

АНАЛІЗ МЕТОДИК ТА МОДИФІКАЦІЯ ІСНУЮЧИХ ВИРАЗІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ВТРАТ ДРОСЕЛІВ НА УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЧАСТОТАХ

Середін А.П., аспірант, м.н.с.; Мовчанюк А.В., к.т.н., доцент

Національний технічний університет України

«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Пристрої потужного ультразвуку широко застосовуються у сучасній промисловості для вирішення завдань зі зварювання матеріалів, очищення поверхонь, точної обробки надтвердих матеріалів і т.д. Тому одним із актуальних питань залишається збільшення *ККД* потужного ультразвукового обладнання [1].

Енергетичну ефективність роботи ультразвукового пристрою визначає *ККД* узгоджуючого фільтра, який використовується для узгодження вихідного опору ультразвукового генератора з вхідним опором п'єзовипромінювача та для фільтрації гармонік вихідної напруги. Основним елементом цих фільтрів є один чи декілька дроселів, що встановлюються між генератором і ультразвуковим перетворювачем, таким чином втрати в дроселі суттєво впливатимуть на енергетичну ефективність ультразвукової апаратури.

Розглянемо дві найбільш поширені аналітичні методики для розрахунку опору обмотки змінному струму, запропоновані *Dowell* [2] та *Ferreira* [3]. Обидві методики базуються на представленні обмотки у вигляді шарів тонкої фольги з кількістю шарів, рівним кількості шарів обмотки. Від фольги здійснюється перехід до прямокутних провідників, потім до круглих провідників еквівалентного перерізу.

За *Dowell* для оцінки опору провідника обмотки змінному струму було представлено аналітичний вираз (1).

$$K_f = \Delta \cdot \frac{\sinh(2 \cdot \Delta) + \sin(2 \cdot \Delta)}{\cosh(2 \cdot \Delta) - \cos(2 \cdot \Delta)} + \frac{2 \cdot \Delta}{3} \cdot (m^2 - 1)^2 \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)}, \quad \Delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{d}{\delta} \quad (1)$$

де: K_f — коефіцієнт, що виражає величину втрат обмотки; m — кількість шарів обмотки; Δ — допоміжний коефіцієнт, що враховує відношення діаметра провідника без ізоляції d до товщини скін-шару δ .

Аналіз виразу показав, що не враховано вплив товщини ізоляції провідника чи примусового кроку намотування, окрім того, не враховується ефект близькості для одношарової обмотки, оскільки при $m=1$ права частина виразу стає рівною нулю.

Ferreira запропонував покращений вираз *Dowell*, врахувавши товщину ізоляції провідника введенням коефіцієнта η , що визначає відношення

зовнішнього діаметра дроту D до діаметра струмопровідної жили d , також при одношаровій обмотці враховано міжшаровий ефект близькості (2).

$$K_f = \frac{\Delta}{2} \cdot \frac{\sinh(\Delta) + \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) - \cos(\Delta)} + \frac{\Delta}{2} \cdot \eta^2 (2m-1)^2 \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)}, \quad \eta = \frac{D}{d} \quad (2)$$

Аналіз виразів (1) та (2) показав, що в обох випадках не враховано вплив діаметра каркасу та його довжини. Варто додати, що методики не враховують спотворення шляхів протікання струму по перерізу провідника при скручуванні у кільце. Це пояснює, чому розраховані за вищеописаними методиками обмотки дроселів значно перегрівалися, що і поклало початок пошуку шляхів покращення цих методик.

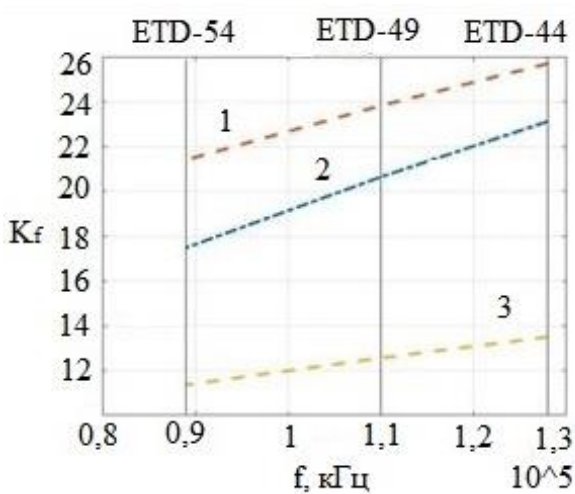


Рисунок 1. Значення величини K_f для двошарової обмотки з МГТФ: 1 — за Dowell; 2 — експериментальні дані; 3 — за Ferreira

Було проведено ряд експериментальних досліджень з вимірювання опору втрат 1–3-шарових обмоток для трьох типів провідників з різною товщиною ізоляції, виконаних на трьох поширених типорозмірах каркасів. Отримані результати були порівняні з розрахунковими. На рис.1 представлено результати порівняння на прикладі двошарової обмотки, виконаної провідником МГТФ. Із рисунку видно, що результати розрахунків за обома методиками значно розходяться з експериментальними.

