

В.В. ЧУМАК, М.А. КОВАЛЕНКО, О.Л. ТИМОЩУК, Є.С. ІГНАТЮК, І.Я. КОВАЛЕНКО

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЛАМІНОВАНИХ ОСЕРДЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ВИСОКОЧАСТОТНИМ ІНДУКЦІЙНО-ВІБРАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

В даній роботі розглянуто проблему оцінки якості активних частин електричних машин, зокрема шихтованих магнітопроводів. Визначено суттєві діагностичні показники фактичного стану набірного сердечника, а саме питомі втрати при перемагнічуванні та ослаблення пресування пакета, пов'язані з підвищенням втрат обумовлених дефектами міжлистової ізоляції, зниженням ККД, порушенням теплового режиму та ін. Запропоновано індукційно-вимірювальний модуль для визначення рівня порушення міжлистової ізоляції та зростання втрат у сердечнику. Рекомендується при розпушуванні для магнітопроводів невеликого розміру просочування клейким лаком ослабленої області та подальше сушіння при стиснутому сердечнику. Також для сердечників невеликого діаметру між натискною шайбою та крайніми листами сердечника через кожні 2...4 зубці забити текстолітові клини. При ослабленні пресування сердечників великих електричних машин, у яких пресування здійснюється стяжними шпильками, виконують підтяжку шпильок. Розроблено двовимірну польову математичну модель пакету шихтованого магнітного осердя з метою оцінки розподілу електромагнітного поля та вихрових струмів та втрат при різній частоті від 50 Гц до 10 кГц. Запропоновано використати аналіз перехідного процесу при зміні магнітного потоку в магнітопроводі. Для спрощення вимірювальної схеми запропоновано використовувати процес комутації струму в обмотці збудження. За допомогою розробленої моделі проведено розрахунок перехідних режимів на прикладі досліджуваного магнітопроводу. Як об'єкт дослідження використовувався макет шихтованого магнітопроводу, що являє собою набірний пакет листів магнітної сталі, що застосовується в магнітопроводах сухих трансформаторів малої та середньої потужності. Для того, щоб поєднати два методи, була розроблена установка, яка дозволяє одночасно перевіряти якість пресування та якість міжлистової ізоляції.

Ключові слова: діагностика, шихтоване магнітне осердя, питомі втрати на вихрові струми, питомі втрати на гістерезис, магнітна проникність, дефекти шихтованих осердь, ослаблення пресування, міжлистова ізоляція, вібродіагностичний модуль, індукційно-вимірювальний модуль, високочастотні методи

V.V. CHUMACK, M.A. KOVALENKO, O.L. TYMOSCHUK, Y.S. IHNATIUK, I.Y. KOVALENKO

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF LAMINATED CORE OF ELECTRICAL MACHINES BY THE HIGH-FREQUENCY INDUCTION-VIBRATION METHOD

In this work, the problem of assessing the quality of active parts of electric machines, in particular charged magnetic conductors, is considered. The essential diagnostic indicators of the actual state of the recruitment core were determined, namely specific losses during remagnetization and weakening of package pressing, which are associated with increased losses, decreased efficiency, violation of the thermal regime, etc. induction-measuring module for determining the level of inter-sheet insulation breakdown and the growth of losses in the core. It is recommended when loosening for small-sized magnetic conductors, impregnation of the weakened area with adhesive varnish and subsequent drying with a compressed core. Also, for cores of a small diameter, between the pressure washer and the extreme sheets of the core, drive textolite wedges every 2...4 teeth. When the pressing of the cores of large electric machines, in which the pressing is carried out by tension pins, is weakened, the pins are tightened. A two-dimensional field mathematical model of a charged magnetic core package was developed in order to estimate the distribution of the electromagnetic field and eddy currents and losses at different frequencies from 50 Hz to 10 kHz. It is proposed to use the analysis of the transient process when the magnetic flux changes in the magnetic circuit. To simplify the measuring scheme, it is proposed to use the process of switching the current in the excitation winding. With the help of the developed model, the calculation of transient modes was carried out on the example of the studied magnetic circuit. As an object of research, a mock-up of a stacked magnetic core was used, which is a set package of magnetic steel sheets used in magnetic cores of dry transformers of small and medium power. In order to combine the two methods, an installation was developed that allows checking the quality of pressing and the quality of inter-sheet insulation at the same time.

Keywords: diagnostics, layered magnetic core, specific eddy current loss, specific hysteresis loss, magnetic permeability, layered core defects, weakening of pressing, inter-sheet insulation, vibrodiagnostic module, induction-measuring module, high-frequency methods.

Вступ. Проблема оцінки якості шихтованих сердечників електричних машин є актуальним завданням, оскільки існуючі методи об'єктивної оцінки фактичного стану є недосконалими та трудомісткими. По-перше це стосується визначення питомих втрат на перемагнічування, які дають інформацію про загальний стан магнітопроводу, найбільшою складовою є частка втрат на вихрові струми, що обумовлена порушенням міжлистової ізоляції.

