

УДК 621.3.029.6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ БЛИЗЬКО РОЗТАШОВАНИХ ФЕРИТОВИХ ВКЛАДИШІВ НЕВЗАЄМНИХ ПАСИВНИХ ПРИСТРОЇВ

Вунтесмері Вол.С., Стоколос М.О.

Як відомо, до не взаємних феритових пристроїв (ФП) відносять вентиля та циркулятори. У діапазоні дуже високих частот (ДВЧ) ці пристрої реалізуються з використанням елементів із зосередженими параметрами та феритових вкладишів у якості не взаємного середовища [1]. Останні можуть мати як просту, так і складну форму. Для простих форм (сфера, диск, стрижень), що можна вписати в еліпсоїд обертання, розраховані досить точні розмагнічуючі фактори [2, 3], за допомогою яких можна визначити внутрішнє магнітне поле. Складні конструкції феритових вкладишів можуть утворюватись поєднанням цих простих форм. При підмагнічуванні постійним магнітним полем їх внутрішні поля аналітично розрахувати важко, а тому вони частіше визначаються експериментально.

Теоретична частина

Для роботи не взаємних ФП застосовують переважно два режими: дорезонансний та зарезонансний. Дорезонансний режим роботи для певної частоти характеризується тим, що зовнішнє постійне поле підмагнічування має менше значення, ніж поле, при якому відбувається феромагнітний резонанс на цій частоті. Відповідно, у зарезонансному режимі зовнішнє постійне поле підмагнічування більше поля феромагнітного резонансу. У феритових пристроях діапазону ДВЧ з метою уникнення втрат слабкого поля для роботи вибирають зарезонансний режим.

Важливим завданням при роботі не взаємних ФП при зарезонансному режимі роботи у діапазоні ДВЧ є знаходження внутрішнього поля при насиченні, яке визначатиме найнижчу частоту феромагнітного резонансу f_{min} [4]: $f_{min} = \gamma(H_a + N_z M_s)$, де γ – гіромагнітне відношення електрона; H_a – поле анізотропії; N_z – розмагнічуючий фактор за віссю z ; M_s – намагніченість насичення.

Для феритових вкладишів простої форми, як було сказано, існують формули розрахунку розмагнічуючих факторів N_x , N_y та N_z [5]:

для довгого циліндра з радіусом R та довжиною L , орієнтованої вздовж

$$\text{осі } z \quad N_z \approx 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2R}{L}\right)^2}}, \quad N_x = N_y \approx \frac{1}{2}(1 - N_z);$$

для тонкого диска $N_z \approx 1 - \frac{L}{2R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{2R}\right)^2}}$, $N_x = N_y \approx \frac{1}{2}(1 - N_z)$.

У випадку, коли проста геометрична форма перетворюється на складну, наприклад, при поєднанні двох феритових дисків, внутрішнє поле кожного з них стає залежним як від їх розмагнічуючих факторів, так і від впливу, який вони здійснюють один на одного. Тоді аналітичне визначення внутрішнього поля для теоретичного розрахунку частоти феромагнітного резонансу ускладнюється.

Методика та засоби експериментальних досліджень

Суть вимірювання полягає в тому, що до моменту насичення поле всередині фериту, а також у безпосередній близькості до поверхні при рівномірній зміні зовнішнього поля підмагнічування змінюється з більшою швидкістю, ніж після моменту насичення. Таким чином, знаходячи точку перегину графіка індукції поля та відповідне значення поля підмагнічування (струм електромагніта) для різних відстаней між феритовими дисками, можна розрахувати експериментальну криву залежності розмагнічуючого фактору кожного диску від відстані між ними.

Експериментальний стенд, на якому проводяться вимірювання зовнішнього поля у близькості до поверхні фериту, має схему рис. 1.

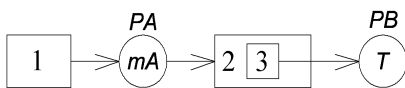


Рис. 1.

За допомогою зміни вихідної напруги блока живлення електромагніта 1 (рис. 1), а, відповідно, зміною струму через котушку електромагніта 2, регулюється постійне поле, що створюється ним.

Між полюсами електромагніта фіксується досліджувана конструкція 3, яка показана на рис. 2.

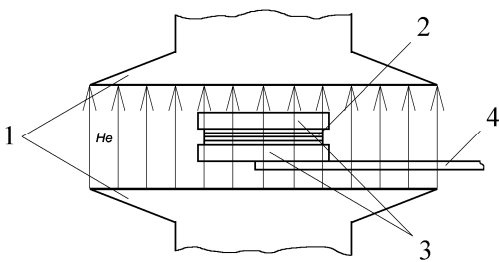


Рис. 2.

