

ВРАХУВАННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ ЕФЕКТІВ В ОБМОТКАХ ПРИ РОЗРОБЦІ СИЛОВИХ ДРОСЕЛІВ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Роботу присвячено дослідженню вихрострумів, що виникають у провідниках обмоток силових дроселів імпульсних пристроїв перетворювальної техніки. Викладено вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості на енергетичні та масогабаритні показники силових дроселів з феромагнітними осерддями.

Ключові слова: силовий дросель, поверхневий ефект, ефект близькості.

Abstract

The article is devoted to the study of eddy current phenomena occurring in conductors of winding of power inductor of impulse devices of conversion technique. Is presented the influence of the skin-effect and the effect of proximity on the energy and mass parameters of power chokes with ferromagnetic cores.

Keywords: power inductor, skin-effect, effect of proximity.

Вступ

В сучасній електроенергетиці відбувається швидкий розвиток пристроїв силової перетворювальної техніки. Зокрема це стосується різних типів імпульсних перетворювачів, які знайшли широке застосування у різних сферах техніки у сонячній електроенергетиці, керованому приводі, стабілізованих джерел живлення різної напруги та потужності тощо [1-3].

Цьому сприяє бурхливий розвиток силових напівпровідникових компонентів, що спостерігається у сьогоднішній, який дозволяє постійно збільшувати робочі струми та частоти нових електронних пристроїв. Оскільки дроселі входять до складу практично всіх силових вузлів пристроїв силової електроніки, вони також потребують вдосконалення. До того ж дроселі, як правило, є найбільш громіздкими та дорогими елементами потужних пристроїв, що призводить до неефективного використання простору.

Тому вдосконалення конструкцій дроселів, що призводить до зменшення їх розмірів та вартості, чинить значний вплив на покращення конструктивних параметрів всієї системи силової електроніки. Основним шляхом зменшення габаритів силових дроселів є збільшення частоти перемикання силових ключів пристроїв перетворювальної техніки. За таких умов збільшується вплив вихрострумів ефектів у провідниках обмоток (поверхневого ефекту та ефекту близькості) на енергетичні параметри дроселів та й усього пристрою. Особливо актуальною задачею є врахування таких ефектів на стадії проектування пристроїв перетворювальної техніки.

Метою пропонованої роботи є оцінка втрат в силових дроселях внаслідок вихрострумів ефектів та пошуку їх мінімізації.

Результати дослідження

Одним з найважливіших параметрів роботи силового дроселя, який визначає його масо-габаритні показники та енергоефективність роботи, є втрати енергії у ньому за номінального режиму роботи відповідного пристрою перетворювальної техніки. Втрати в індукторах на феромагнітних осерддях поділяють на два типи: втрати в осердді та обмотках [4-6]. І якщо для втрат в осерддях оцінка їх величини досить точно визначена розробниками феромагнітних матеріалів у відповідній технічній документації до виробів, то з оцінкою втрат в обмотках моточних виробів справа виглядає значно складніше. Оцінка втрат в обмотках силових дроселів, у яких протікають пульсуючі з високою частотою та значною амплітудою струми, неможлива без врахування вихрострумів ефектів, які умовно можна поділити на поверхневий ефект та ефект близькості. Природа цих ефектів однакова і

полягає у явищі виникнення вихрових струмів [4–9].

Поверхневий ефект або скін-ефект – це явище нерівномірного розподілу струму всередині поперечного перерізу провідника таким чином, що щільність струму зменшується при віддаленні від зовнішньої поверхні провідника. Скін-ефект викликає підвищення ефективного опору провідника на більш високих частотах, де глибина проникнення струму менша, тим самим зменшуючи ефективний перетин провідника. Поверхневий ефект обумовлений протилежними вихровими струмами, викликаними змінним магнітним полем, що виникає внаслідок протікання пульсуючого струму (рис. 1).