З іншого боку вагомою характеристикою якості шихтованих осердь є стан пресування магнітопроводу. Послаблення пресування викликає такі негативні явища як підвищена вібрація, нагрівання магнітопроводу та обмоток, що може призвести до серйозних неполадок і надалі до аварійного виходу з експлуатації електричної машини.

Одночасна перевірка пресування набірного пакета та якості міжлистової ізоляції є складним завданням, оскільки при ослабленні пресування одночасно зменшується дотик окремих листів сердечника між собою, що зменшує паразитні контури вихрових струмів через

канали підвищеної провідності у місцях з порушеною ізоляцією. Таким чином, вимоги щодо комплексної оцінки якості магнітопроводу суперечливі.

Розгляду сучасних методів вібраційної діагностики різних видів обладнання присвячено значну кількість робіт [1]. У тому числі можна назвати дві групи методів, заснованих на принципово різних підходах: детермінованому і статистичному [2, 3]. Питомі втрати у магнітопроводі є важливим показником. Зростання магнітних втрат обумовлено насамперед зростанням паразитних вихрових струмів внаслідок порушення міжлистової ізоляції, ослаблення пресування викликає такі негативні явища як підвищення вібрацій окремих вузлів та машини загалом [4, 5].

Магнітопровід, що складається із набору шихтованих пластин, є критично важливою активною складовою у будь-якому електромеханічному пристрої перетворення енергії. Від якості та ефективності його роботи залежать показники продуктивності та надійності електричних машин.

Дослідження процесів у магнітопроводі на

© В.В. Чумак, М.А. Коваленко, О.Л. Тимошук, Є.С. Ігнатюк, І.Я. Коваленко, 2023

промислових частотах майже повністю вивчені. Існують безліч досліджень, які спрямовані на обчислення втрат, пов'язаних з гістерезисом та вихровими струмами. Проте вплив вищих гармонік на загальні втрати та поведінку магнітопроводу вивчений менш повно [6, 7].

Класичні роботи на цю тему представлені в роботах [8, 9]. Багато з них спрямовані на оцінку якості шихтованого магнітопроводу. Зазвичай це включає в себе вимір втрат, пов'язаних із перемагнічуванням матеріалів.

Дослідження перехідних явищ в магнітопроводі отримали недостатньо уваги. Вони аналізувалися за допомогою аналітичних методів і при створенні моделей використовувалося багато припущень та спрощень. Це призводить до віддалення результатів дослідження від реальних процесів.

Важливим припущенням у цих дослідженнях є сталість магнітної проникності, не врахування процесу перемагнічування (гістерезису) та взаємодія струмів між суміжними пластинами магнітопроводу (так званий "ефект близькості").

На сьогоднішній день існують сучасні програмні засоби для розв'язання рівнянь Максвелла, використовуючи метод скінченних елементів, такі як Comsol Multiphysics, Ansys та інші [10, 11].

Однією з головних задач даного дослідження є повторення результатів класичних робіт за прийнятими припущеннями та ускладнення завдання, пов'язане з урахуванням зміни магнітної проникності, магнітного запізнення та впливу струмів на суміжні пластини. Актуальність роботи полягає в розробці методологічної бази та знань для використання на практиці на широкому діапазоні частот.

Метою роботи є дослідження комбінованого методу випробування шихтованого магнітного осердя: ударного механічного діагностування та використання класичних індукційних методів.

Варто відмітити, що одночасне виявлення дефектів міжлистової ізоляції та оцінка ослаблення пресування пакета є складним завданням. Ослаблення пресування збільшує відстань між листами магнітопроводу та зменшує поверхню зіткнення між листами пакета. Однак, в експлуатаційному режимі внаслідок вібраційних сил інтенсивність зіткнень окремих листів буде пропорційна частоті перемагнічування і вихрові струми виявлятимуться при роботі машини (наприклад 50 Hz), хоча вони не будуть виявлені тестовими методами діагностики в розібраному стані машини.

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є високочастотні процеси перемагнічування магнітних осердь, які використовуються в загальнопромислових двигунах.

Дослідження проводилися на основі аналізу листів тороїдальних магнітних осердь асинхронних машин загального призначення та використання різних пристроїв для генерування різних частот перемагнічування. Всі дані щодо досліджуваного двигуна та параметрів магнітних осердь наведені в роботі [12].

Для проведення досліджень використовувалися наступні методи: аналітичні методи класичної електродинаміки, метод скінченних елементів, який реалізований в програмному пакеті Comsol Multiphysics, графічні методи для створення розрахункових моделей та

методи обчислення електромагнітних полів.

Загальний вигляд розробленої моделі досліджуваного шихтованого магнітного осердя в середовищі Comsol Multiphysics показано на рис. 1.

