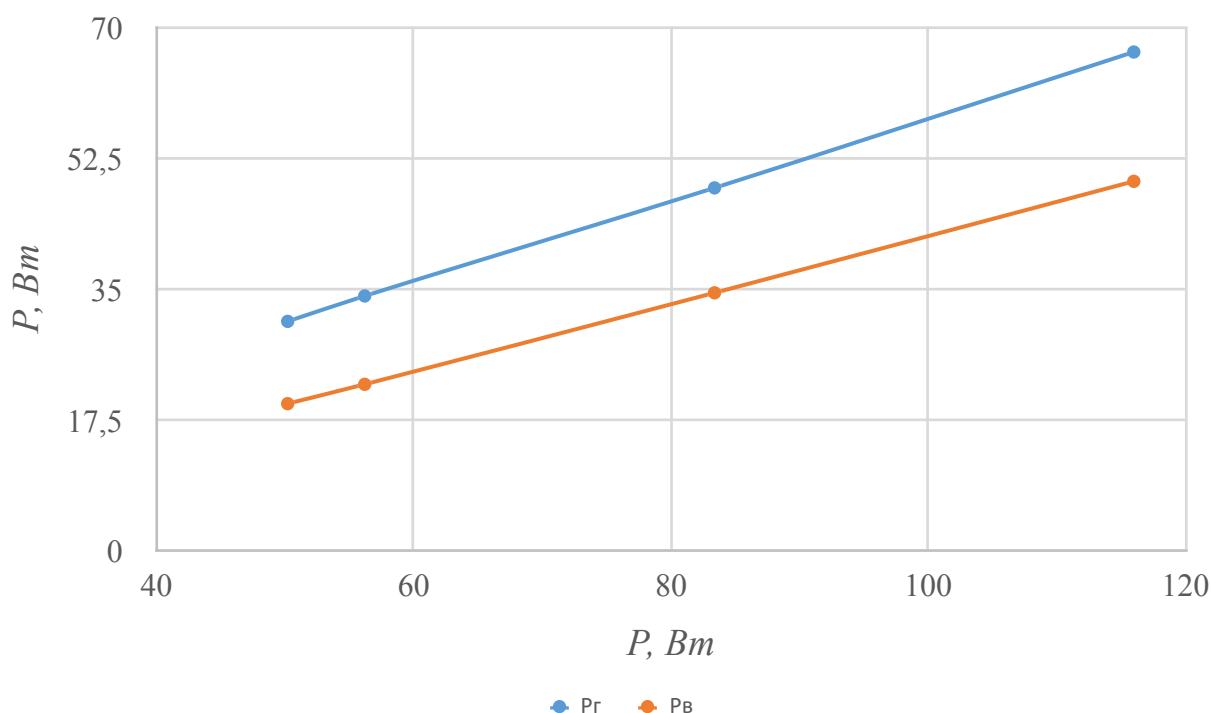


Рисунок 2 – Графік залежності величини втрат кожної з двох складових втрат від повного значення втрат у дефектному магнітопроводі

У математичному пакеті COMSOL Multiphysics на базі готової розрахункової моделі було розраховано розподілення магнітної індукції у трьох досліджуваних магнітопроводах АД серій 4AA63B4Y3 0,37 кВт, 4A71B4Y3 0,75 кВт, 4A90L2Y3 3 кВт під час дослідження ватметровим методом. Результати розрахунку підтвердили математичний апарат використаний при розрахунку питомих втрат ватметровим методом.

Після чого було проведено експеримент неробочого ходу зібраної ЕМ з один з досліджуваних магнітопроводів, таблиця 3.

Таблиця 3 – Значення основних втрат в сталі в зібраній ЕМ

Джерело значення та стан магнітопроводу	Значення основних втрат в сталі, Вт
Розрахунок, для ідеального стану магнітопроводу	73,75
Розрахунок, для досліджуваного магнітопроводу	149,06

Експеримент, для досліджуваного магнітопроводу	184
--	-----

Експеримент показав і довів, що питомі втрати в сталі магнітопроводу на пряму впливають на основні втрати в сталі зібраної електричної машини.

Враховуючи факт того, що втрати на вихрові струми мають квадратичну залежність від частоти і що саме вони збільшуються при дефектах, було запропоновано новий метод дослідження стану міжлистової ізоляції магнітопроводу.