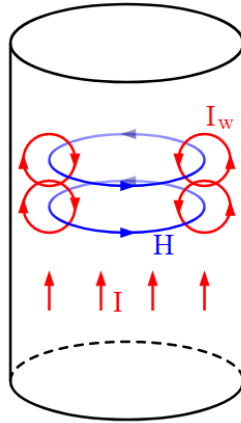


Рис. 1 Ілюстрація явища поверхневого ефекту

З теорії електротехніки відомо, що глибина щільність змінного струму зменшується від поверхні циліндричного провідника до середини за експоненціальним законом, а певну товщину можна вважати глибиною проникнення струму δ , під якою розуміють відстань від поверхні, на якій щільність струму зменшилась в e раз:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\mu_0\pi f}}, \quad (1)$$

де ρ – питомий опір, μ – відносна магнітна проникність матеріалу провідника, μ_0 – магнітна стала, f – частота зміни електричного струму.

На рис.2 подано залежність глибини проникності струму у мідному провіднику від частоти у логарифмічному масштабі.

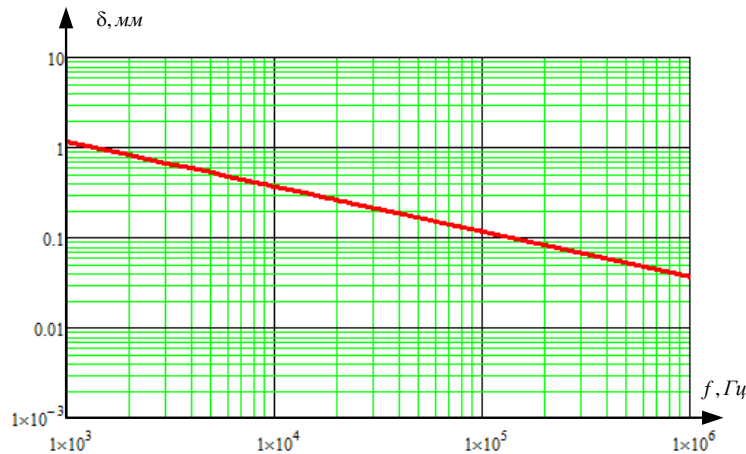


Рис. 2 Залежність зміни глибини проникності струму у мідному провіднику від частоти

Таким чином утворюється ефективний переріз провідника. При проектуванні силових дроселів необхідно дотримуватись, щоб радіус провідника був меншим за глибину проникнення струму. Якщо необхідний переріз більший за переріз провідника, то обмотку виконують пучком ізольованих провідників (літцендрат), діаметр яких задовольняє цій умові. Кількість та діаметр провідників у літцендраті вибирають з допустимих втрат та заповнення вікна для обмотки в осерді.

Окремим способом виготовлення обмотки є використання мідної фольги товщиною менше за величину 2δ . Такий спосіб дозволяє отримати більшу щільність намотки, але у такому виконанні більш складніше уникнути впливу іншого вихрострумовевого ефекту – ефекту близькості. Відмінністю цього ефекту від поверхневого полягає у тому, що на розподіл щільності змінного струму у провіднику впливає не магнітне поле, створене власним струмом, а стороннє. Це може бути поле, створене струмом у сусідніх провідниках або ж поле у повітряному зазорі осердя. Якщо величина повітряного зазору досить велика то силові лінії магнітного поля у ньому будуть проходити у тому числі й через провідники обмотки, що знаходяться біля проміжку (рис. 3).

