

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.14

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ОСЕРДЬ ФЕРОЗОНДІВ ПРИ ЇХ ВЗАЄМНОМУ ВПЛИВІ

© Романенко А. В., Яковенко В. В., Мирошников В. В., 2000
Східноукраїнський державний університет, м. Луганськ

Аналізується взаємовплив осердь ферозондів при їх близькому розміщенні. Для осердь з високою магнітною проникністю, які розташовані на відстані, яка співрозмірна з їх геометричними розмірами, запропонована залежність для розрахунку проникності форми осердь.

Магнітна проникність осердь є величиною, від якої в основному залежить коефіцієнт перетворення ферозондів [1, 2, 3, 5]. В багатьох математичних моделях фізичних процесів створення вихідного сигналу ферозондів їх коефіцієнт перетворення прямопропорційний магнітній проникності осердь. При значних величинах магнітної проникності матеріалу осердь магнітна проникність осердь дорівнює проникності форми m [1, 2]. В різних літературних джерелах [3, 4, 5, 7] є напівемпіричні залежності, які дозволяють розрахувати m і які підтверджені експериментальними даними. Однак рекомендації щодо врахування взаємного впливу близько розташованих осердь на їх проникність форми наведено у вигляді емпіричної залежності тільки в [4]. Ця залежність має такий вигляд:

$$G = G_1 + G_1 \left(1 - e^{-\frac{8xd}{3ml^2}}\right), \quad (1)$$

де l , d , m – відповідно довжина, товщина і проникність форми одного осердя; x – відстань між серединами осердь;

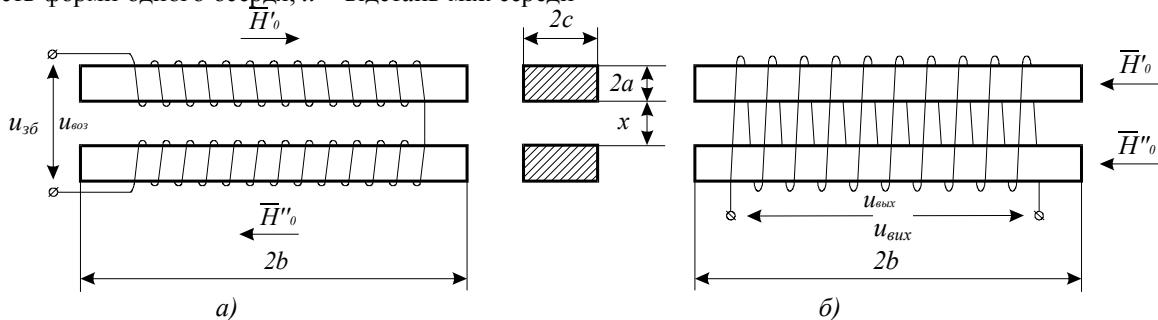


Рис. 1. Геометричні моделі датчиків з двома осердями.

Магнітні властивості матеріалу осердя задаються залежністю намагніченості від напруженості магнітного поля $M(H)$. Ця залежність задається в аналітичній формі [8]. При розрахунку не враховується вплив вихрових струмів, тобто магнітне поле вважається квазіпостійним. Об'єм стержня розбивається на елементарні об'єми (ЕО), які представляють собою паралелепіпеди, в середині яких вектор

намагніченості є постійним.

Математична модель магнітного поля в стержнях описується нелінійним векторним інтегральним рівнянням такого виду [5]:

Метою даної статі є теоретичне визначення впливу параметрів осердь ферозондів один на одного при їх близькому розташуванні.

Геометричні моделі стержневих ферозондів з двома осердями показані на рис. 1. На рис. 1а зовнішнє поле для першого осердя направлено протилежно полю другого осердя, що відповідає випадку, коли зовнішнє поле створюється обмоткою збудження. Рис. 1б відповідає випадку, коли зовнішнє поле направлено в одну сторону (вимірюване поле).

намагніченості є постійним.

Математична модель магнітного поля в стержнях описується нелінійним векторним інтегральним рівнянням такого виду [5]:

$$H_i = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \text{grad} \int_{S_j} \frac{\bar{M}_j(H) \cdot \bar{n}_j}{(\bar{r}_i - \bar{r}_j)} dS_j + \bar{H}_{0i}, \quad (2)$$

де i, j - точки контролю та джерел; \bar{n}_j - нормаль до поверхні ЕО; S_j - площа поверхні ЕО; \bar{H}_{0i} - вектор поля, яке створюється котушкою чи зовнішнім однорідним полем; N - кількість ЕО; \bar{r}_i, \bar{r}_j - вектори у точці контролю та джерела. Для паралелепіпедів інтеграл, який входить до суми, виражається аналітично. Інтегральне рівняння (2) зводиться до системи алгебраїчних рівнянь:

$$H_i = [A_{ij}] \bar{M}_j(H) + \bar{H}_{0i}, \quad (3)$$

де $[A_{ij}]$ - матриця коефіцієнтів $N \times N$, величини яких розраховуються шляхом інтегрування згідно (2).