Суть запропонованого методу полягає у використанні високочастотних впливів на досліджуваний магнітопровід. Для цього на нього намотується один або декілька витків робочої обмотки, кінці якої підключаються до генератора високих частот, та один виток вимірювальної обмотки, який підключається до вольтметра. При такій схемі магнітопровід виступає як трансформатор.

На частотах вище промислової дія вихрових струмів проявляється сильніше через квадратичну залежність від частоти, а також через дію ефекту витіснення – струми будуть концентруватись біля країв листа і дія полів цих струмів буде сильнішою.

На основі готової математичної моделі в COMSOL Multiphysics було розраховано розподіл індукції по товщині листа при різних частотах живлення, що відображає і підтверджує дію поверхневого ефекту .

Кожен контур вихрових струмів створює своє поле, ці поля направлені проти основного магнітного поля, тому вони його послаблюють. Це ослаблення поля призводить до того, що у дефектному магнітопроводі на вимірювальній обмотці буде наведене менше значення напруги.

Різницю добре видно, якщо порівнювати два магнітопроводи. Проте в житті дуже рідко трапляється випадок що в наявності є еталонний магнітопровід від двигуна необхідної серії. Тому пропонується використовувати не порівняння з еталонним магнітопроводом, а визначати відношення між значеннями напруги у двох точках – 1 кГц і 10 кГц.

При збільшенні частоти діють дві протилежні тенденції – збільшення частоти, що призводить до збільшення втрат, та починає проявлятися поверхневий ефект, що зменшує активний переріз і призводить до зменшення втрат. Через це просто взяти дві довільні точки не дуже хороша ідея, оскільки різниця між значеннями напруги в магнітопроводах різного ступеню дефектності може бути невеликою. Тому для отримання найбільш наглядного результату на основі експериментальних даних було обрано саме ці точки.

У точці 1 кГц значення напруги буде більше тому пропонується брати відношення напруги на 10 кГц до напруги при 1 кГц. Таким чином чим менше значення цього відношення тим гірший стан магнітопроводу. Так при значенні відношення 0.99 – 0.65 магнітопровід можна вважати придатним для використання. Хоча при значеннях менше 0.8 варто змінювати паспортні дані задля зменшення номінальної потужності. Використовувати магнітопроводи з відношенням менше 0.65 не рекомендується. У таблиці 4 наведено результати дослідження запропонованим методом.

Таблиця 4 – Результати експериментів з використанням запропонованої методики

$\rho, \frac{Вт}{кг}$	k
3,92	0,91
5,85	0,86
5,03	0,83
6,7	0,71
7,4	0,56
7,85	0,54
8,85	0,49
9,15	0,48

Також було проведено розрахунок втрат та напруги під час частотного методу для перевірки вірності методу і отриманих результатів. Розрахунки

були проведені для різної товщини листа сталі, що є аналогом збільшення втрат хоча й з певним допущенням. Результати представлено на рисунку 3 та рисунку 4.