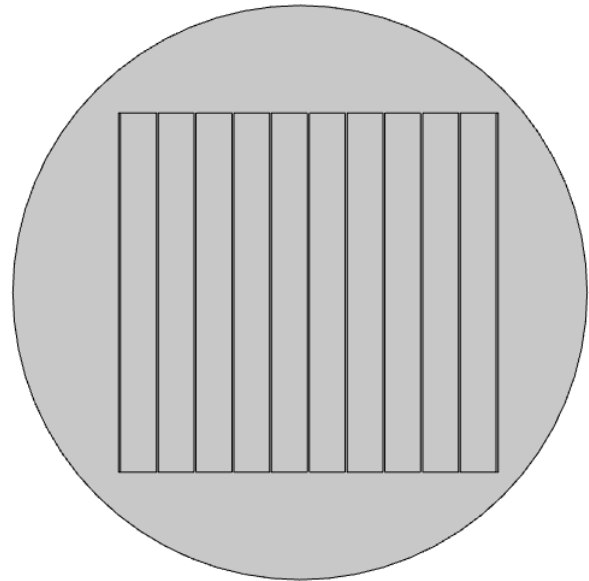


Рис. 1 – Загальний вигляд розробленої моделі досліджуваного шихтованого магнітного осердя

На зовнішніх межах розрахункової області (що обмежена колом) задається вектор магнітного потоку. Між досліджуваними пластинами магнітного осердя забезпечено відстань, з метою моделювання тонкого шару міжлистової ізоляції. Для десяти досліджуваних пластин задано нелінійну залежність між магнітною індукцією та напруженістю магнітного поля (крива намагнічування).

Опис процесу діагностування із використанням індукційного методу. Принцип методу полягає в реакції вимірювальної обмотки на величину і фазу вихрових струмів, що виникають у металевому виробі (осерді) при поміщенні його (або його частини) в змінне магнітне поле. Обмотка збудження та вимірювальна обмотка можуть бути розділені, або це може бути одна і та ж обмотка.

При гармонійному, або імпульсному впливі на контрольовану систему для отримання результатів потрібно по кожній гармоніці вимірювання фазових збурень, тобто обробка сигналів напруги, струму та потужності, що ускладнює операцію контролю. Через зазначені труднощі при прямому вимірі втрат перспективною є спроба знайти фізичну величину, яка може бути використана як інформаційний сигнал. Так як при порушенні міжлистової ізоляції [13] в першу чергу зростають вихрові струми в магнітопроводі, то шуканий сигнал повинен характеризувати інтенсивність вихрових струмів за дефектними контурами.

Запропоновано використати аналіз перехідного процесу при зміні магнітного потоку в магнітопроводі. Для спрощення вимірювальної схеми запропоновано використовувати процес комутації струму в обмотці збудження.

Замикання листів осердя між собою внаслідок різноманітних пошкоджень міжлистової ізоляції створює "частковий ефект суцільного магнітопроводу". Цей ефект проявляється в тому, що в осерді, зібраному з

окремих листів без достатньої ізоляції між ними з'являються додаткові вихрові струми, які замикаються за дефектними контурами.

Отже, показником якості ламінованого осердя може бути оцінка впливу паразитних контурів вихрових струмів на ступінь наближення шихтованого магнітопроводу до масивного у всьому обсязі випробуваного осердя або в його окремих частинах.

Поставлена мета досягається тим, що в магнітопроводі або в його частині за допомогою обмотки збудження, по якій тече постійний або змінний струм низької частоти, створюється початковий магнітний потік, при досягненні магнітного потоку усталеного значення, струм в обмотці збудження зрізається. При зрізі струму починає згасати магнітний потік Φ . Однак

швидкість загасання магнітного потоку $d\Phi/dt$ менше швидкості загасання струму збудження di/dt за рахунок того, що магнітний потік деякий час після загасання струму збудження підтримується вихровими струмами в магнітопроводі [14]. Вихрові струми в кожному листі пакета згасають з постійною часу, яка залежить від властивостей матеріалу осердя і пропорційна квадрату товщини листів:

$$T = \frac{\mu_0 \mu d^2 \gamma}{4\pi^2} \quad (1)$$

де: μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ – магнітна проникність матеріалу магнітного осердя; γ – питома електропровідність матеріалу магнітного осердя; d – товщина листа. Блок-схема індукційно-виміральної схеми показано на рис. 2.

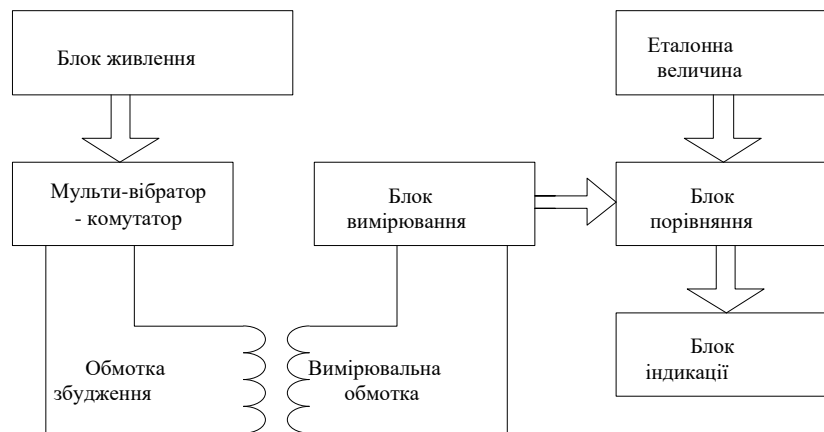


Рис. 2 – Блок-схема індукційно-виміральної схеми

Параметри перехідного процесу будуть визначатися початковим магнітним потоком (його величиною), який створюється струмом збудження, часом комутації струму збудження, демпфуючою дією вихрових струмів у кожному окремому листі, а також демпфуючою дією паразитних контурів вихрових струмів.

