



УДК 621.313.333.2

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-40

ОЦІНКА РІВНЯ ДЕФЕКТНОСТІ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ВИСОКОЧАСТОТНИМИ МЕТОДАМИ

Чумак В. В., к.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>
Тимошук О. Л., к.т.н., <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095>
Ігнатюк Є. С., інженер, <https://orcid.org/0000-0002-4675-8728>
Стулішенко А. С., інженер <https://orcid.org/0000-0001-9982-9246>
*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*
e-mail: chumack_kpi@ukr.net

Анотація - під час роботи електричної машини з шихтованими магнітопроводом, без пошкоджень, на частоті 50 Гц, основну складову втрат в активній сталі визначають втрати на гістерезис. При появі дефектів міжлистової ізоляції з'являється додатковий контур замикання вихрових струмів, що призводить до збільшення загальних магнітних втрат на перемагнічування, також перегріву магнітопроводу і машини в цілому. Втрати на вихрові струми зростають пропорційно квадрату частоти, в той час, коли втрати на гістерезис залишаються майже незмінними. Раніше відомі методи для контролю якості набраних сердечників вимагають багато часу і необхідних технічних навичок персоналу, тому питання спрощення визначення якості міжлистової ізоляції шихтованих магнітопроводів електричних машин є актуальним.

У даній статті експериментальним шляхом були визначені питомі втрати в досліджуваних дефектних і бездефектних магнітопроводах однієї серії, але різного габариту.

За допомогою польових методів в математичному пакеті COMSOL розраховано розподіл магнітної індукції при застосуванні нормативних методів випробувань магнітопроводу. Це дало можливість показати шляхи протікання магнітного потоку і визначити усереднену площу активної сталі при випробуваннях. Також на основі готової математичної моделі розраховано розподіл індукції по товщині листа на різних частотах в тому числі при впливі скін ефекту. На основі результатів розподілу втрат були побудовані залежності втрат на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводах з дефектною і бездефектною ізоляцією.

Запропоновано метод оцінки розвиненості контуру паразитних вихрових струмів високочастотними впливами при врахуванні поверхневого ефекту в шихтованих магнітопроводах електричних машин тороїдальної форми.

Ключові слова: висока частота, генератор високої частоти, поверхневий ефект, питомі втрати, розподілення втрат, вихровий струм, розподіл магнітної індукції.



Постановка 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 виготовлення 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.

Аналіз останніх досліджень. 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 [1,2], що називається вимірюванням петлі гістерезису. У цьому методі осердя 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[3].

Формулювання цілей статті. Визначення розподілу втрат в магнітопроводі на гістерезис та вихрові струми для шихтованих магнітопроводів ЕМ загального призначення на промислових і високих частотах.

Основна частина.

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 1 представлено розподіл магнітної індукції в магнітопроводі АД серії 4AA63B4Y3

0,37 кВт. Пікове значення індукції відповідає положенню обмотки збудження.

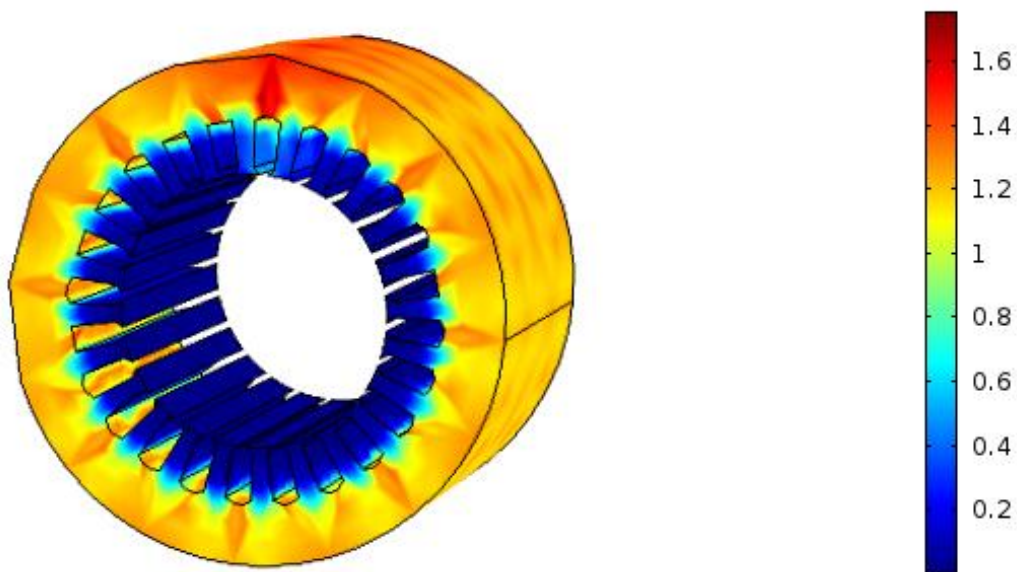


Рис. 1. Розподіл магнітної індукції у магнітопроводі АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт