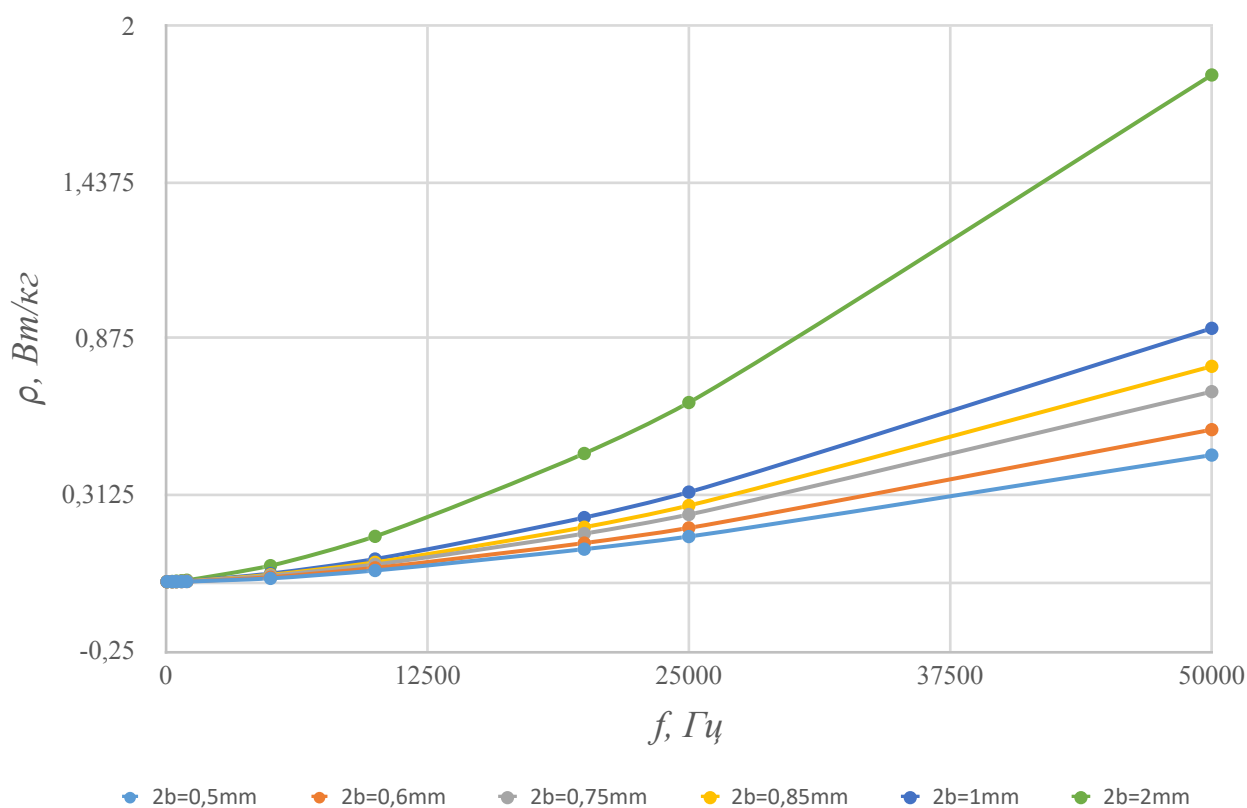


Рисунок 3 – Графік залежності питомих втрат від частоти для магнітопроводів з різним ступенем дефектності