Згасання магнітного потоку відбуватиметься приблизно за експоненціальним законом. Ідеальний випадок, коли відбувається миттєва комутація струму збудження $T_k=0$:

$$\Phi \approx \Phi_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

де: Φ_0 – початкове значення потоку.

Наявність електричного зв'язку між пластинами внаслідок пошкодження ізоляції створює додатковий контур вихрових струмів, що призведе до зростання постійної часу загасання T потоку у магнітопроводі.

Зміна магнітного потоку призводить до виникнення у всіх витках, зчеплених із контуром намагнічування ЕРС, яка визначається законом зміни потоку:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Phi_0}{T} e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

Очевидно, що збільшення постійної часу згасання змінить форму кривої ЕРС, що наводиться в вимірвальній обмотці. З фізичної точки зору, в основу даного способу покладена оцінка рівня інерційності зміни потоку в досліджуваному магнітопроводі на відміну від способів, заснованих на втратах, які вимірюються в магнітопроводі.

В рамках даного дослідження випробувано два магнітопроводи без обмотки (статор від двигуна

4A100L6Y3 та 4A71B4Y3). Визначено питомі втрати нормативними методами [14]. Питомі втрати при індукції 1 Тл у спинці статора склали відповідно 3,13 Вт/кг та 6,6 Вт/кг. Підвищені втрати були зафіксовані для другого статора, які перевищують допустимі втрати приблизно вдвічі. Проведені випробування включали визначення постійної згасання вихрових струмів, яка пов'язана із втратами в магнітопроводі. Для першого випадку ця постійна часу становить близько 50 мкс, що відповідає питомим втратам в межах 2,8-3,2 Вт/кг, для другого випадку відповідно 100 мкс та 6,4-6,8 Вт/кг [14]. Початок імпульсної дії синхронізується відповідно до бази даних для магнітопроводів різної геометрії та конфігурації у блоці інформаційно-виміральної системи (ІВС) ударної діагностики (УД).

Для дослідження розподілу електромагнітного поля та вихрових струмів в досліджуваному пакеті шихтованого магнітного осердя проведено серія чисельних розрахунків. Розподіл середнього значення вектора магнітної індукції та контурів вихрових струмів при частоті напруги живлення 50 Гц показано на рис. 3.

По рис. 3 видно, що магнітне поле на частоті 50 Гц глибоко проникає у всі листи шихтованого магнітного осердя, а характер розподілу магнітної індукції та вихрових струмів в середині пластини є рівномірним.

Розподіл середнього значення вектора магнітної індукції та контурів вихрових струмів при частоті напруги живлення 10 кГц показано на рис. 4.

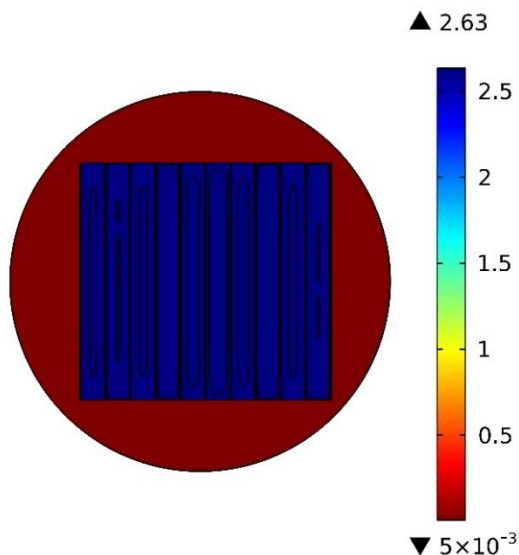


Рис. 3 – Розподіл магнітної індукції та вихрових струмів при частоті 50 Гц

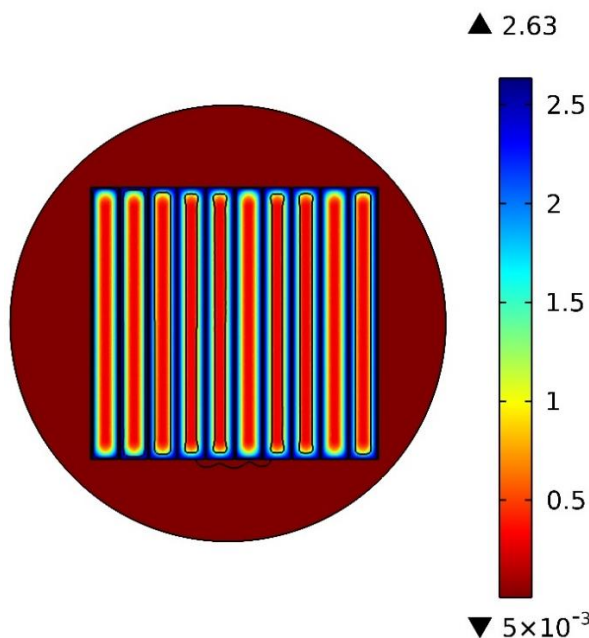


Рис. 4 – Розподіл магнітної індукції та вихрових струмів при частоті 10 кГц

При збільшенні частоти напруги живлення спостерігається витіснення магнітного поля та вихрових струмів до країв досліджуваних пластин, що чітко корелюється із загальновідомими положеннями та адекватно відображає фізичну картину поля при високій частоті.