Система алгебраїчних рівнянь (3) вирішується за наступним алгоритмом:

$$\bar{M}_i^{k+1} = M_i^k + \alpha [\bar{H}_{pi}^k - \bar{H}_i^k(M_i^k) + \bar{H}_{0i}], \quad (4)$$

де k - номер ітерації; $\bar{H}_i^k(M_i^k)$ - вектор напруженості поля, який визначається значенням $M(H)$ для матеріалу осердь, а його напрямок співпадає з вектором \bar{M}_i^k . Вектор \bar{H}_{pi} для точок контролю в середині сердечника визначається за допомогою такої формули:

$$H_{pi} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \text{grad} \int_{S_j} \frac{\bar{M}_j(H) \cdot \bar{n}}{(\bar{r}_i - \bar{r}_j)} dS_j. \quad (5)$$

Постійна α знаходиться в діапазоні $0,1 \leq \alpha \leq 2$. Її величина характеризує стійкість ітераційного процесу та швидкість його збігу.

Розрахунок вектора намагніченості \bar{M}_i проводиться для кожного ЕО. Визначення намагніченості всіх ЕО здійснюється паралельно, що зменшує час обчислень та забезпечує збіг при будь-якому розбитті та напрямку \bar{H}_0 . Ітераційний процес для кожного ЕО закінчується при виконанні умови

$$\|M^{k+1} - M^k\| < \varepsilon \frac{1}{2} (\|M^{k+1}\| + \|M^k\|). \quad (6)$$

Величина ε знаходиться в діапазоні $10^{-4} \dots 10^{-5}$.

Розрахунок магнітної проникності форми осердь проводиться шляхом усереднення величин M, H_p у центральному перерізі сердечника. Отримані середні значення дають можливість розрахувати проникність форми в центральному перерізі за допомогою наступної формули:

$$m_u = \frac{M_{u,cp}}{H_{p,ч,ср}}. \quad (7)$$

При розрахунках осердь використовувались сплави з високою проникністю, а саме 79НМ, 79НМА і 80НХС. На першому етапі для можливості порівняння з результатами отриманими іншими авторами [3, 7] розраховувався коефіцієнт форми одиночних осердь. На рис. 2 показано відносне відхилення результатів розрахунку від результатів теоретичних розрахунків за допомогою залежностей, які були запропоновані [7]. Відносна похибка представлена як функція змінної λ ($\lambda = b/a$). Як видно з графіків (рис. 2), відносний розкид результатів знаходиться в діапазоні 0,5-7,0%. Причому уточнені формули Розенблата [7], які визначені з коефіцієнтом, запропонованим у [3], дають менший розкид (до 4%).

На рис. 3 наведені результати розрахунків коефіцієнта форми давача з двома осердями при відстані x між ними для стержнів з різним поперечним перерізом при паралельному та протилежному напрямках зовнішнього поля. Із рис. 3 видно, що для вимірювання зовнішнього магнітного поля бажано збільшити відстань між стержнями, а по відношенню до поля збудження бажано, щоб осердя були замкнутими. Остання умова повністю не може бути виконана із-за кінцевої ширини котушок збудження.

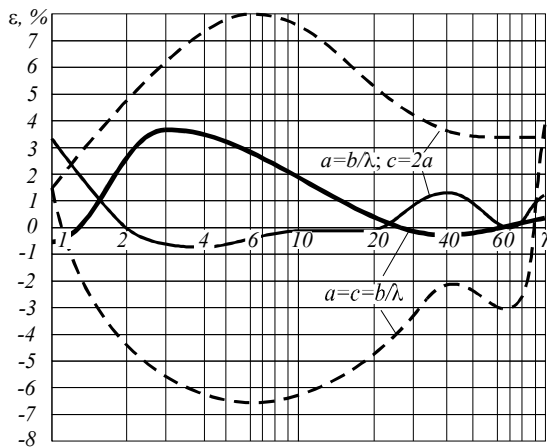


Рис. 2. Відносні похибки чисельного розрахунку та експериментально отриманих значень m .