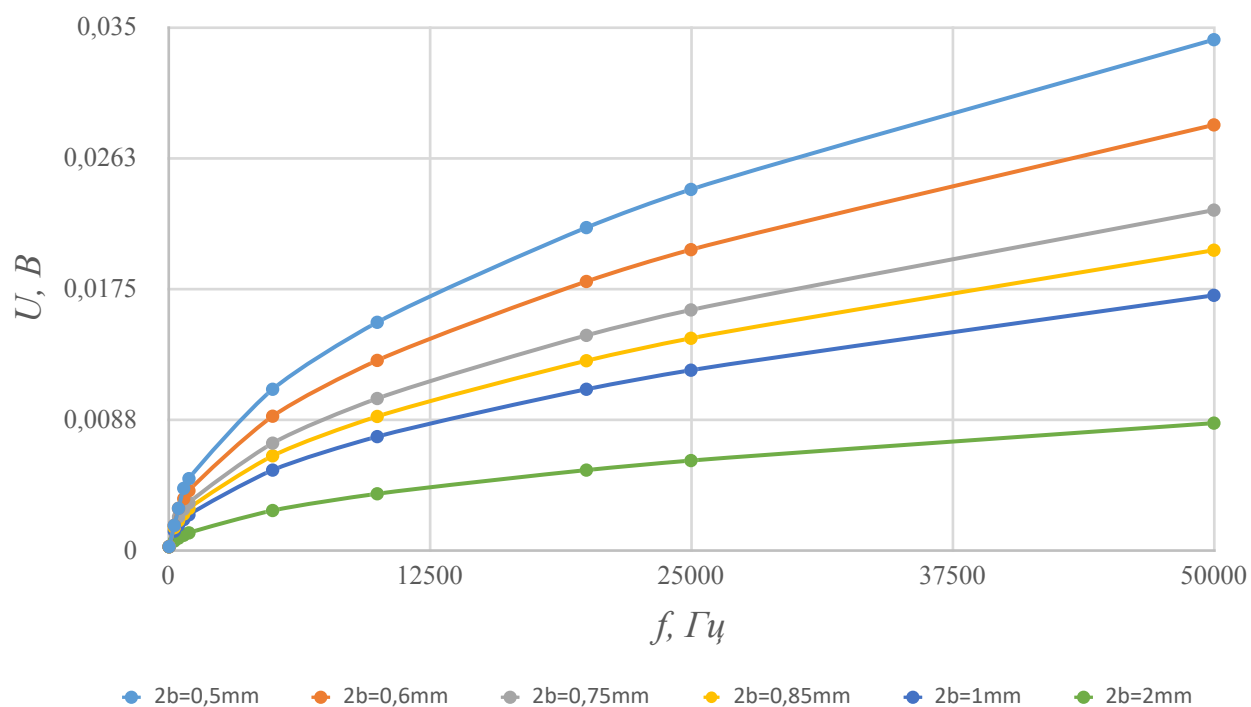


Рисунок 4 – Графік залежності питомих втрат від частоти для
магнітопроводів з різним ступенем дефектності

Результати розрахунків не повністю відповідають експериментальним даним, оскільки при розрахунку враховується лише дія поверхневого ефекту на втрати від вихрові струми, хоча він також діє на магнітне поле і як результат – магнітну індукцію, що використовується в розрахунках. Незважаючи на це, основна ідея на якій ґрунтується запропонований метод підтверджується – у більш дефектних магнітопроводах значення втрат на вихрові струми більше, а значення напруги на вимірювальній обмотці менше в порівнянні з нормальним магнітопроводом.

На основі результатів експериментів та розрахунків можна зробити висновок, що запропонований метод підтверджено і він справджується, а методика працює. Тому мету роботи можна вважати досягнутою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. V. J. Thottuvelil T.G. Wilson, and HA Owen Jr, “High-frequency measurement techniques for magnetic cores,” *Power Electron. IEEE Trans.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–53, 1990.
2. M. Mu, Q. Li, D. J. Gilham, F. C. Lee, and K. D. T. Ngo, “New Core Loss Measurement Method for High-Frequency Magnetic Materials,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4374–4381, Aug. 2014.
3. H. Kosai, Z. Turgut, and J. Scofield, “Experimental Investigation of DC-Bias Related Core Losses in a Boost Inductor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 4168–4171, Jul. 2013.
4. B. Carsten, “Why the Magnetics Designer Should Measure Core Loss; with a Survey of Loss Measurement Techniques and a Low Cost, High Accuracy Alternative,” in *Proc. Power Convers. Intell. Motion*, pp. 163–179, 1995.
5. J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, A. Ecklebe, J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, “Core losses under the DC bias condition based on steinmetz parameters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 953–963, Feb. 2012.
6. B. Tekgun, Y. Sozer, and I. Tsukerman, “Measurement of core losses in electrical steel in the saturation region under DC bias conditions,” *IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 276–282, 2015.
8. Magnetic Materials—Part 2: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Strip and Sheet by Means of an Epstein Frame, IEC 60404-2, 2008.
9. Magnetic Materials—Part 4: Part 4: Methods of measurement of D.C. magnetic properties of magnetically soft materials, IEC 60404-4, 2008.
10. Magnetic Materials—Part 3: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Strip and Sheet by Means of a Single Sheet Tester, IEC 60404-3, 2010.
10. T. Nakata, M. Nakano, and K. Kawahara, “Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 7, no. 6, pp. 453–457, 1992.

11. L. T. Mthombeni, P. Pillay, S. S. Member, P. Pillay, and S. S. Member, "Core Losses in Motor Laminations Exposed to High-Frequency or Nonsinusoidal Excitation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 5, pp. 1325–1332, Sep. 2004.
12. S. Sprague, "Lamination steels," South Dartmouth, MA, 2007.
13. M. Ibrahim and P. Pillay, "Novel equipment for the measurement of core losses in laminations for advanced machines," 2011 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2011, pp. 1231–1236, 2011.
14. V. C. Valchev and A. Van Den Bossche, Inductors and Transformers for Power Electronics. 2005.
15. A. Bousbaine, W. F. Low, and M. McCormick, "Novel approach to the measurement of iron and stray load losses in induction motors," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 143, no. 1, pp. 78–86, 1996. ID: 1.
16. D. R. Turner, K. J. Binns, B. N. Shamsadeen, and D. F. Warne, "Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter," IEE Proceedings B Electric Power Applications, vol. 138, no. 5, pp. 233–242, 1991. ID: 1.
17. Deepak Singh, "Calorimetric Measurement of the Stator Core Losses Caused by Manufacturing", Espoo 21.11.2011.
18. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. - Киев: Техника, 1983. - 200 с.
19. Харлан Г.Д., Перельман Р.З. и др. Изменение магнитных свойств стали при изготовлении сердечников статоров асинхронных двигателей.
20. J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova', Design of rotating electrical machines. Chichester: Wiley, 2008.
21. C. Steinmetz, "On the law of hysteresis (originally published in 1892)," Proceedings of the IEEE, vol. 72, no. 2, pp. 197–221, 1984.
22. P. Beckley, Electrical steels for rotating machines. IEE power and energy series, Institution of Electrical Engineers, 2002.

