

А. П. Середін¹
А. В. Мовчанюк¹

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ОПІР ВТРАТ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проаналізовано одну з поширених аналітичних методик (Ферера) для розрахунку втрат обмоток індуктивних елементів, зокрема тих, що працюють на частотах до 100 кГц, визначено основні недоліки цієї методики — нехтування впливу геометрії обмотки індуктивного елемента (зокрема і кількості витків) на величину втрат, виражену через безрозмірний коефіцієнт K_f . Теоретично, це є причиною появи некоректного результату розрахунку за цією методикою. Для перевірки припущення виконано експериментальне дослідження впливу довжини одношарової обмотки (кількості витків) на величину втрат. Досліджено одношарові обмотки фіксованого діаметра з різними діаметрами провідників, на різних частотах, без осердя та з феромагнітним осердям. Визначено, що використовувати розглянуту аналітичну методику для розрахунку втрат одношарової обмотки можливо за умови, що обмотка без осердя, з кількістю витків $N \geq 30$, а отриманий результат скореговано на відповідну величину (до 20,5 % залежно від частоти та діаметра провідника). Виявлено, що збільшення діаметра провідника призводить до збільшення втрат обмотки (цей приріст складає 67 % у разі збільшення діаметра удвічі). Досліджуючи обмотки з осердям, виявлено значне збільшення величини втрат обмотки, яке перевищувало розрахункові значення більше ніж удесятеро. Встановлено, що ймовірною причиною такої значної розбіжності є вплив зміни конфігурації силових ліній магнітного поля у разі внесення феромагнітного осердя в обмотку, що, зі свого боку, змінює форму та площу провідної частини провідника. Визначено також, що за таких умов вплив втрат в осерді на зміну втрат в обмотці незначний (до 3 %), і ним можна знехтувати. Досліджено вплив осердя на конфігурацію силових ліній магнітного поля та відповідно і на розподіл струму у провіднику. Виконано дослідження для обмотки без осердя, та з осердям. Встановлено, що вибрану аналітичну методику розрахунку не можна використовувати для розрахунку одношарових обмоток з осердям.

Ключові слова: опір втрат, одношарова обмотка, добротність, міжвитковий ефект близькості, аналітичні методики розрахунку опору втрат, втрати в осерді.

Вступ

На практиці досить часто виникає потреба у розрахунку індуктивних елементів, зокрема і одношарових обмоток, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот. Зазвичай, такі індуктивні елементи працюють як дроселі в узгоджувальних фільтрах потужного ультразвукового обладнання [1], накопичувальні дроселі, дроселі вихідних фільтрів імпульсних джерел живлення [2]. Важливим параметром індуктивних елементів є величина втрат, коректність розрахунку яких напряму впливає на енергетичну ефективність (ККД) силових пристроїв.

Існує два підходи до розрахунку величини втрат індуктивних елементів залежно від способу подання впливу скін-ефекту та ефекту близькості на величину втрат обмотки та представлення графоаналітичними та аналітичними методами.

Графоаналітичні методики ґрунтуються на застосуванні коефіцієнтів, які розраховуються за графіками, отриманими емпіричним шляхом для конкретних параметрів обмоток. Недоліком таких методик є обмеженість застосування в межах тих параметрів, для яких отримано коефіцієнти та неможливість проведення оптимізації [3].

В аналітичних методиках, на відміну від графоаналітичних, у розрахункових виразах опис впливу на величину втрат тих чи інших факторів відбувається безпосередньо з використанням конкретних геометричних параметрів обмотки, а не емпірично розрахованих коефіцієнтів. Голов-

ною перевагою таких методик є можливість проведення оптимізації геометричних параметрів з метою отримання найменшої величини втрат. Відомі наразі аналітичні методики представлені методикою Доуела (Dowell) [4] та її модифікованим варіантом — методикою Ферери (Ferrera) [5].

В обмотках індуктивних елементів величину втрат оцінюють, зазвичай, за безрозмірною величиною K_f

$$K_f = \frac{Rac}{Rdc}, \quad (1)$$

де Rac — опір обмотки змінному струму (дійсна частина комплексного опору) на частоті f ; Rdc — опір обмотки постійному струму.

Методику [4] у цьому дослідженні розглядати не будемо, оскільки аналіз її розрахункового виразу в роботі [6] показав, що для одношарової обмотки не враховуються втрати як від ефекту близькості, спричиненими взаємним впливом сусідніх витків, так і від ефекту близькості як таким взагалі, що вносить суттєву похибку у кінцевий результат.

Цей недолік виправлено у методиці [5], яка є модифікованим варіантом методики [4]. Розглянемо та проаналізуємо розрахунковий вираз цієї методики.