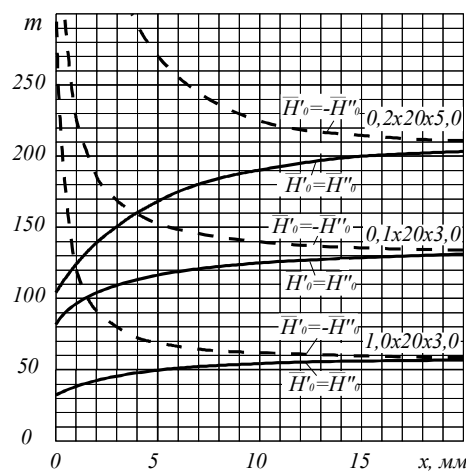


Рис. 3. Залежність коефіцієнту форми для давача з двома осердями від відстані між ними.

Для осердь, розташованих на відстані, яка співрозмірна з їх геометричними розмірами запропонована наступна формула для розрахунку проникності форми осердь:

$$m = m_0 + \frac{2}{\pi}(m_\infty - m_0) \operatorname{arctg} \frac{x^*}{k}, \quad (8)$$

де m_0 і m_∞ розраховуються за допомогою формул, які приведені в [7] (при обчисленні m_0 підставляють розміри c , b , $2a$, а для обчислення m_∞ підставляють розміри c , b та a); $x^* = \frac{x}{2b} 100\%$; x – відстань між ближчими боковими гранями осердя; k – коефіцієнт, який вибирається за допомогою графіків, які наведені на рис. 4; $c^* = c/b$; $a^* = a/b$.

Похибка формули (8) не перевищує 1,5%.

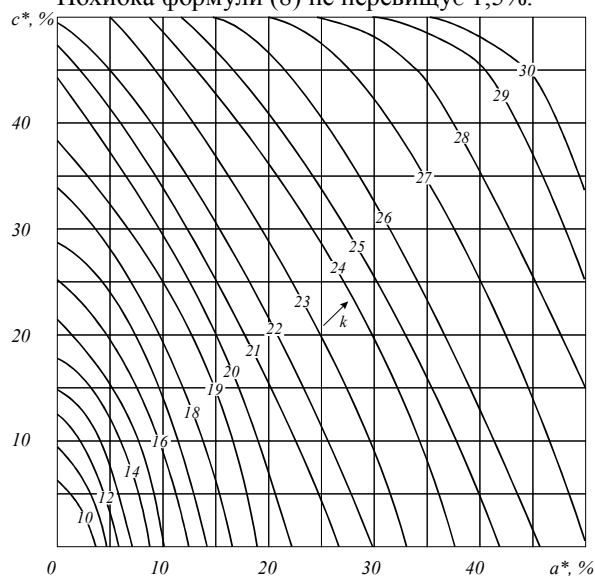


Рис. 4. Залежність коефіцієнта k від геометричних розмірів осердя.

Оскільки залежність магнітної проникності осердь від їх взаємного розміщення визначається

також напрямком магнітного поля, то поправку на цей вплив необхідно вносити як для поля збудження, так і для вимірюваного поля. Степінь цього впливу залежить також від режиму роботи ферозонду. При режимі другої гармоніки вирішальний вплив має вимірюване поле, для ферозондів пік-типу [9] – поле збудження.

1. Аркадьев В. К. *Электромагнитные процессы в металлах*. - В 2-х ч. - М. -Л.: ОНТИ, 1934. -Ч. 1. - 230 с. 2. Афанасьев Ю. В. *Феррозондовые приборы*. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 188 с. 3. Розенблат М. А. *Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости*. - ЖТФ, 1954, № 24, Вып. 4, С. 637-661. 4. Розенблат М. А. *К расчету магнитомодуляционных датчиков напряженности магнитного поля*. - М., 1957, *Электричество*, № 7, С. 24-31. 5. Янус Р. И., Фридман Л. Х., Дрожжина В. И. *К теории дифференциальных феррозондов с продольным возбуждением*. - Сб. производственно-тех. информации по геофиз. приборостроению. - ОКБ МГ и ОН СССР. -М., 1959, вып. 3, С. 73-95. 6. Коген-Далин В. В., Курбатов П. А. *Расчет сложных систем с постоянными магнитами на основе интегральных уравнений // Применение постоянных магнитов в электрических машинах, аппаратах и приборах*. Выпуск 483. 1980. МЭИ. С. 75-80. 7. Матюк В. Ф., Осипов А. А. *Некоторые замечания о центральном размагничивающем факторе тел разной формы. II. Коэффициент размагничивания стержней прямоугольного сечения*. - Дефектоскопия, 2000, № 1, С. 37-44. 8. Мельгуй М. А. *Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков*. - Дефектоскопия, 1987, № 8, С. 3-9. 9. Яковенко В. В. *Феррозонд с однополярным импульсным возбуждением*. - Дефектоскопия, 1984, № 4, С. 36-40.