23. T. Nakata, M. Nakano, and K. Kawahara, "Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel," IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan, vol. 7, no. 6, pp. 453–457, 1992.

24. A. J. Moses, N. Derebasi, G. Loisos, and A. Schoppa, "Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 215-216, pp. 690–692, 2000.

25. W. Arshad, T. Ryckebusch, F. Magnussen, H. Lendenmann, B. Eriksson, J. Soulard, and B. Malmros, "Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools," in Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, pp. 94–102, 2007.

26. F. Ossart, E. Hug, O. Hubert, C. Buvat, and R. Billardon, "Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis," IEEE Transactions on Magnetism, vol. 36, pp. 3137–3140, Sept. 2000.

27. A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, J. C. Perrier, P. ManfA~c , and T. Chevalier, "Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 124–126, 2003.

28. Y. Kurosaki, H. Mogi, H. Fujii, T. Kubota, and M. Shiozaki, "Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, no. 20, pp. 2474–2480, 2008. Proceedings of the 18th International Symposium on Soft Magnetic Materials.

29. Григорян С.С., Айвазян К.Э., Гаспарян Л.А. Влияние усилий прессования на электромагнитные характеристики сердечников статоров. – М.: Электротехника, 1974. – 22-26 с.

30. A. Schoppa, J. Schneider, C. D. Wuppermann, and T. Bakon, "Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254-255, pp. 367–369, 2003.

31. A. Moses and H. Rahmatizadeh, "Effects of stress on iron loss and flux distribution of an induction motor stator core," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp. 4003–4005, Sept. 1989.
32. C. D. Graham, "Physical origin of losses in conducting ferromagnetic materials," *Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 11, pp. 8276–8280, 1982.
33. J. Reinert, A. Brockmeyer, and R. De Doncker, "Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 1055–1061, 2001.
34. A. Brockmeyer, "Dimensionierungswerkzeug für magnetische bauelemente in strom- richteranwendungen," PhD thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 1997.
35. J. Li, T. Abdallah, and C. Sullivan, "Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms," in *36th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, vol. 4, 2001, pp. 2203–2210.
36. K. Venkatachalam, C. Sullivan, T. Abdallah, and H. Tacca, "Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters," in *IEEE Workshop on Computers in Power Electronics*, 2002, pp. 36–41.
37. A. Van den Bossche, V. Valchev, and G. Georgiev, "Measurement and loss model of ferrites with non-sinusoidal waveforms," in *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, vol. 6, 2004, pp. 4814–4818.
38. H. Jordan, "Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder," *Elektrische Nachrichtentechnik*, vol. 1, p. 8, 1924.
39. R. Boll, *Weichmagnetische Werkstoffe*, 4th ed. Vacuumschmelze GmbH, Hanau, Germany, 1990, ISBN: 3800915464.
40. R. H. Pry and C. P. Bean, "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 3, pp. 532–533, 1958.
41. G. Bertotti, "Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. theoretical considerations," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 6, pp. 2110–2117, 1985.