Розподіл вихрових струмів в досліджуваного пакеті пластин при частоті напруги живлення 50 Гц показано на рис. 5.

В такому випадку по окремим листам шихтованого магнітного осердя протікають вихрові струми, які мають протилежну направленість між сусідніми листами. Це впливає на глибину проникнення вихрових струмів між ними і таким чином проявляється ефект близькості між сусідніми листами магнітного осердя. Інша картина спостерігається при частоті живлення 10 кГц, що показано на рис. 6.

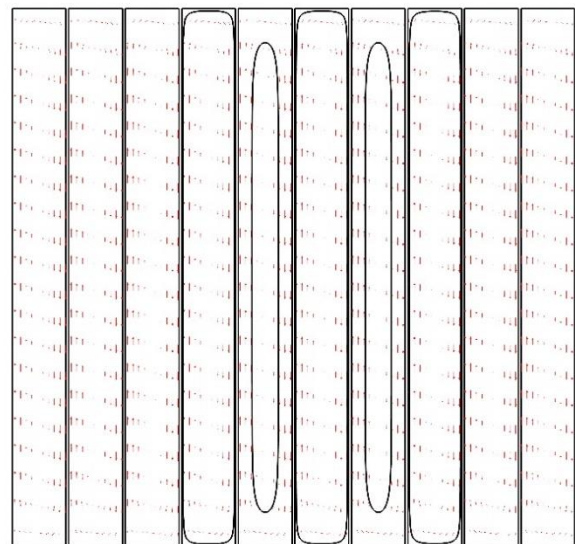


Рис. 5 – Розподіл вихрових струмів при частоті 50 Гц

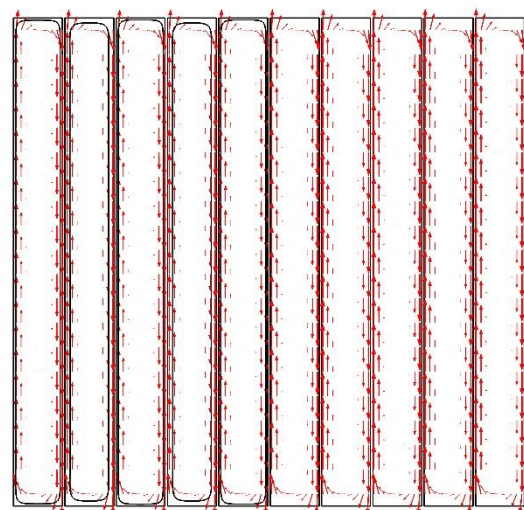


Рис. 6 – Розподіл вихрових струмів при частоті 10 кГц

На високій частоті «ефект близькості» проявляється в більшій мірі, що видно по характеру розподілу контурів вихрових струмів між сусідніми листами. Це може бути корисною діагностичною ознакою при появі дефектів міжлистової ізоляції шихтованого магнітного осердя та замикання листів між собою.

За допомогою розробленої моделі проведено розрахунок втрат на вихрові струми, що виникають в досліджуваному пакеті шихтованого магнітного осердя. Результат розрахунку активних втрат в досліджуваних листах в залежності від частоти напруги живлення обмотки збудження показано на рис. 7.

Дослідження величини втрат від частоти (рис. 7) проводилось від частоти 50 Гц із поступовим підвищенням частоти джерела обмотки збудження до 10 кГц.

Втрати в магнітному осерді на частоті 50 Гц при бездефектному магнітопроводі складають $\approx 0,085$ Вт і при поступовому збільшенні частоти напруги живлення спостерігається ріст втрат, які становлять ≈ 204 Вт при частоті 10 кГц.

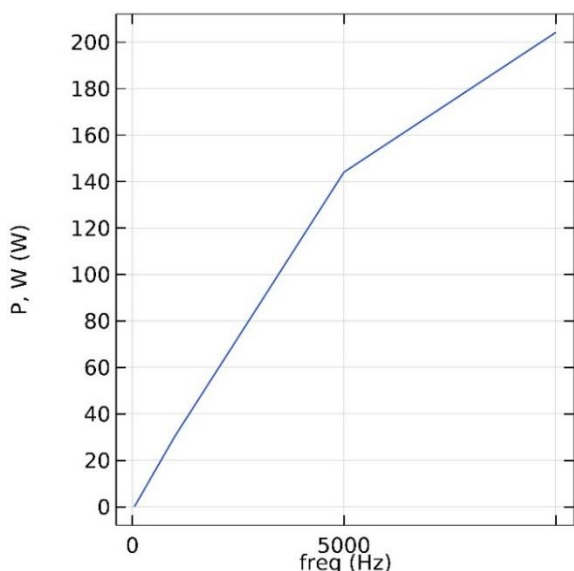


Рис. 7 – Залежність втрат на вихрові струми в досліджуваному пакеті від частоти

За допомогою розробленої моделі проведено розрахунок перехідних режимів на прикладі досліджуваного магнітопроводу. Результати розрахунку представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку перехідних режимів