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 сталі використовувалась висота лише спинки статора та те, що при розрахунку маси активної сталі розраховується лише маса спинки є теоретично і 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 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.

Розділення вимірних втрат на складові

Для цього було обрано метод Джордана, формула якого наступна:

$$p_{\text{СТ}} = p_{\text{Г}} + p_{\text{В}} = C_{\text{Г}} f \hat{B}^2 + C_{\text{В}} f^2 \hat{B}^2. \quad (1)$$

На основі результатів розподілу втрат було побудовано графік залежності кожного виду втрат від повного значення втрат для випадку без (рис. 4) та при наявності дефекту міжлистової ізоляції (рис. 5).

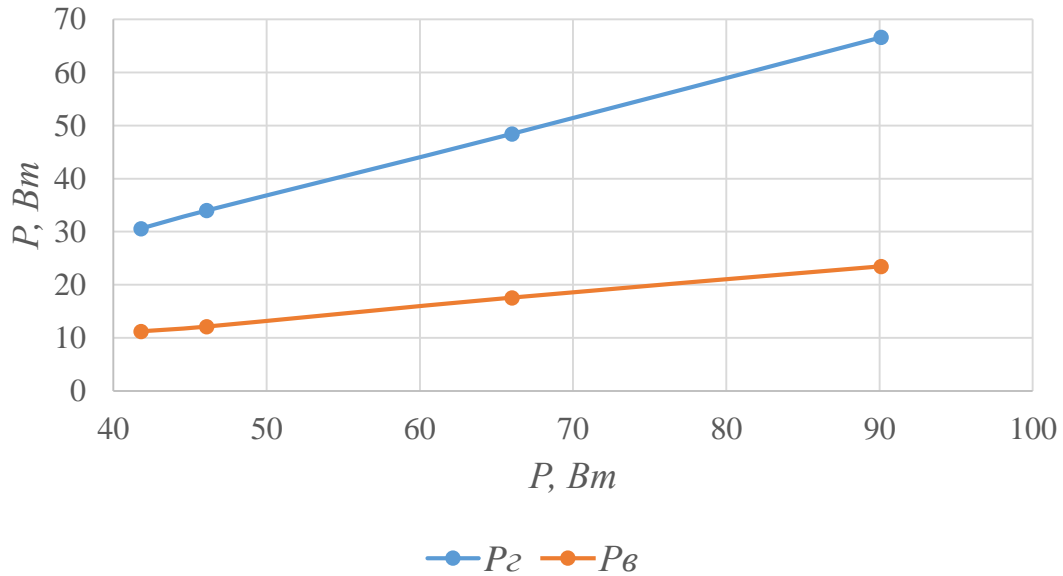


Рис. 4. Графік залежності обох складових втрат у сталі від повних втрат в сталі

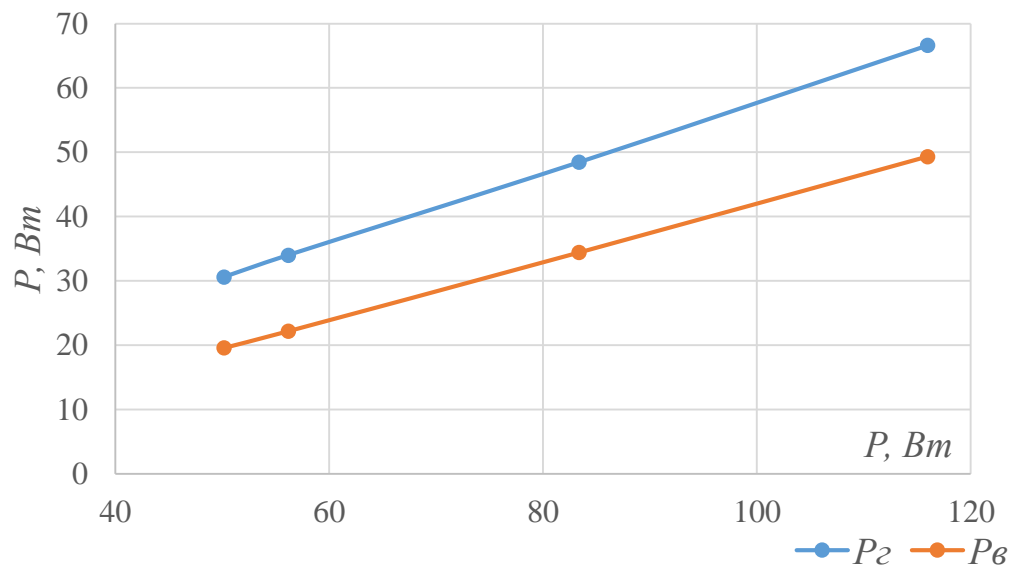


Рис. 5. Графік залежності обох складових втрат у сталі від повних втрат в сталі для випадку зі штучним дефектом

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 [5,6].



Запропонований метод досліджень