42. Flux 10 - 2D/3D Applications User's Guide. Meylan, France: Cedrat Group, 2007.
43. "Estimating iron loss in opera-2d," in Opera-2d User Guide, Oxfordshire, UK: Cobham Technical Services, 2012.
44. A. Moses, "Importance of rotational losses in rotating machines and transformers," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 1, no. 2, pp. 235–244, 1992.
45. K. Atallah and D. Howe, "Calculation of the rotational power loss in electrical steel laminations from measured H and B," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 6, pp. 3547–3549, 1993.
46. T. Kochmann, "Relationship between rotational and alternating losses in electrical steel sheets," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 160, pp. 145–146, 1996.
47. N. Stranges and R. Findlay, "Measurement of rotational iron losses in electrical sheet," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3457–3459, 2000.
48. F. Fiorillo and A. M. Rietto, "Rotational versus alternating hysteresis losses in nonoriented soft magnetic laminations," in *37th Annual conference on magnetism and magnetic materials*, vol. 73, Houston, USA, 1993, pp. 6615–6617.
49. Y. Guo, J. G. Zhu, J. Zhong, H. Lu, and J. X. Jin, "Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: a review," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 2, pp. 279–291, 2008.
50. J. Saitz, "Magnetic field analysis of electric machines taking ferromagnetic hysteresis into account," PhD thesis, Aalto University, Helsinki, Finland, 2001.
51. J. Sievert, H. Ahlers "European intercomparison of measurements of rotational power loss in electrical sheet steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 160, pp. 115–118, 1996.

52. F. Fiorillo and A. M. Rietto, “Rotational and alternating energy loss vs. magnetizing frequency in SiFe laminations,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 83, no. 1, pp. 402–404, 1990.

53. L. Michalowski and J. Schneider, *Magnetotechnik - Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*, 3rd ed. Vulkan-Verlag GmbH, 2006, ISBN: 9783802721397.

54. S. Jacobs, D. Hectors, F. Henrotte, M. Hafner, M. H. Gracia, K. Hameyer, P. Goes, D. R. Romera, E. Attrazic, and S. Paolinelli, “Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives,” in *EVS24 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, Norway, 2009.

55. F. Preisach, “Über die magnetische Nachwirkung,” *Zeitschrift für Physik*, vol. 94, no. 5, pp. 277–302, 1935.

56. I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis and their Applications*, 2nd ed. Academic Press, 2003, ISBN: 0124808735.

57. D. Jiles and D. Atherton, “Theory of ferromagnetic hysteresis,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 61, no. 1, pp. 48–60, 1986.

58. M. Fratila, A. Benabou, A. Tounzi, and M. Dessoude, “Improved iron loss calculation for non-centered minor loops,” *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 1358–1365, 2013.

59. T. Chevalier, A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, and C. Cester, “A new dynamic hysteresis model for electrical steel sheet,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 275, no. 1, pp. 197–201, 2000.

60. S. Zirka, Y. Moroz, P. Marketos, and A. Moses, “Viscosity-based magnetodynamic model of soft magnetic materials,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 9, pp. 2121–2132, 2006.

61. A. Bergqvist, “Magnetic vector hysteresis model with dry friction-like pinning,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 233, no. 4, pp. 342–347, 1997.

62. A. Michaelides, J. Simkin, P. Kirby, and C. Riley, “Permanent magnet (de-) magnetization and soft iron hysteresis effects: a comparison of FE analysis techniques,” *COMPEL: The International Journal for Computation and*

Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 29, no. 4, pp. 1090–1096, 2010.

63. G. Bertotti, “Dynamic generalization of the scalar Preisach model of hysteresis,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, no. 5, pp. 2599–2601, 1992.

64. L. R. Dupre, R. V. Keer, and J. A. A. Melkebeek, “On a magnetodynamic model for the iron losses in non-oriented steel laminations,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 29, no. 3, pp. 855–861, 1996.

65. O. Bottauscio, M. Chiampi, L. Dupré, M. Repetto, M. V. Rauch, and J. Melkebeek, “Dynamic Preisach modeling of ferromagnetic laminations : a comparison of different finite element formulations,” Le Journal de Physique IV, vol. 08, pp. 647– 650, 1998.

66. L. Dupre, O. Bottauscio, M. Chiampi, M. Repetto, and J. Melkebeek, “Modeling of electromagnetic phenomena in soft magnetic materials under unidirectional time periodic flux excitations,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 5, pp. 4171–4184, 1999.

67. S. E. Zirka and Y. I. Moroz, “Hysteresis modeling based on transplantation,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, no. 6, pp. 3509–3511, 1995.

68. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов. Энергия, 1980. – 496 с.

69. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Москва. "Энергоиздат" 1982 – 504 с.

70. Ламмиранер Йржи, Штафль Милош, Вихревые токи, Энергия 1967, 208 с.