Магнітне осердя	Усталений магнітний потік (відносне значення)	Максимальне значення ЕРС (відносне значення)	Усереднена постійна часу затухання магнітного потоку, мкс	Усереднена постійна часу затухання ЕРС
4A100L 6УЗ	1,0	1,0	130	44
4A71В4 УЗ	1,0	1,0	180	73

Розрахункові криві для затухання магнітного потоку для магнітних осердь: D1 – нормальний магнітопровід, D2 – дефектний, D3 – аварійний показано на рис. 8.

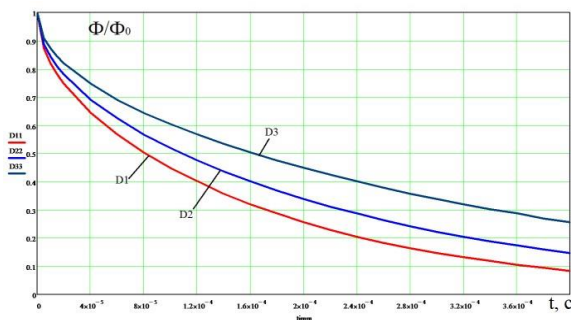


Рис. 8 – Розрахункові криві для затухання магнітного потоку

Суть ударної вібродіагностики полягає у збудженні вібрацій у досліджуваному зразку за допомогою зовнішнього ударного імпульсу і в подальшому вимірі та аналізі отриманого відгуку. При цьому спектр відгуку визначається, в основному, вібраційними властивостями об'єкта досліджень, тоді як спектр вібрацій, що вимірюються при функціональній вібродіагностиці, залежить від режиму роботи досліджуваного обладнання в даний момент часу і може містити додаткові сильні частотні складові, які не пов'язані з технічними характеристиками самого об'єкта досліджень. Таким чином, основною перевагою ударної діагностики є те, що вона дозволяє визначити основні вібраційні характеристики досліджуваного вузла.

В даний час існують системи ударної вібродіагностики, призначені для діагностування різних вузлів промислового обладнання, причому в основу більшості таких систем покладено детермінований підхід.

Під детермінованою системою мається на увазі, що діагностична система орієнтована отримання характеристик діагностичних сигналів у припущенні, що вплив і його відгук є детермінованими сигналами. Але як показало дослідження реальних ударних вібрацій, всі вони мають стохастичний характер через свою природу. У цьому випадку для отримання точних та достовірних оцінок найбільш ефективним є застосування стохастичних методів, які покладені в основу вимірювання діагностичних сигналів.

Як об'єкт дослідження використовувався макет шихтованого магнітопроводу (рис.9), що являє собою набірний пакет листів магнітної сталі, що використовується в магнітопроводах сухих трансформаторів малої та середньої потужності. За допомогою двох шпильок, виготовлених з немагнітного матеріалу, можна регулювати ступінь пресування пластин, моделюючи таким чином різні технічні стани магнітопроводу.

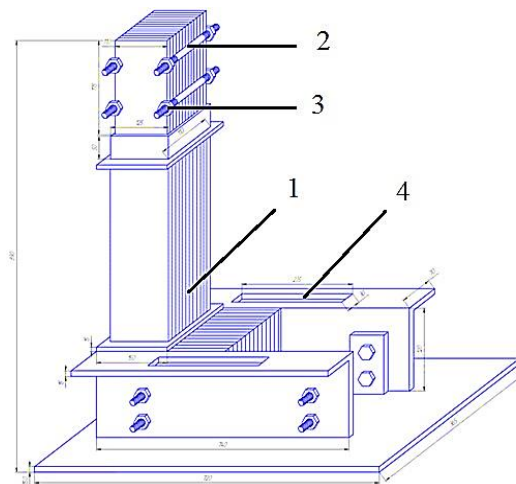


Рис. 9 – Макет шихтованого магнітопроводу

Результати проведених експериментів з діагностики ступеня пресування шихтованого магнітопроводу наведено нижче.

Пресування пластин магнітопроводу 1 здійснювалася за допомогою шпильок 2, затягування яких проводилася динамометричним ключем. Вібраційна хвиля порушувалася ударним молотком (рис. 11) у тілі

шихтованого магнітопроводу і вимірювалася за допомогою акселерометра типу АВС-017, який встановлювався на досліджуваному магнітопроводі за допомогою спеціального воску.

Експеримент із діагностування стану пресування пластин магнітопроводу здійснювався наступним чином. За допомогою затискних гайок 3, встановлених на шпильках 2, з силою 30 Н м стискався пакет пластин магнітопроводу. Потім включався та налаштовувався лабораторний зразок УД. Після налаштування макета у напрямі, перпендикулярному площині пластин, проводився удар, який викликав вібрації магнітопроводу. Вимірювання вібраційного сигналу здійснювався акселерометром, закріпленим на протилежному торці магнітопроводу.