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

де $\eta = d/D$ — допоміжний коефіцієнт, D — зовнішній діаметр провідника; m — кількість шарів обмотки; $\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{d}{\delta}$ — допоміжний коефіцієнт, d — діаметр провідника без ізоляції, δ — товщина скін-шару.

Лівий та правий доданки виразу (2) описують вплив на величину втрат обмотки скін-ефекту та ефекту близькості відповідно. У цій методиці модифіковано правий доданок шляхом введення поправки для врахування ефекту близькості для одношарової обмотки, за якого права частина виразу не дорівнює нулю, на відміну від виразу методики [4]. Також враховано вплив товщини ізоляції провідника (примусовий крок намотування) шляхом введення коефіцієнта η . Можливою причиною появи невідповідності між результатами теоретичних розрахунків за методикою [5] та експериментальними результатами може бути нехтування впливом геометричних параметрів обмотки, зокрема, її довжини (кількості витків N) обмотки на величину втрат K_f .

Мета дослідження — визначення впливу довжини (кількості витків N) одношарової обмотки індуктивного елемента на величину втрат K_f .

Основна частина

Дослідимо вплив довжини одношарової обмотки (кількості витків) на величину її втрат. Для цього проведемо порівняння результатів теоретичних розрахунків за методикою [4] та відповідних результатів експериментальних досліджень. Експериментальна частина складатиметься з натурних експериментальних вимірювань та машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу, що дозволить зробити вимірювання для широкого діапазону кількості витків. Основною причиною вибору такого підходу є наявність обмежень по кількості витків як для натурального вимірювання, так і для машинного експерименту. Виявлено, що наявними вимірювальними приладами з достатньою точністю можна виконати вимірювання необхідних для розрахунку величини K_f параметрів лише для кількості витків $N \geq 20$. Для меншої кількості витків на точність результатів починає впливати похибка приладу. Щодо машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу, максимальна кількість витків, яку можна змоделювати за таких параметрів ПК не перевищує $N \leq 25$. Тому, за такої організації експериментальної частини, важливо переконатися в достовірності результатів машинного експерименту. Порівняємо результати розрахунку величини K_f для машинного експерименту та відповідного натурального вимірювання для одношарової обмотки діаметром $D = 10$ мм, яка складається з $N = 25$ витків, виконаних провідником діаметром $d = 1$ мм, відстань між сусідніми витками дорівнює подвійній товщині ізоляції провідника. Натурні вимірювання виконаємо LCR/ESR-метром типу BK Precision моделі 886 на трьох частотах —

$f_1 = 1$ кГц, $f_2 = 10$ кГц, $f_3 = 100$ кГц (у подальших дослідженнях натурні вимірювання, машинне моделювання та теоретичні розрахунки виконуватимемо на вказаних частотах). Результати натурального вимірювання: $K_{f1} = 1,032$; $K_{f2} = 1,197$; $K_{f3} = 3,11$. Результати машинного експерименту для даної обмотки: $K_{f1} = 1,13$; $K_{f2} = 1,34$; $K_{f3} = 3,29$. Відносна розбіжність результатів натурального вимірювання та машинного експерименту складає від 5,5% до 10,7% залежно від частоти, що пояснюється похибкою вимірювання. Таким чином, робимо висновок, що машинний експеримент з достатньою точністю дозволяє розрахувати величину K_f в одношаровій обмотці, тому в експериментальній частині дослідження натурні вимірювання доповнимо машинним експериментом.

1. Дослідження впливу довжини (кількості витків) одношарової обмотки без осердя на величину втрат

Як результат аналізу розрахункового виразу аналітичної методики [5], встановлено, що однією з причин отримання некоректного результату розрахунку є нехтування геометричними параметрами обмотки, зокрема, й кількістю витків (довжиною намотки). Дослідимо вплив цього параметра на величину втрат обмотки, вираженого через безрозмірний коефіцієнт K_f . Проведемо експериментальні вимірювання для одношарової обмотки без осердя з фіксованим діаметром $D = 10$ мм, для діаметрів провідників d (0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм) на частотах f (1 кГц, 10 кГц, 100 кГц). Вимірювання виконаємо для кількості витків в обмотці N (1...50), відстань між сусідніми витками стала і дорівнює подвійній товщині ізоляції провідника. Виконаємо теоретичний розрахунок величини $K_{f_ferrera}$ для вказаних параметрів обмотки за розрахунковим виразом методики [5] та порівняємо з отриманими експериментальними результатами K_{f_exp} (рис. 1а—в).