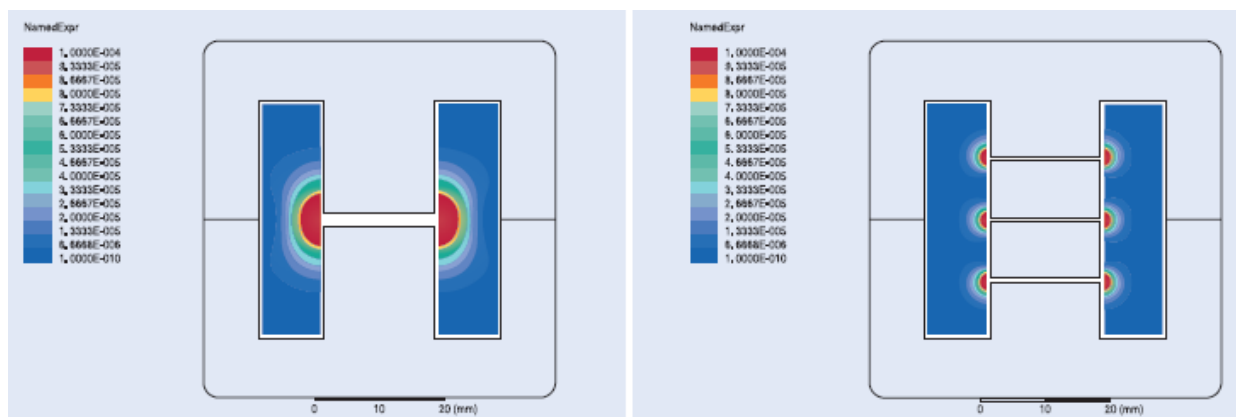


Рис. 3 Розподіл магнітного поля у повітряному зазорі Е-подібного феритового осердя

Як видно на рис. 3 (ліворуч) магнітне поле у зазорі Е-подібного осердя випучується далеко у, вікно призначене для обмотки. В провідниках, що пронизуються силовими лініями цього поля виникають вихрові струми, які збільшують втрати у обмотці та зменшують ефективний переріз провідника. Вирішення цієї задачі можна здійснити формуванням обмотки за певною формою, виключаючи зони близькі до зазору, або ж шляхом розділення повітряного зазору на декілька проміжків рис. 3, праворуч.

Перший шлях зменшує ефективне використання вікна для обмотки, що призводить до збільшення масо-габаритних розмірів дроселя, що є дуже небажаним. Другий шлях позбавлений цього недоліку, але ускладнює виробництво дроселів з феритовими осердями, які важко обробляються внаслідок крихкості цього матеріалу, та збільшує в кінцевому випадку вартість виробу. Провідні виробники феромагнітних виробів (наприклад Epcos TDK) пропонують осердя з розподіленим зазором, однак їх вартість у рази більша за вартість осердя без зазору або стандартним зазором і є важкодоступним на вітчизняному ринку.

Вибір кількості та величини повітряних зазорів осердя є складною емпіричною задачею, вирішення якої дозволяє забезпечити мінімальні втрати при найменших витратах на виробництво, тобто найменшій кількості зазорів. Вирішення цих задач найзручніше й найдоцільніше виконувати засобами імітаційного моделювання магнітних полів, наприклад Elcut або Comsol Multi-physics.

Висновки

Таким чином, у роботі встановлено, що вихрострумові явища, такі як поверхневий ефект та ефект близькості, які виникають в обмотках силових дроселів пристроїв перетворювальної техніки значним чином впливають на втрати енергії у них. Врахування цих явищ є обов'язковим при проектуванні силових дроселів, виборі їх основних конструкційних елементів та способу виконання обмоток. Наведено конструкційні способи зменшення втрат від вихрострумовевого явищ в обмотках чілових дроселів та означено важливість врахування цих ефектів у майбутніх розробках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Семенова Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 416 с.
2. Keith Billings: Switch mode power supply handbook Mc Graw Hill, 1989, ISBN 0-07-005330-8
3. Schmidt-Walter.H/Kories.R: Taschenbuch der Elektrotechnik Verlag Harri Deutsch, 1998, ISBN 3-8171-1563-6

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. М.: Высш. школа, 1973. 752 с.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. Л.: Энергоиздат, 1981.- 536с.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2.-Л.: Энергоиздат, 1981.- 416с.
7. C. R. Sullivan Optimal Choice for Number of Strands in a Litz-Wire Transformer Winding IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 2, pp. 283– 291
8. Balakrishnan A, Joines W T, and Wilson T G, “Air-Gap Reluctance and Inductance Calculations for Magnetic Circuits Using a SchwarzChristoffel Transformation”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, no 4., pp. 654-63, 1997.

Коваль Андрій Миколайович — асистент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Остапюк Юрій Михайлович — студент групи ІЕМ-186 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет.

Andriy M. Koval— Department of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measuring, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Yuriy M. Ostapuk — Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia