

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

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 621.313.333

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
В.Ф.Шинкаренко

“ ___ ” _____ 20__ 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)

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 107 сторінок, 36 ілюстрацій, 31 таблиць та 72 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 107 страниц, 36 иллюстраций, 31 таблиц и 72 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 107 pages, 36 illustrations, 31 tables and 72 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	
	30
1.1 Загальні відомості про втрати в магнітопроводі, типи та	
класифікація дефектів магнітопроводу	30
1.2 Складові втрат в магнітопроводі	31
1.2.1 Втрати на гістерезис.....	32
1.2.2 Втрати на вихрові струми.....	33
1.2.3 Сумарні втрати в магнітопроводі	34
1.3 Причини дефектів магнітопроводу	35
1.3.1 Різання	35
1.3.2 Зусилля пресування.....	37
1.3.3 Скріплення пакетів у суцільний магнітопровід	38
1.3.4 Віджигання.....	39
1.3.5 Поміщення магнітопроводу в корпус ЕМ	41
1.3.6 Локальні дефекти магнітопроводів	41
Висновок до розділу 1.....	43
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ВТРАТ У СТАЛІ ВІДОМИМИ	
РОЗРАХУНКОВИМИ І МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ	
	44
2.1 Визначення питомих втрат в сталі експериментальним методом в	
окремо взятому магнітопроводі.....	44
2.2 Розподілення магнітної індукції в магнітопроводі	53
2.3 Розділення виміряних втрат на складові.....	55
2.3.1 Огляд та аналіз існуючих моделей розрахунку втрат	56
2.3.1.1 Моделі, що базуються на рівнянні Штейнмеца.....	57
2.3.1.2 Моделі, що ґрунтуються на розділенні втрат.....	60

2.3.1.3 Моделі гістерезису.....	64
2.3.2 Розділення втрат.....	67
2.4 Визначення питомих втрат в зібраному двигуні із застосуванням досліджуваного магнітопроводу	71
Висновок до розділу 2.....	74
РОЗДІЛ 3 НОВИЙ МЕТОД ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ.....	75
3.1 Новий метод та методика дослідження	75
3.2. Експериментальна перевірка методу	77
3.3 Математичний розрахунок значень напруги та втрат для магнітопроводів різного ступеню дефективності.....	84
3.4 Аналіз експериментів та розрахунків.....	93
Висновок до розділу 3.....	95
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	94
4.1 Опис ідеї проекту	94
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	95
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	95
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	95
Висновок до розділу 4.....	96
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	100

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 в 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.

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, представлене в [1], також 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.

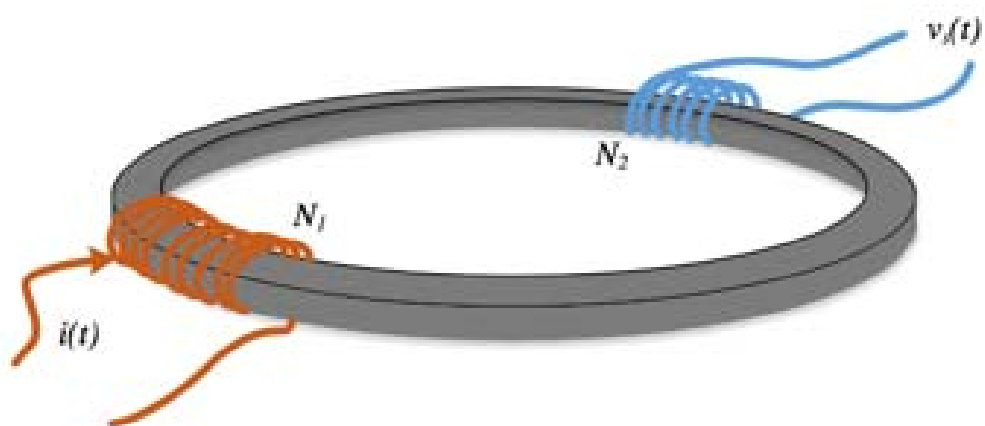


Рисунок 1 – Експериментальне вимірювання втрати сердечника методом вимірювання петлі гістерезису [6].

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

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A_e} \int_0^t [v_s(\tau)] d\tau \quad (1)$$

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:

$$\frac{P}{V} = \frac{f \int_0^T i_1(t) \frac{N_1}{N_2} u_2(t) dt}{A_e l_e} \quad (4)$$

де P – втрати сердечника;

V – об'єм сердечника;

f – частота напруги живлення;

$u_2(t)$ – наведена напруга у вторинній обмотці.

Дискретна форма рівняння (4) може бути описана як:

$$\frac{P}{V} = \frac{\frac{1}{K} \sum_0^K i_1(k) \frac{N_1}{N_2} u_2(k)}{A_e l_e} \quad (5)$$

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 слідують [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 μ , таким чином, зменшити втрати, до матеріалу додають кремній та алюміній. Ізотропна сталь містить 0,5 - 3,25% кремнію, 0,005% вуглецю та до 0,5% алюмінію. 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). Відповідно до стандарту AISI, рівня матеріалу – це число, написане поруч з літерою М. 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 (ITM) має стандарти для підготовки матеріалів, експериментальної установки та методів тестування для всіх видів тестування, згаданих вище [7] - [9].



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 ізолюваних 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 виражена 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 вимірюваною 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 англійській 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 $\frac{Вт}{Кг}$;

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 відрізнитись 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:

(9)

де c_p – питома теплоємність теплоносія;

ρ – щільність теплоносія;

Q_v – це швидкість потоку теплоносія;

– це збільшення температури теплоносія.

Точно вимірявши Q_v та ΔT 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.

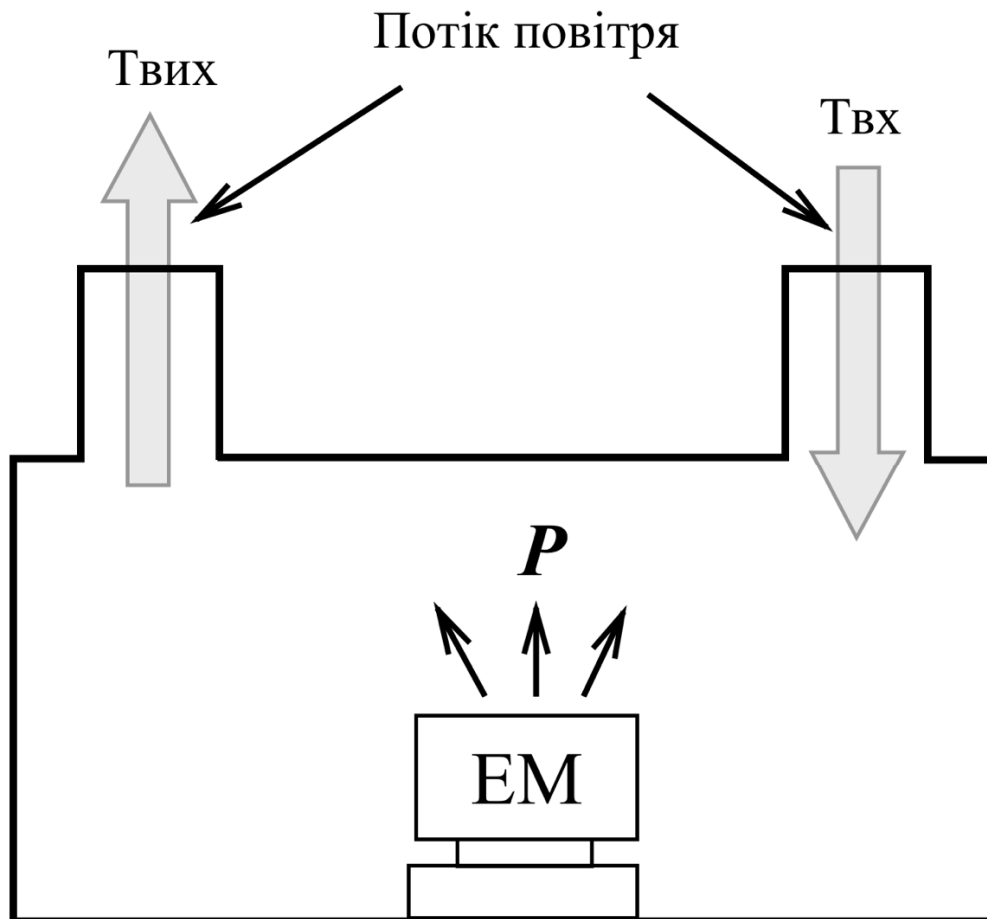


Рисунок 3 – Калориметр відкритого типу

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 теплоносіє (як правило, вода) для розсіювання тепла від первинного теплоносія (повітря) до вторинного теплоносія. Закритий тип калориметра є герметичним, а первинний теплоносіє циркулює як за природною конвекцією, так і внутрішнім вентилятором рисунок 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.