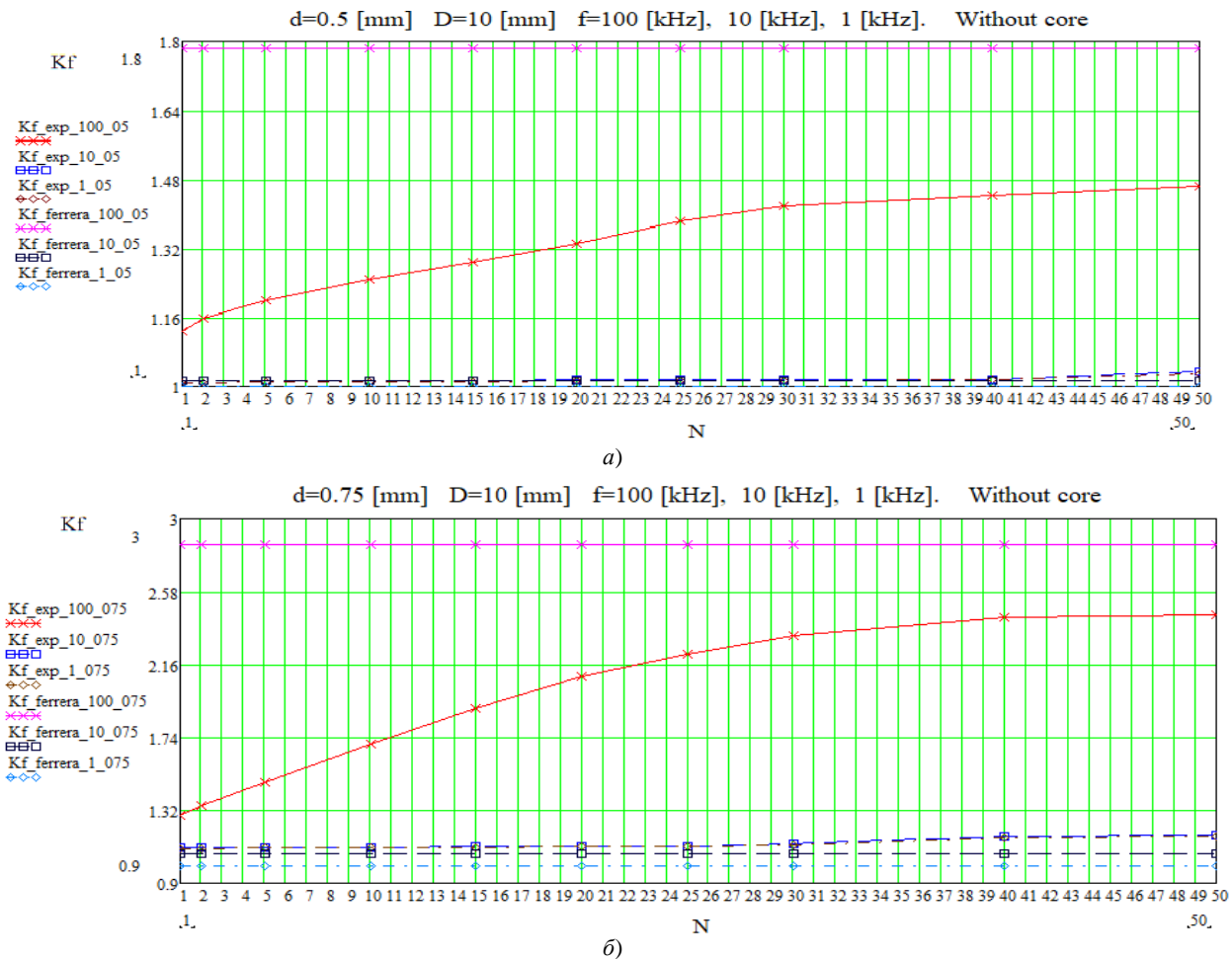
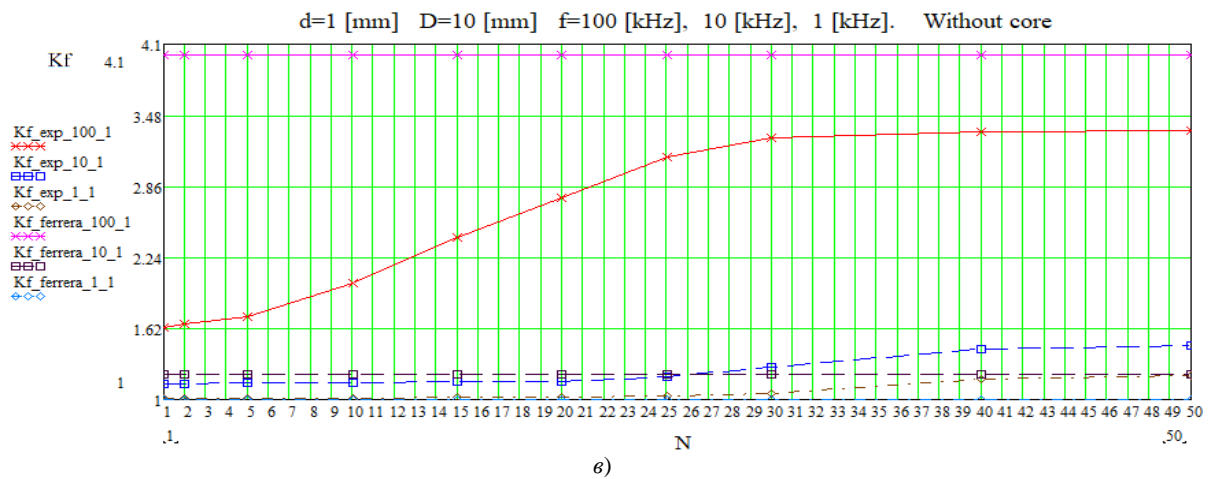