Як сказано вище, 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. 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 [7]. 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 наступною – на магнітопровід необхідно намотати декілька витків робочої обмотки, на яку буде подаватись живлення від генератора частоти та один виток виміральної обмотки.

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, яка описана вище, 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.

Результати досліджень.

Графік залежності напруги від частоти для магнітопроводу АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт показано на рисунку 6.

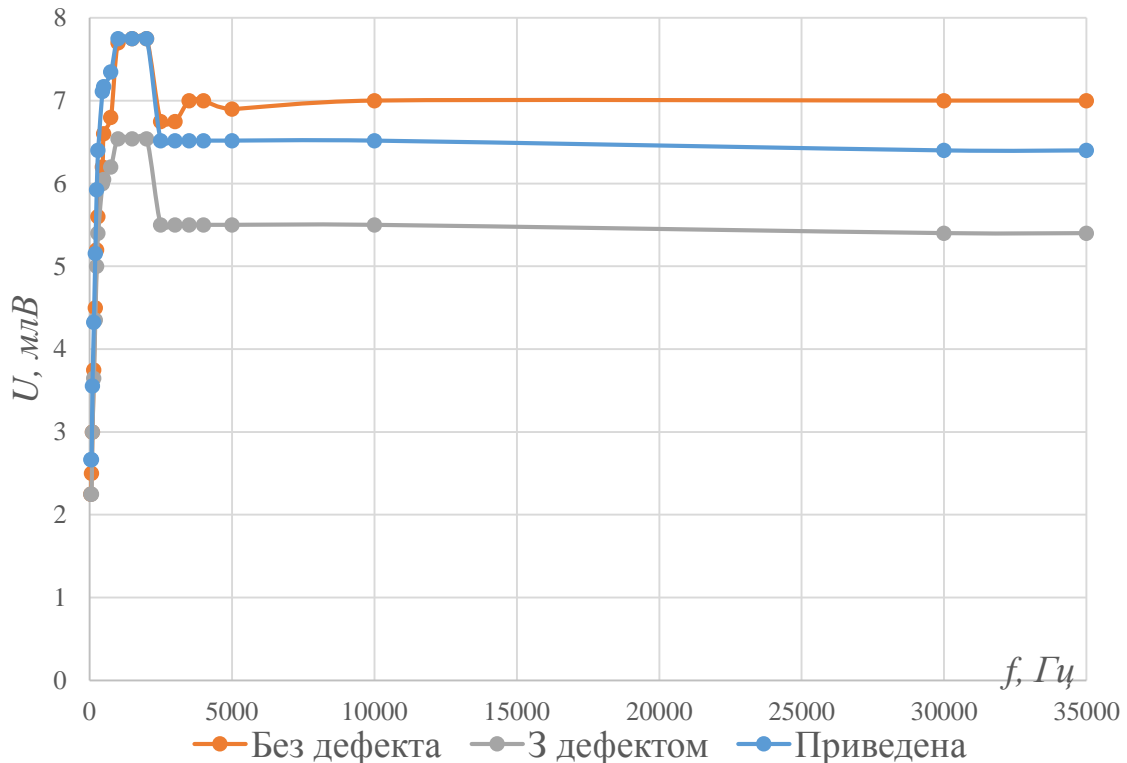


Рис. 6. Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для магнітопроводу АД серії 4АА63В4У3 0,37 кВт

Приведення виконувалось наступним чином, кожна точка кривої для випадку з витком було помножено на коефіцієнт, що являє собою відношення між значеннями у точці максимально значення напруги. У цьому випадку це точка 750 Гц, а визначення коефіцієнта представлено в рівнянні (2).

$$k = \frac{U_{\max. \text{без витка}}}{U_{\max. \text{з витком}}} = \frac{7,75}{6,54} = 1,1 \quad (2)$$

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 $3,92 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$, а з дефектом - $5,85 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$.