Для кожної певної відстані між феритовими дисками 3 (рис. 2), що задається товщинами діелектричних прокладок 2, вимірюється залежність індукції магнітного поля біля поверхні одного із дисків від струму підмагнічування за допомогою давача 4 з відліком вимірюваного значення вимірювачем індукції магнітного поля *PВ* та фіксуванням встановленого значення струму електромагніта на міліамперметрі *РА* (рис. 1).

Основна похибка у проведених вимірюваннях залежить від: класу точності вимірювальних приладів; стабільності зовнішніх умов, а саме – температури, від якої залежить значення намагніченості насичення феритових дисків; нерівномірності розподілу постійного магнітного поля у зазорі осердя електромагніта; залишкової індукції осердя електромагніта та ферито-

вих дисків; випадкової похибки. У склад стану входять: вимірювач магнітної індукції Ш1-8, що має похибку у досліджуваному діапазоні значень магнітної індукції не більше $\pm 1,5\%$; цифровий міліамперметр *Mastech MY68* з точністю $\pm 1,2\% \pm 3$ одиниці рахунку. Стабільність температури повітря у приміщенні під час вимірювання становила $17 \pm 1^\circ\text{C}$, що є достатнім для нехтування її впливом.

Графік виміряної та пронормованої нерівномірності розподілу магнітної індукції B_{norm} в зазорі осердя (між полюсами електромагніта) при різних значеннях струму підмагнічування представлено на рис. 3. На цьому графіку z – відстань від поверхні полюса електромагніту до точки вимірювання.

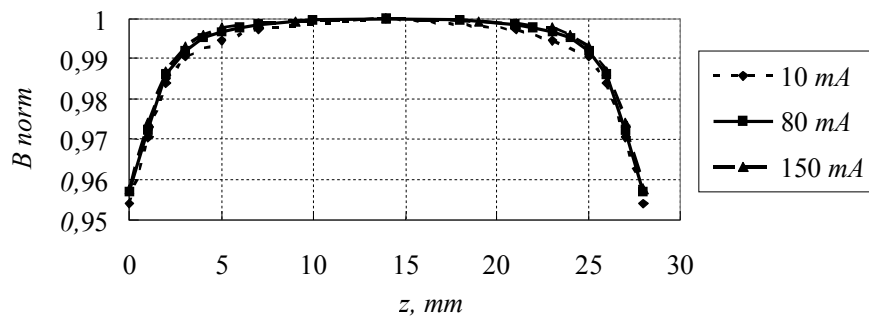


Рис. 3.

Із графіка видно, що нерівномірність розподілу магнітного поля в межах розташування досліджуваної конструкції (від 6 до 22 мм) не перевищує похибку вимірювача індукції магнітного поля (менше 1,5%). Вклад у загальну похибку різної залишкової індукції осердя електромагніта та феритових дисків від однієї серії вимірювань до іншої можна звести до систематичної похибки і виключити шляхом циклу плавного збільшення постійного поля підмагнічування у присутності досліджуваної конструкції до певного значення, що рівне або перевищує максимальне поле, при якому проводяться вимірювання, та зворотному зменшенні поля підмагнічування до мінімального значення. Випадкову похибку можна виключити, проводячи ряд вимірювань для накопичення необхідної та достатньої статистики по кожній точці.

Результати експериментів

У даній роботі для прикладу було досліджено феритові диски марки 30СЧ9 діаметром 32 мм та товщиною 4 мм. Розглядаючи два крайніх випадки – щільного зведення двох феритових дисків та розведення їх до нескінченності – були розраховані відповідні розмагнічуючі фактори:

- два диски, які зведені разом, мають $N_z \approx 0,757$, $N_x = N_y \approx 0,121$.
- диски, які відведені на велику відстань один від одного, мають $N_z \approx 0,876$, $N_x = N_y \approx 0,062$.

Для побудови експериментального графіка розмагнічуючого фактора

кожного диску при їх взаємодії в залежності від відстані між ними було проведено ряд вимірювань та розрахунків за наступним алгоритмом: 1) встановивши між дисками діелектричну прокладку певної товщини та зафіксувавши положення досліджуваної конструкції між полюсами електромагніту, провели цикл намагнічування для зменшення впливу залишкової індукції; 2) з кроком зміни струму підмагнічування електромагніта порядку 5мА у двох діапазонах з приблизно 15 до 145 мА виміряли відповідні значення індукції магнітного поля поблизу поверхні феритового диска 3) побудували виміряні значення на графіку та апроксимували лінійними функціями. Для прикладу на рисунку 4 приводиться результат дослідження одного диску. Виміряні значення зображені хрестоподібними мітками, а відповідні апроксимації на двох інтервалах – суцільними лініями. Пунктирна лінія – залежність індукції магнітного поля між полюсами електромагніта від струму підмагнічування за відсутністю досліджуваної конструкції; 4) визначили точку перетину апроксимуючих функцій (кругла мітка на рисунку 4), що відповідає струму насичення; 5) повторили п.п.1-4 для інших діелектричних прокладок різної товщини.