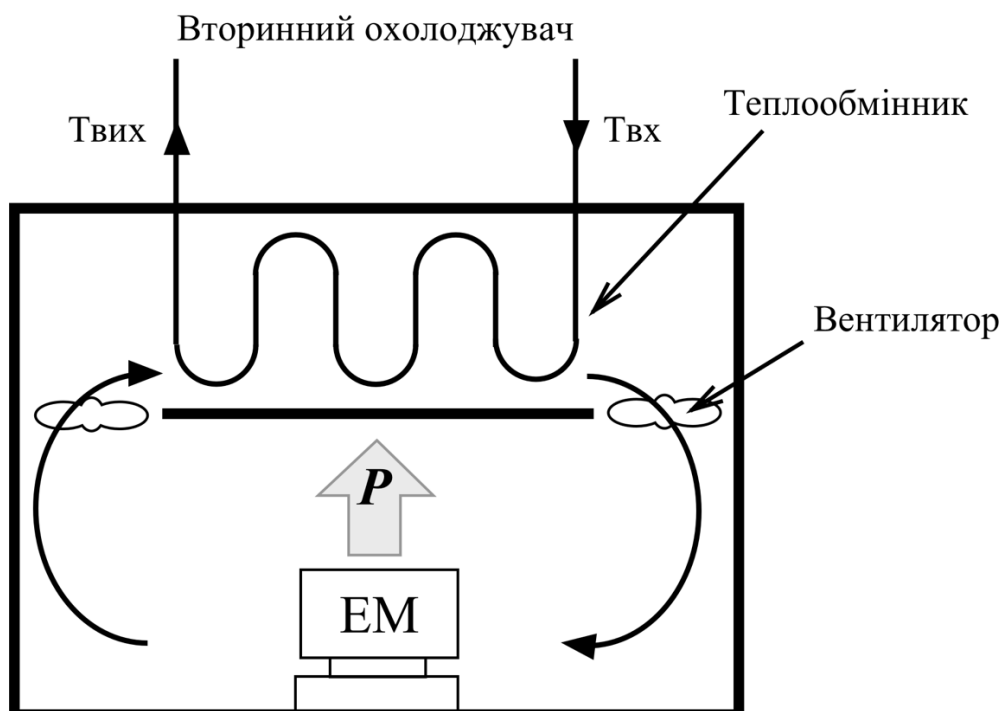


Рисунок 4 – Калориметр закритого типу

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.