Графік залежності напруги від частоти для магнітопроводу АД 4А71В4У3 0,75 кВт показано на рисунку 7.

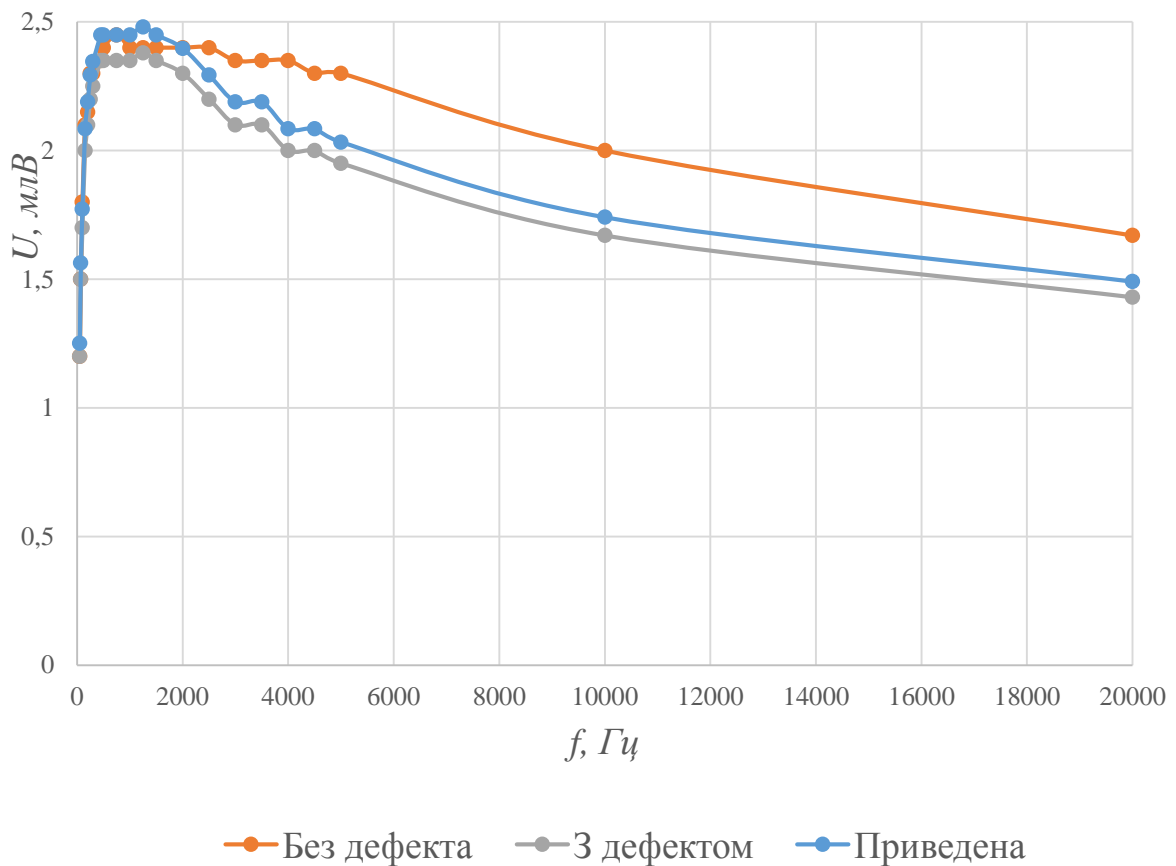


Рис. 7. Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для магнітопроводу АД серії 4A71B4Y3 0,75 кВт

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

Графік залежності напруги від частоти для частини магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 3 кВт показано на рисунку 8. У цьому випадку не знадобилося робити приведення, оскільки максимальне значення напруги співпадає для обох випадків.