Рис. 1. Залежність величини K_f від кількості витків N одношарової обмотки без осердя для експериментальних та теоретичних розрахунків для провідників діаметром: а — $d = 0,5$ мм; б — $d = 0,75$ мм



Продовження рис. 1. Залежність величини K_f від кількості витків N одношарової обмотки без осердя для експериментальних та теоретичних розрахунків для провідників діаметром: $\varphi - d = 1$ мм

Бачимо, що для всіх трьох випадків (рис. 1а—в), крива, що описує експериментально отриману величину K_{f_exp} зростає зі збільшенням кількості витків N . Очевидно, це пов'язано зі зміною індукції магнітного поля, утвореного протіканням струму у провідниках обмотки, яка зростає зі збільшенням кількості витків, що і впливає на величину втрат. Проте, починаючи з певної кількості витків N , зростання величини опору втрат (кривої K_{f_exp}) припиняється та виходить на певний сталий рівень, що майже не залежить від кількості витків. У цьому випадку обмотка починає поводити себе як соленоїд (довжина обмотки у ньому набагато перевищує діаметр), вздовж осі якого встановлюється однорідне магнітне поле, величина якого не залежатиме від кількості витків, відповідно і рівень втрат також не змінюватиметься. Для розглянутих параметрів обмотки, зазначене припинення збільшення K_{f_exp} відбувається за кількості витків $N \geq 30$ для всіх трьох розглянутих діаметрів провідників на трьох частотах. Значимо, що у межах від $N = 30$ до $N = 50$ зростання величини K_{f_exp} є незначним (від 2 % до 5 % залежно від частоти та діаметра провідника), тобто вважатимемо, що в цьому випадку величина K_{f_exp} є сталою.

Порівняємо величину K_{f_exp} , отриману експериментально, з теоретично розрахованою величиною $K_{f_ferrera}$ для вказаних параметрів обмотки. З графіків бачимо, що на усіх розглянутих частотах та діаметрах провідників крива, що описує величину $K_{f_ferrera}$ не залежить від кількості витків, що очевидно, оскільки у методиці [5] знехтувано впливом кількості витків N на опір втрат. Відмітимо, що для одношарових обмоток без осердя, з кількістю витків $N \geq 30$, відносне відхилення величини $K_{f_ferrera}$ та K_{f_exp} не змінюється з ростом кількості витків, та сягає 20,5 % залежно від конкретного діаметра провідника та частоти. Отже, розрахункові вирази методики [4] все ж можна використовувати для розрахунку опору втрат одношарових обмоток, однак за умови, що обмотка без осердя, кількість витків такої обмотки складає $N \geq 30$, а кінцевий результат розрахунку буде скореговано з урахуванням вищевказаної величини відносного відхилення величин $K_{f_ferrera}$ та K_{f_exp} .

Також зазначимо, що зі збільшенням діаметра провідника, зростають відповідно і втрати обмотки, причому найбільший приріст спостерігається на частоті $f = 100$ кГц — у разі збільшення діаметра провідника з $d = 0,5$ мм до $d = 1$ мм максимальне значення величини K_{f_exp} (коли $N = 50$) зростає майже удвічі, однак за частоти $f = 10$ кГц цей приріст складає лише 30 %. Пояснюється це зростанням впливу скін-ефекту на опір втрат зі збільшенням діаметра провідника.

2. Дослідження впливу довжини (кількості витків) одношарової обмотки з феромагнітним осердям на величину втрат

Індуктивні елементи з одношаровими обмотками без осердя досить рідко використовуються у силових пристроях, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот, головним чином, через неве-

ликі значення індуктивностей. Поширенішими у цих пристроях є індуктивні елементи з одношаровими обмотками з осердям із феромагнітних матеріалів. Дослідимо вплив кількості витків N цієї обмотки на опір втрат, вираженого через безрозмірний коефіцієнт K_f . Проведемо експериментальні вимірювання для одношарової обмотки з осердям марки 600НН у вигляді круглого стержня діаметром $D = 10$ мм, для діаметрів провідників d (0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм) на частотах f (1 кГц, 10 кГц, 100 кГц). Вимірювання виконаємо для кількості витків в обмотці N (1...70), відстань між сусідніми витками стала та дорівнює подвійній товщині ізоляції провідника. Виконаємо теоретичний розрахунок величини $K_{f_ferrera}$ для вказаних параметрів обмотки за розрахунковим виразом методики [5] та порівняємо з отриманими експериментальними результатами $K_{f_exp_core}$ (рис. 2а—в).