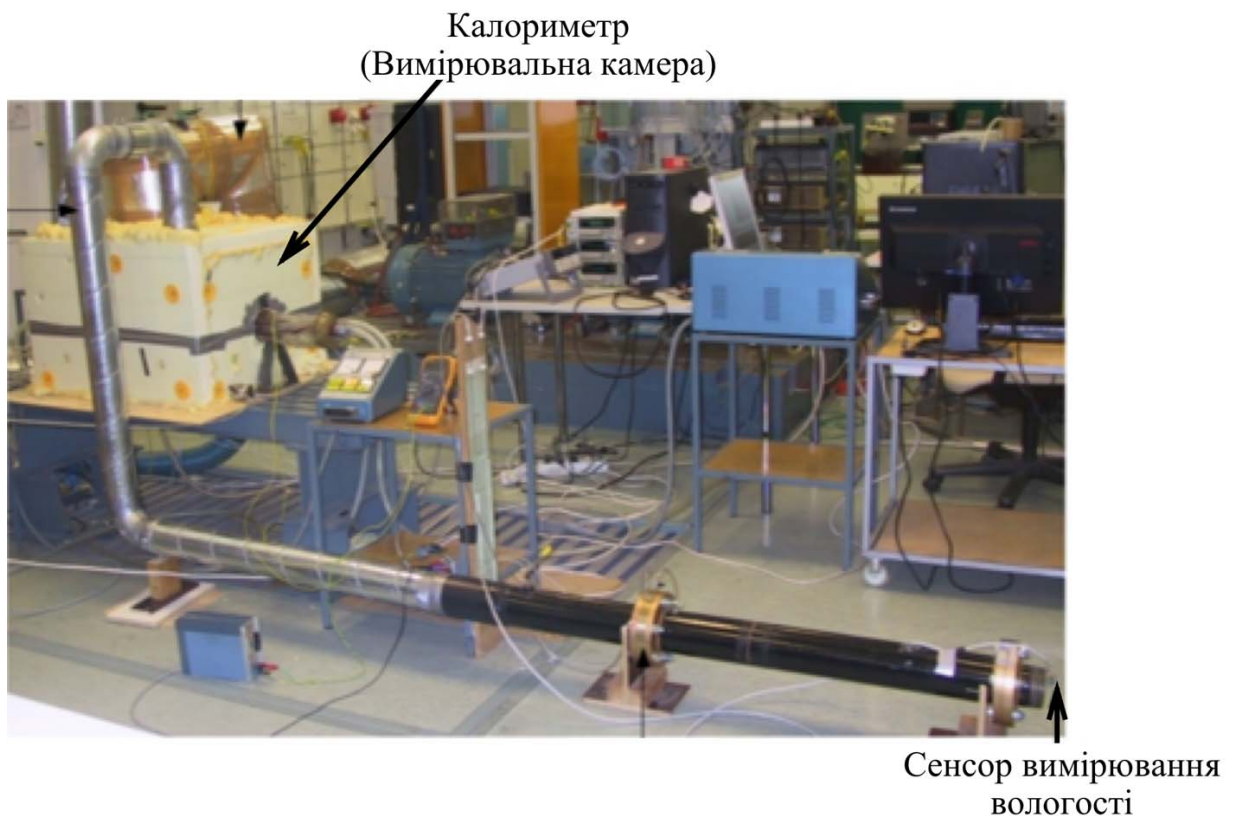


Рисунок 5 – Приклад експериментальної установки для калориметричного методу [17].

Магнітні:

1. **Ватметровий метод.** Для застосування цього методу, 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 1.13. В активній сталі статора наводиться індукція

рівна 1 Тл 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.

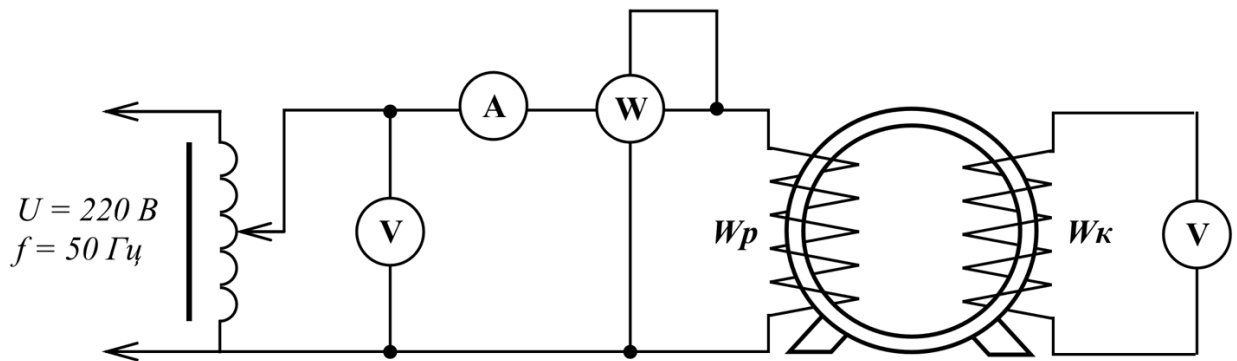


Рисунок 6 – Схема метода ватметра для вимірювання втрат у сталі

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 в сталі P_c і 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

електродвигуном в 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 приведено на рисунку 5, залежності споживаної потужності від квадрата напруги $P_0 = P_c + P_m = f(U_0)^2$.

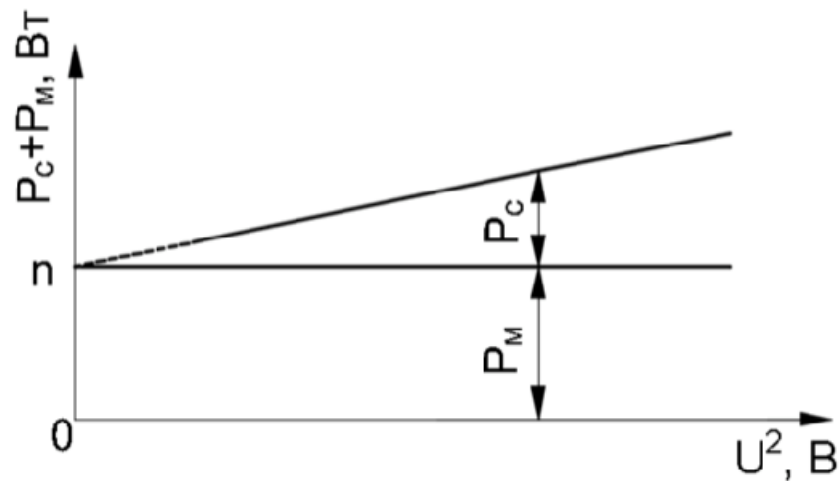


Рисунок 7 – Розподіл втрат при неробочому ході електродвигунів P_c – втрати в сталі; P_m – механічні втрати.

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.

Перевагою цього метода - 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 магнітопроводів 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 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 такому методі для наукових цілей, , що дозволить економити чималу кількість часу дослідникам, то необхідність у такому методі 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.