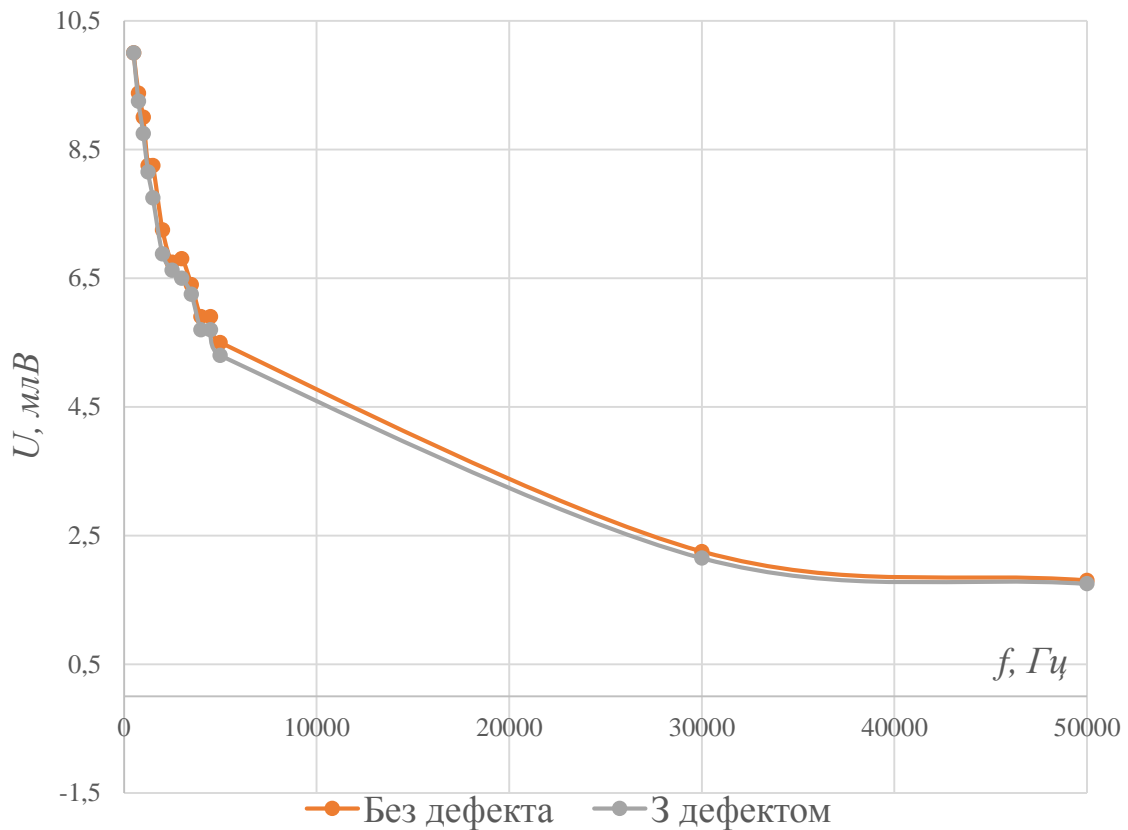


Рис. 8. Графік залежності напруги вимірювальної обмотки від частоти для частини магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 3 кВт

Аналіз результатів. Як видно з результатів експериментів, методика підтверджується стосовно того, що магнітопроводи з більшими питомими втратами мають менше значення напруги на вимірювальній обмотці [8,9]. Для магнітопроводу АД серії 4A90L2Y3 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.

Висновки. В результаті теоритичного та експериментального аналізу було визначено питомі втрати в шихтованих магнітопроводах електричних машин загального призначення різного ступеня дефектності.

За допомогою польової математичної моделі розраховано розподіл магнітного поля в магнітопроводі під час дослідження ватметровим методом, що візуально показало шляхи замикання силових ліній дозволило визначити середню індукцію і усереднений переріз магнітопроводу. Також на основі готової моделі розраховано



розподіл індукції по ширині листа на різних частотах, що наглядно відображає дію поверхневого ефекту.

Математичним методом проведено розділення втрат, отриманих під час реалізації ватметрового методу, на складові, з урахуванням мають припущення, що втрати на гістерезис не змінюються при погіршенні стану магнітопроводу. Аналіз розподілу втрат показав, що при погіршенні стану міжлистової ізоляції магнітопроводу збільшуються саме втрати на вихрові струми.

При експериментальному дослідженні неробочого ходу двигуна двигуна серії 4A100L6У3, доведено, що між питомими втратами окремо взятого магнітопроводу та втратами в сталі зібраної ЕМ існує пряма кореляція – погіршення стану ізоляції магнітопроводу, і як результат, збільшення його питомих втрат, що призводить до збільшення втрат у активної сталі.