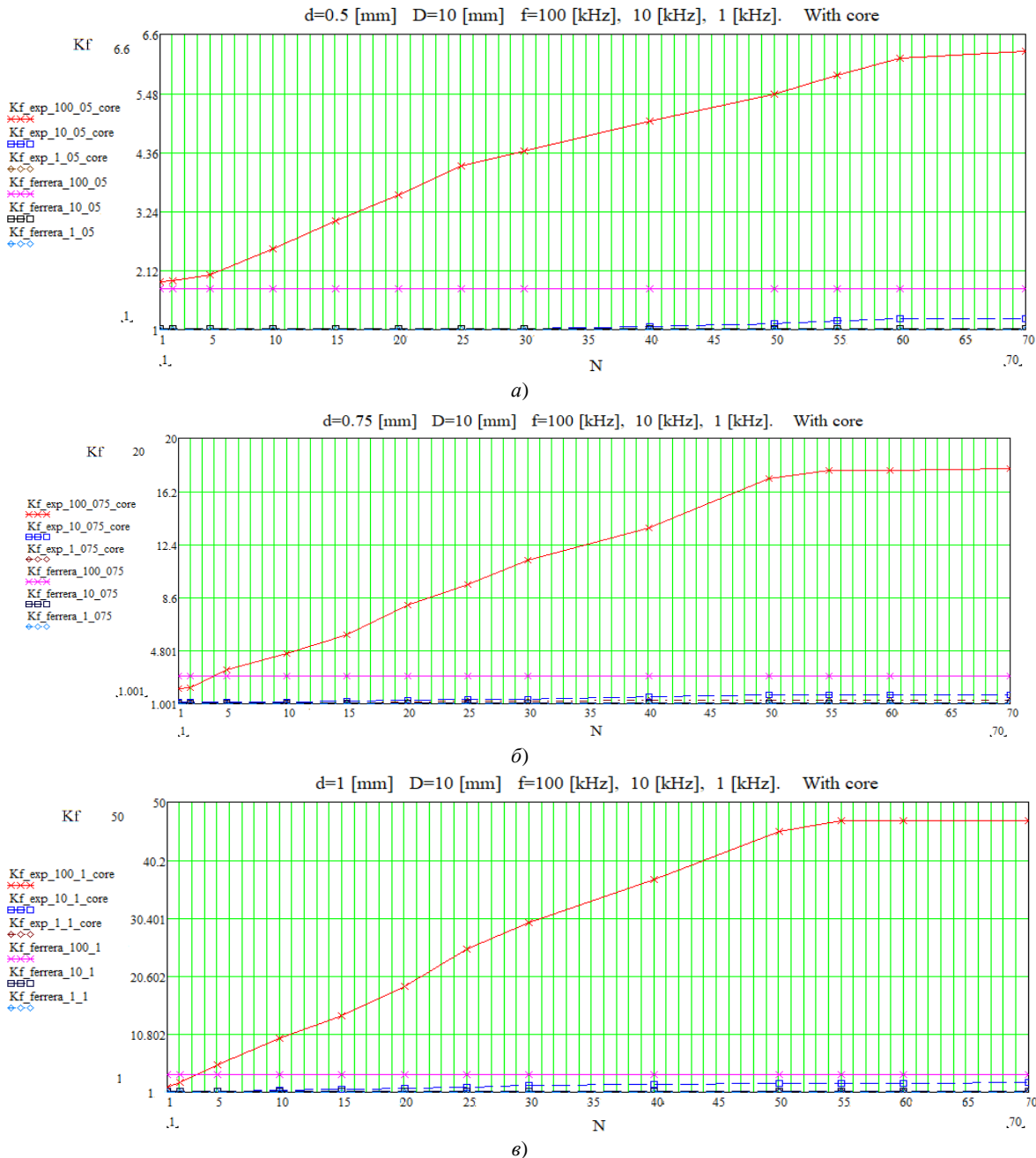


Рис. 2. Залежність величини K_f від кількості витків N одношарової обмотки з осердям марки 600НН для експериментальних та теоретичних розрахунків для провідників діаметром: а — $d = 0,5$ мм; б — $d = 0,75$ мм; в — $d = 1$ мм