Після цього повністю відпускалися гайки шпильок, якими були стягнуті пластини шихтованого магнітопроводу, і повторювався експеримент, аналогічний до описаного. На рис.10 представлені спектрограми, виміряні на шихтованому магнітопроводі, затиснутому з силою 30 Н · м (рис. 10, а), і у разі, коли затискні гайки повністю ослаблені (рис. 10, б)

Частота дискретизації становила 50 кГц, тобто представлені на рис. 10 спектрограми містять інформацію про частоти аналізованого сигналу у смузі з верхньою граничною частотою 25 кГц.

На рис. 10 (а) видно, що для затиснутого магнітопроводу основна частота вібрацій спостерігається в області 600 Гц. Відзначено також менш інтенсивні складові в області 2300 та 5400 Гц.

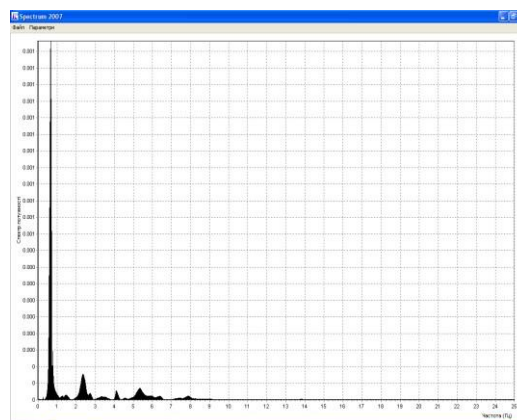
При знятті стягуючого зусилля в спектрограмі вібрацій шихтованого магнітопроводу крім основної частоти області 600 Гц відзначені численні інтенсивні частотні складові в смузі частот до 15 кГц.

Нижче наведена структурна схема ІС УД частота дискретизації становила 50 кГц, тобто представлені на рис. 4 спектрограми містять інформацію про частоти аналізованого сигналу на смузі з верхньою граничною частотою 25 кГц.

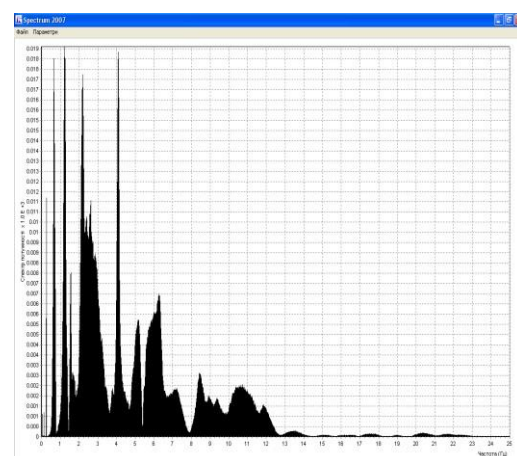
На рис. 10 (а) видно, що для затиснутого магнітопроводу основна частота вібрацій спостерігається в області 600 Гц. Відзначено також менш інтенсивні складові в області 2300 та 5400 Гц.

При знятті стягуючого зусилля в спектрограмі вібрацій шихтованого магнітопроводу крім основної частоти області 600 Гц відзначені численні інтенсивні частотні складові в смузі частот до 15 кГц.

Для того, щоб поєднати два методи, була розроблена установка, яка дозволяє одночасно перевіряти якість пресування та якість міжлистової ізоляції (рис. 11). Наведений спектр механічних коливань показує, що найінформативніші зони знаходяться в діапазоні 500-700 Гц. Необхідно, щоб ініційований електромагнітний процес комутації струму в області збудження синхронізували з початком механічного впливу.



а



б

Рис. 10 – Спектрограми, виміряні на шихтованому магнітопроводі: а - магнітопровід стиснутий; б - магнітопровід ослаблений

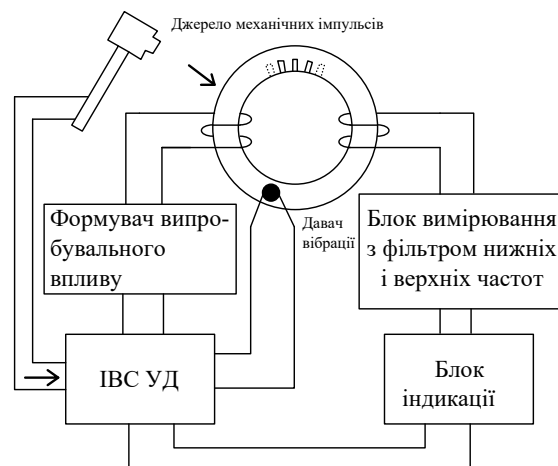


Рис. 11 – Блок-схема системи спільної діагностики якості міжлистової ізоляції та ступеня пресування магнітопроводу

Висновки. При спільній дії вібраційного та імпульсного електромагнітного впливу отримані наступні результати:

1) У разі якісної міжлистової ізоляції та якісного пресування постійна часу загасання вихрових струмів залишається незмінною близько 50 мкс, що відповідає нормальним питомим втратам 2,8-3,2 Вт/кг при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц. Магнітопровід придатний для експлуатації.