Після аналізу методик здійснено модифікацію виразу Ferreira шляхом введення поправки на скін-ефект та кільцевий ефект. Поправки полягали у заміненні коефіцієнта Δ перед першою частиною виразу на Δ_{mod} , що покращило врахування скін-ефекту, а також домножено на 2 дану частину виразу, що включає у розрахунок поправку на кільцевий ефект (згідно з дослідженнями Фока [4]). Модифікований вираз представлено нижче (3).

$$K_f = \Delta_{\text{mod}} \cdot \frac{\sinh(\Delta_{\text{mod}}) + \sin(\Delta_{\text{mod}})}{\cosh(\Delta_{\text{mod}}) - \cos(\Delta_{\text{mod}})} + \frac{\Delta}{2} \cdot \eta^2 (2m-1)^2 \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)} \quad \Delta_{\text{mod}} = \frac{\Delta}{\sqrt{\eta}} \quad (3)$$

В результаті обробки даних показано, що модифікований вираз значно краще апроксимує експериментальні дані, ніж вирази Dowell та Ferreira (рис.2). Для порівняння: для найбільш поширених типорозмірів осердь ETD-44, ETD-49, ETD-54 розбіжність між експериментальними даними та виразом Ferreira до модифікації складала відповідно 42%, 37% та 38%.

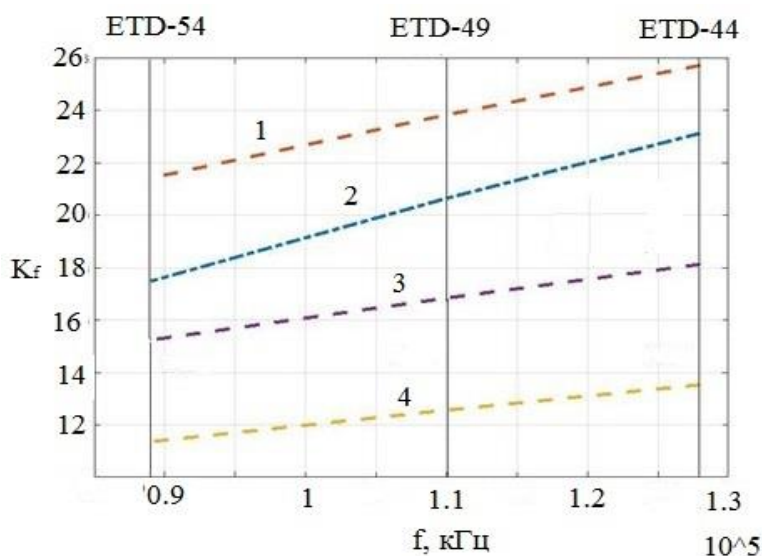


Рисунок 2. Значення величини K_f для двохшарової обмотки з МГТФ: 1 — за Dowell; 2 — експериментальні дані; 3 — за Ferreira; 4 — модифікований Ferreira.

Після модифікації розбіжність скоротилася до 22%, 17% та 12% відповідно. Таким чином, точність модифікованого виразу *Ferreira* зросла на 20 – 26% (залежно від типорозміру осердя). Розробка універсальної методики оптимізації конструкції дроселя в ультразвуковому діапазоні частот, з використанням результатів даного дослідження та підходу, запропонованого *Фоком* [3], є перспективним напрямком досліджень.

Перелік посилань

1. Kotic S. Ultrasonic measurement and technologies/ S. Kotic, Z. Figura. — London: Chapman and Hall, 1996. — 356 p.
2. Dowell P.L., Effects of eddy currents in transformer winding, Proc. IEE., vol. 113, no.8, pp.1387-1394, August 1966.
3. Ferreira J.A., Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components, IEEE Transactions on power electronics, vol.9, no.1, pp.127-134, January 1994.
4. Фок В.А. Скин-эффект в кольце круглого сечения. Журнал русского физико-химического общества. Часть физическая. 1930. Том LXII. Вып.3. С.281-297.

Анотація

Представлено короткий аналіз методик розрахунку втрат обмоток узгоджуючих дроселів ультразвукових генераторів на прикладі виразів *Dowell* та *Ferreira*, за результатами якого та проведених експериментальних вимірювань запропоновано модифікацію розрахункового виразу *Ferreira* для найбільш поширених типорозмірів осердь, окреслено перспективи розвитку дослідження.

Ключові слова: узгоджуючий дросель, скин-ефект, ефект близькості.

Abstract

A brief analysis of methods for calculating winding losses of matching chokes of ultrasonic generators on the example of *Dowell* and *Ferreira* expressions, based on the results of which and experimental measurements proposed a modification of the calculated expression *Ferreira* for the most common core sizes, outlines the prospects.

Keywords: matching choke, skin effect, proximity effect.