З наведених графіків (рис. 2а—в) очевидно, що для обмотки з феромагнітним осердям зберігається така ж тенденція залежності для кривої, яка описує експериментально отриману величину $K_{f_exp_core}$ від кількості витків N , що й для обмотки без осердя, тобто величина $K_{f_exp_core}$ зрос-

тає зі збільшенням кількості витків N . Проте, починаючи з певної їхньої кількості, збільшення величини втрат (тобто кривої $K_{f_exp_core}$) припиняється та виходить на певний сталий рівень, що майже не залежить від кількості витків. На відміну від обмотки без осердя, в цьому випадку, вказане припинення росту K_{f_exp} відбувається уже за кількості витків $N \geq 50$ для усіх трьох розглянутих діаметрів провідників на трьох частотах. Зазначимо, що у межах від $N = 50$ до $N = 70$ збільшення величини K_{f_exp} також є незначним (від 4 % до 5 % залежно від частоти та діаметра провідника), тобто вважатимемо, що і в цьому випадку величина K_{f_exp} є відносно сталою.

Порівняємо величину $K_{f_exp_core}$, отриману експериментально, з теоретично розрахованою величиною $K_{f_ferrera}$ для вказаних параметрів обмотки. На усіх розглянутих частотах та діаметрах провідників крива, що описує величину $K_{f_ferrera}$, також не залежить від кількості витків та має вигляд прямої. У цьому випадку, для одношарових обмоток з осердям, з кількістю витків $N \geq 50$, відносне відхилення величини $K_{f_ferrera}$ та $K_{f_exp_core}$ також не змінюється з ростом кількості витків, тобто збережено попередню тенденцію. Проте, на відміну від результатів дослідження обмотки без осердя, таке відхилення досить сильно зросло і становить від 250 % до 1000 % (від 3,5 до 10 разів відповідно) залежно від конкретної частоти та діаметра провідника.

Отже, враховуючи дуже значну розбіжність між теоретичними результатами та експериментальними, підсумовуємо, що використовувати аналітичну методику [5] для розрахунку одношарових обмоток із феромагнітним осердям не можна.

Як і в попередньому дослідженні, зі збільшенням діаметра провідника, втрати обмотки зростають, причому найбільший приріст спостерігається на частоті $f = 100$ кГц — зі збільшенням діаметра провідника з $d = 0,5$ мм до $d = 1$ мм максимальне значення величини K_{f_exp} (коли $N = 70$) зростає у 7,5 разів, проте, за частоти $f = 10$ кГц втрати зростають лише удвічі. Тобто і для обмотки з осердям ця тенденція зберігається.

3. Дослідження впливу осердя на величину втрат одношарової обмотки

Причиною появи значної розбіжності між теоретичними та експериментальними результатами для одношарової обмотки з осердям, теоретично, можуть бути як втрати в осерді, так і вплив осердя на конфігурацію поля в обмотці (що впливає на розподіл струму та опір втрат обмотки). Для перевірки цих припущень, виконаємо дослідження впливу осердя на рівень втрат обмотки, (величину K_f).

Дослідимо спочатку вплив втрат в осерді на величину втрат K_f . Відомо, що у разі впливу на феромагнітне осердя змінного магнітного поля високої частоти, магнітна проникність осердя носитиме комплексний характер, уявна частина якої і визначатиме поглинання (втрати) електромагнітної енергії в осерді у разі його перемагнічування. Теоретично, змінюючи величину уявної проникності осердя, можна дослідити вплив втрат в осерді на величину K_f . За допомогою натурального експерименту виконати таке дослідження неможливо, оскільки використовуване осердя має певне стає значення втрат, на яке впливати немає можливості. Тому перейдемо до машинного дослідження одношарової обмотки діаметром $D = 10$ мм, що складається з $N = 5$ витків, виконаних провідником діаметром $d = 1$ мм. Дослідження проведено на частоті $f = 100$ кГц. Обмотка виконана на осерді з параметрами, що відповідають реальному матеріалу осердя ($\mu = 600$; $\mu_i = 0,5$). Отриману для цих параметрів осердя величину K_f порівняємо з відповідними результатами натурального експерименту. Відносне відхилення отриманих результатів становило близько 5 %, що не перевищує похибки вимірювання, тобто у цьому випадку машинний експеримент дає коректні результати і його можна використовувати у подальших дослідженнях. Далі, змінюючи величину втрат в осерді шляхом зміни уявної частини комплексної провідності μ_i (0...50), визначимо вплив втрат в осерді на величину K_f . За результатами машинного експерименту встановлено, що зміна величини втрат в осерді у вказаних межах μ_i призводить до збільшення втрат обмотки K_f лише на 3 %, тобто за цих умов вплив втрат в осерді на втрати в обмотці є незначним. Відповідно підсумовуємо, що значне збільшення величини опору втрат одношарової обмотки швидше за все спричинено зміною конфігурації магнітного поля внаслідок внесення феромагнітного осердя.