2) У разі якісної ізоляції та при ослабленому пресуванні постійна часу загасання вихрових струмів залишається відносно постійною 50-60 мкс, що відповідає питомим втратам 2,8-4 Вт/кг при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц. Кількість максимумів спектральної густини потужності зростає до трьох і більше. Магнітопровід вимагає технологічних операцій з усунення надмірного розпушування.

3) У разі суттєво порушеної ізоляції та одночасного розпушування магнітопроводу, постійна часу загасання вихрових струмів становить 120-140 мкс, що відповідає питомим втратам 8-10 Вт/кг. За відсутності механічної ударної дії постійна часу загасання вихрових струмів становить 80 мкс. Магнітопровід не підходить для експлуатації.

Рекомендується при розпушуванні для магнітопроводів невеликого розміру просочування клейким лаком ослабленої області та подальше сушіння при стиснутому сердечнику. Також для сердечників невеликого діаметру між натисною шайбою та крайніми листами сердечника через кожні 2...4 зубці забити текстолітові клини. При ослабленні пресування сердечників великих електричних машин, у яких пресування здійснюється стяжними шпильками, виконують підтяжку шпильок.

References

- Rudenberg R. Transient performance of electric power systems, First edition, New York 1950
- Yang, G.; Zhang, S.; Zhang, C. Analysis of Core Loss of Permanent Magnet Synchronous Machine for Vehicle Applications under Different Operating Conditions. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7232. <https://doi.org/10.3390/app10207232>
- N. Boubaker, D. Matt, P. Enrici, F. Nierlich and G. Durand, "Measurements of Iron Loss in PMSM Stator Cores Based on CoFe and SiFe Lamination Sheets and Stemmed From Different Manufacturing Processes," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 1, pp. 1-9, Jan. 2019, Art no. 8100309, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2877995>.
- S. Zhang, B. Ducharme, S. Takeda, G. Sebald, T. Uchimoto, Low-frequency behavior of laminated electric steel sheet: Investigation of ferromagnetic hysteresis loops and incremental permeability, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 538, 2021, 168278, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168278>.
- S. B. Shah, O. Osemwinyen, P. Rasilo, A. Belahcen and A. Arkkio, "Thermographic Measurement and Simulation of Power Losses Due to Interlaminar Contacts in Electrical Sheets," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 67, no. 11, pp. 2628-2634, Nov. 2018, <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2829321>.
- U. Aydin et al., "Rotational Single Sheet Tester for Multiaxial Magneto-Mechanical Effects in Steel Sheets," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 3, pp. 1-10, March 2019, Art no. 2001810, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2889238>.
- C. Urabinahatti, S. S. Ahmad and G. Narayanan, "Magnetic Characterization of Ferromagnetic Alloys for High Speed Electric Machines," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707819>.
- S.H. Nguedjang Kouakeuo, B. Ducharme, A. Solignac, L. Morel, M.A. Rault, B. Toutsop, Y.A. Tene Deffo, P. Tsafack, Non-invasive local magnetic hysteresis characterization of a ferromagnetic laminated core, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 527, 2021, 167783, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167783>.
- H. Zhao et al., "An Improved Core Loss Model of Ferromagnetic Materials Considering High-Frequency and Nonsinusoidal Supply," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 4336-4346, July-Aug. 2021, <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3072930>.
- I. Sirotić, M. Kovačić and S. Stipetić, "Methodology and Measurement Setup for Determining PWM Contribution to Iron Loss in Laminated Ferromagnetic Materials," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 5, pp. 4796-4804, Sept.-Oct. 2021, <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3094501>.
- M. C. Kulan, N. J. Baker, K. A. Liogas, O. Davis, J. Taylor and A. M. Korsunsky, "Empirical Implementation of the Steinmetz Equation to Compute Eddy Current Loss in Soft Magnetic Composite Components," in IEEE Access, vol. 10, pp. 14610-14623, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3148593>.
- Chumack, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Stulishenko, A., Ihnatiuk, Y. (2023). Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (123)), 54–63. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/282375>.
- Ostrovverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2(118)), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>.
- Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Bazenov, V., Ihnatiuk, Y., & Stulishenko, A. (2023). Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(5 (124)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286002>.

Надійшла (received) 23.10.2023

Відомості про авторів / About the authors

Чумак Вадим Володимирович (Chumak Vadim Vladimirovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (050) 208-38-43; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>; e-mail: chumack_kpi@ukr.net.

Коваленко Михайло Анатолійович (Kovalenko Mykhaylo) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Тимошук Оксана Леонідівна (Tymoshchuk Oksana) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", кафедра математичних методів системного аналізу навчально-наукового Інституту прикладного системного аналізу, тел.: 093-437-89-14; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095>; e-mail: oxana.tim@gmail.com.

Ігнатюк Євген Станіславович (Ihnatiuk Yevhen) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", асистент кафедри електромеханіки, тел.: (097)1125679; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-8728>; e-mail: yevhen.ihnatiuk@gmail.com.

Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna Yakivna) – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, тел.: (097) 939-96-73; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>; e-mail: 2048141@ukr.net.