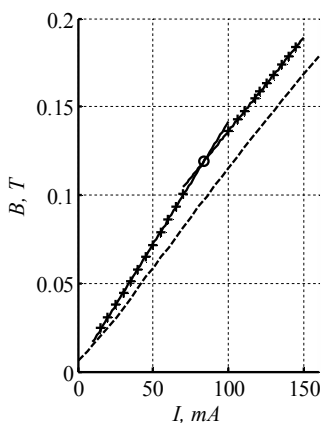


Рис. 4.

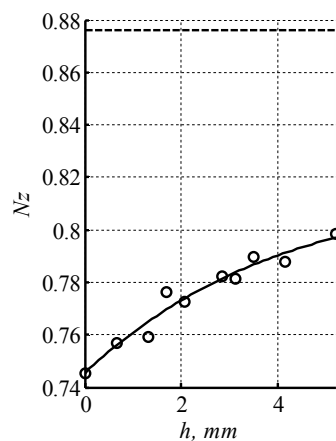


Рис. 5.

Маючи ряд значень струмів насичення, про нормуємо їх відносно струму насичення одного диску приведенного до рівня 0,867, тобто розмагнічуючого фактору одного диску, який був розрахований вище. Отримані результати представлені на рисунку 5. Даний графік являє собою залежність коефіцієнту, за

допомогою якого визначається внутрішнє поле кожного з двох феритових дисків, від відстані між ними. Круглими мітками позначено експериментальні розмагнічуючі фактори, суцільною лінією – апроксимуюча їх експоненційна крива, яка теоретично має вийти на рівень 0,867 (пунктирна лінія).

Висновки

Отримані результати показують наявність впливу двох феритових вкладишів один на одного при поєднанні їх у систему. Виміряні та теоретичні значення розмагнічуючого фактору, які відповідають двом граничним випадкам, співпадають із точністю $\pm 5\%$. За результатами вимірювань та розрахунків було побудовано апроксимовану залежність розмагнічуючого фактора, за допомогою якого можна розраховувати внутрішнє поле, а відповідно і частоту феромагнітного резонансу, взаємодіючих феромагнітних дисків в залежності від відстані між ними та прикладеного зовнішнього

магнітного поля підмагнічування.

Література

1. Вунтесмері Вол. С., Стоколос М.О. Ширококутові невіддільні пасивні пристрої діапазону дуже високих частот // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2008. – Вип. 37. – С. 65-70.
2. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики: Пер. с англ. /Под ред. А.Г. Гуревича. – М.: Мир, 1965. – 676 с.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: Пер. с англ. М.: Наука, 1978. 782 с.
4. Абрамов В.П., Дмитриев В.А., Шелухин С.А. Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с. – ISBN: 5-256-00218-X
5. Helszajn J. Nonreciprocal Microwave Junctions and Circulators. – New-York: Wiley-Interscience, 1975. – 349 p.

Вунтесмері Вол.С., Стоколос М.О. Дослідження внутрішнього магнітного поля близько розташованих феритових вкладишів невіддільних пасивних пристроїв. Наводиться методика визначення розмагнічуючого фактора двох ферромагнітних дисків. Для феритових дисків 30СЧ9 діаметром 32 мм і товщиною 4 мм, встановлено залежності розмагнічуючого фактора кожного диску від відстані між ними.

Ключові слова: невіддільні пристрої, феритові пристрої, розмагнічуючий фактор

Вунтесмері Вл.С., Стоколос М.О. Исследование внутреннего магнитного поля близко расположенных ферритовых вкладышей не взаимных пассивных устройств. Приводится методика определения размагничивающего фактора двух ферромагнитных дисков. Применяя ферритовые диски марки 30СЧ9 диаметром 32 мм и толщиной 4 мм, установлена зависимость размагничивающего фактора каждого диска от расстояния между ними.

Ключевые слова: не взаимные устройства, ферритовые устройства, размагничивающий фактор.

Vountesmeri V.L.S., Stokolos M.O. Non-reciprocal passive devices closely spaced ferrite inserts internal magnetic field investigation. Determining demagnetizing factor method of two ferromagnetic disks is described. Dependence of two ferrite disks demagnetizing factor from distance between them is investigated by using ferrite disks of type 30SCH9 with diameter 32 mm and thickness 4 mm.

Key words: non-reciprocal devices, ferrite devices, demagnetizing factor