Обговорення результатів

Результати попереднього дослідження показали, що ймовірною причиною значного розходження експериментально та теоретично отриманої величини K_f для одношарової обмотки з осердям є зміна конфігурації магнітного поля всередині обмотки внаслідок внесення феромагнітного осердя. Для перевірки такого припущення у середовищі кінцево-елементного моделювання дослідимо конфігурацію магнітного поля всередині обмотки для випадків відсутності осердя ($\mu = 1$) та його наявності ($\mu = 600$). Результати перевірки показано на рис. 3а, б.

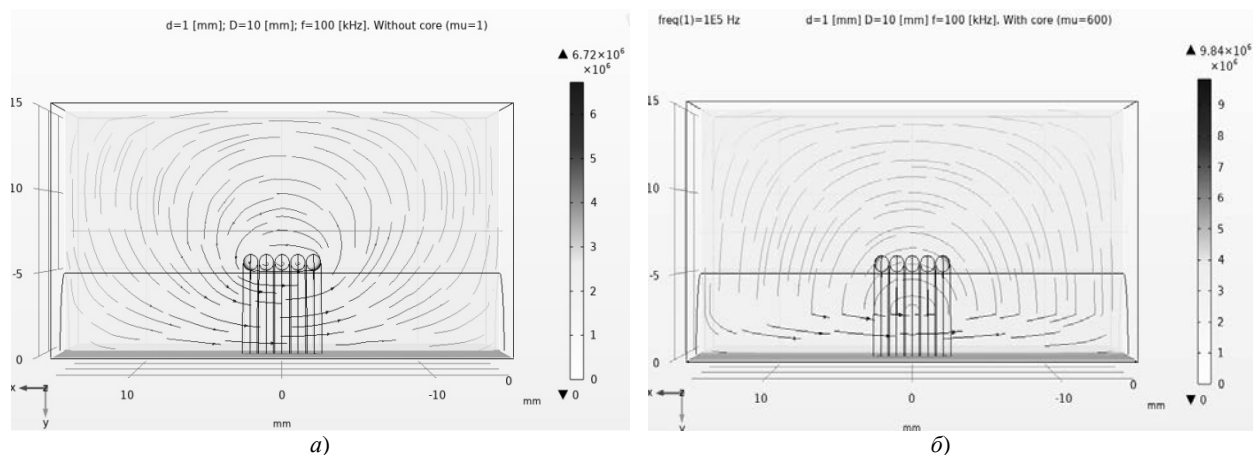


Рис. 3. Розподіл ліній магнітного поля всередині одношарової обмотки та розподілу струму у провідниках: а — за відсутності осердя ($\mu = 1$); б — за наявності осердя ($\mu = 600$)

Очевидно, що у випадку обмотки без осердя силові лінії магнітного поля сконфігуровані таким чином, що нерівномірно охоплюють внутрішні та крайні витки, спричиняючи цим самими крайові ефекти та нерівномірність розподілу струму у внутрішніх та зовнішніх витках. Відповідно, у крайніх витках площа провідної області буде більшою, ніж у внутрішніх. Щодо обмотки з осердям, бачимо, що силові лінії магнітного поля сконцентровані уздовж осі осердя, а всередині обмотки воно однорідне. Спостерігаємо витіснення струмопровідної області з внутрішньої частини провідника на зовнішню, причому, нерівномірність розподілу струму у витках зберігається — площа провідної області у крайніх витках буде більшою, ніж у внутрішніх. Але у випадку обмотки з осердям, сумарна площа струмопровідної області буде меншою ніж в обмотці без осердя, що і спричиняє збільшення втрат. Це ілюструє і збільшення густини струму — відносне відхилення величини густини струму для обмотки без осердя та з осердям становить 32%. Щодо величини втрат, то для обмотки з осердям величина K_f зросла в 1,6 разів (на 38%), порівняно з аналогічною величиною для обмотки без осердя. Нагадаємо, зазначені дані отримано для п'ятивиткової обмотки, у випадку збільшення кількості витків K_f зростатиме ще більше.

Висновки

1. Відомі аналітичні методика розрахунку [5] у тому вигляді, в якому вони є, можна використовувати для розрахунку величини втрат K_f одношарових обмоток індуктивних елементів, проте з тими обмеженнями, що в обмотці без осердя кількість витків становить $N \geq 30$, а остаточний результат розрахунку величини K_f скориговано на величину відносного відхилення теоретичних та експериментальних даних (до 20,5% залежно від діаметра провідника та частоти).