Запропоновано високочастотний метод оцінки якості міжлистової ізоляції шляхом оцінки інтенсивності вихрових струмів в магнітопроводі на різних частотах.

Список 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. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. H. Jordan, “Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder,” *Elektrische Nachrichtentechnik*, vol. 1, p. 8, 1924.



8. R. Boll, Weichmagnetische Werkstoffe, 4th ed. Vacuumschmelze GmbH, Hanau, Germany, 1990, ISBN: 3800915464.

9. 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.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ДЕФЕКТНОСТИ ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ МЕТОДАМИ

В. В. Чумак, О. Л. Тимошук, Є. С. Ігнатюк, А. С. Стулішенко

Аннотація

Во время работы электрической машины с шихтованными магнитопроводом, без повреждений, на частоте 50 Гц, основную составляющую потерь в активной стали определяют потери на гистерезис. При появлении дефектов межлистовой изоляции появляется дополнительный контур замыкания вихревых токов, что приводит к увеличению общих магнитных потерь на перемагничивание, также перегрева магнитопровода и машины в целом. Потери на вихревые токи возрастают пропорционально квадрату частоты, в то время, когда потери на гистерезис остаются почти неизменными. Ранее известные методы для контроля качества наборных сердечников требуют много времени и необходимых технических навыков персонала, поэтому вопрос упрощения определения качества межлистовой изоляции шихтованных магнитопроводов электрических машин является актуальным.

В данной статье экспериментальным путем были определены удельные потери в исследуемых дефектных и бездефектных магнитопроводах одной серии, но разного габарита.

С помощью полевых методов в математическом пакете COMSOL рассчитано распределение магнитной индукции при применении нормативных методов испытаний магнитопровода. Это дало возможность показать пути протекания магнитного потока и определить усредненную площадь активной стали при испытаниях. Также на основе готовой математической модели рассчитано распределение индукции по толщине листа на разных частотах в том числе при влиянии скин эффекта. На основании результатов распределения потерь были построены зависимости потерь на гистерезис и на вихревые токи в магнитопроводах с дефектной и бездефектной изоляцией.

Предложен метод оценки развитости контура паразитных вихревых токов высокочастотными воздействиями при учете поверхностного эффекта в шихтованных магнитопроводах электрических машин тороидальной формы.

Ключевые слова: высокая частота, генератор высокой частоты, поверхностный эффект, удельные потери, распределения потерь, вихревой ток, распределение магнитной индукции.



EVALUATION OF THE DEFECT LEVEL OF ELECTRICAL MACHINES BY HIGH-FREQUENCY METHODS

V. Chumak, O. Tymoshchuk, Y. Ihnatiuk, A. Stulishenko

Summary

During operation of an electric machine with laminated magnetic core, without damage, at a frequency of 50 Hz, the main component of losses in active steel is determined by the hysteresis loss. At occurrence of defects in the interlayer insulation, an additional circuit of the eddy currents appears, which leads to an increase in the total magnetic losses on hysteresis, as well as overheating of the magnetic circuit and the machine as a whole. The eddy current losses increase in proportion to the square of the frequency, while the hysteresis losses remain almost unchanged. Previously known methods for quality control of dialed cores require a lot of time and the necessary technical skills of personnel, therefore, the question of simplifying the determination of the quality of the inter-sheet insulation of laminated magnetic cores of electrical machines is relevant.

In this article, experimentally determined the specific losses in the studied defect and defect-free magnetic cores of the same series, but of different size.

With the help of field methods in the mathematical package COMSOL, the distribution of magnetic induction is calculated with the application of the standard test methods of the magnetic core. This made it possible to show the paths of magnetic flux and to determine the average active steel area under test. Also, on the basis of the finished mathematical model, the distribution of induction over the sheet thickness at different frequencies, including the effect of the skin effect, is calculated. Based on the results of the loss distribution, the dependences of losses on hysteresis and eddy currents in magnetic circuits with defective and defect-free insulation were constructed.

A method is proposed for estimating the development of the contour of parasitic eddy currents by high-frequency effects taking into account the surface effect in laminated magnetic cores of toroidal electric machines.

Keywords: high frequency, high frequency generator, skin effect, specific losses, loss distributions, eddy current, magnetic induction distribution.