2. Розрахунок опору втрат одношарових обмоток індуктивних елементів з феромагнітним осердям за відомими аналітичними методиками [5] виконувати не можна, оскільки розходження теоретичних та експериментальних даних дуже суттєве та сягає приблизно 1000% (11 разів), оскільки вплив осердя у цих методиках не враховано.

3. Можливою причиною такого розходження є вплив на розподіл струму у провідниках обмотки зміни конфігурації поля всередині обмотки з введенням осердя. Втрати в осерді, у цьому випадку, майже не впливають на загальну величину K_f (зміна втрат в осерді у 50 разів спричиняє зміну K_f лише на 3%).

4. Розрахункові вирази найпоширеніших методик розрахунку вимагають уточнення та допов-

нення їх геометричними параметрами обмотки, зокрема тими, що описують кількість витків. Визначено, що аналітичне розв'язання задачі утруднене, тому ухвалено рішення про продовження дослідження, що дозволить врахувати геометричні параметри одношарової обмотки, зокрема й кількість витків. Вказані вище доповнення полягатимуть у введенні поправочних коефіцієнтів окремо у лівий та правий доданки розрахункового виразу методики [5] для корекції врахування впливу скін-ефекту та ефекту близькості відповідно, залежно від геометричних параметрів обмотки. Подальші дослідження будуть спрямовані на емпіричне визначення значень вказаних поправочних коефіцієнтів для найпоширеніших практичних випадків (діаметрів провідників обмотки, діаметрів витків обмотки, кількості витків та робочих частот).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] G. Bock, "Essential guide to power supplies," *XP Power*, pp. 1-12, 2014.
- [2] H. Choi, "Pre-Matching circuit for high-frequency ultrasonic transducers," *MDPI. Sensors*, vol. 22, no. 22, pp. 1-15, 2022.
- [3] Marian K. Kazimierzczuk, *High-frequency magnetic components*, 2-d edition. John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 294-331.
- [4] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer winding," *Proc. IEE.*, vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, Aug. 1966.
- [5] J. A. Ferreira, "Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 9, no. 1, pp.127-134, Jan. 1994.
- [6] А. П. Середін, і А. В. Мовчанюк, «Аналіз методик та модифікація існуючих виразів для розрахунку опору втрат дроселів на ультразвукових частотах,» *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи*, Міжнар. наук.-техн. конф., НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020, с. 52-55.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.06. 2023

Середін Андрій Павлович — аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: Ceredin.A@gmail.com ;
Мовчанюк Андрій Валерійович — канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: movchanuk@rtf.kpi.ua

A. P. Seredin¹
A. V. Movchaniuk¹

Influence of the Number of Turns of the Single-Layer Winding of the Inductive Element on the Resistance of Losses

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The paper analyzes one of the common analytical methods (Ferrer) for calculating the losses of the windings of the inductive elements, including those operating at frequencies up to 100 kHz, and identifies the main shortcomings of this method — neglecting the influence of the geometry of the winding of the inductive element (including the number of turns) on the amount of losses, expressed by the dimensionless coefficient. Theoretically, this is the reason for the appearance of an incorrect calculation result according to this method. To test the assumption, an experimental study of the impact of the length of the single-layer winding (number of turns) on the amount of losses was performed. Single-layer windings of a fixed diameter with different conductor diameters, at different frequencies, without a core and with a ferromagnetic core were studied. It was determined that it is possible to use the considered analytical method for calculating the losses of a single-layer winding, provided that the winding is without a core, with the number of turns $N \geq 30$ turns, and the obtained result is adjusted by the appropriate value (to 20.5 % depending on the frequency and diameter of the conductor). It was found out that an increase in the diameter of the conductor leads to an increase in winding losses (this increase is 67 % when the diameter is doubled). During the study of the winding with the core, a significant increase in the value of the winding losses was found, which exceeded the calculated values by more than ten times. It was established that the probable cause of such a significant discrepancy is the effect of changing the configuration of the magnetic field lines when the ferromagnetic core is introduced into the winding, which, in its turn, changes the shape and area of the conductive region of the conductor. It was also determined that, under these conditions, the influence of core losses on the change in winding losses is insignificant (up to 3 %) and can be neglected. The effect of the core on the configuration of the lines of force of the magnetic field and, accordingly, on the current distribution in the conductor was studied. The study was carried out for the winding without a core and with a core. Based on this, it was established that the chosen analytical method of calculation cannot be used for the calculation of single-layer windings with a core.

Keywords: loss resistance, single-layer winding, Q-factor, inter-turn proximity effect, analytical methods for calculating loss resistance, core losses.

Seredin Andrii P. — Post-Graduate Student of the Chair of Applied Radioelectronics, e-mail: Ceredin.A@gmail.com ;
Movchaniuk Andrii V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Applied Radioelectronics, e-mail: movchanuk@rtf.kpi.ua