

УДК 621.317.42

АНАЛІЗ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ІНДУКЦІЇ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ З ОСЬОВИМ НАМАГНІЧЕННЯМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦІЙНОЇ МАГНІТОМЕТРІЇ

В. М. Гудь

Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, e-mail: V.M.Hud@niwm.edu.ua

Проаналізовано способи контролю якості постійних магнітів. Встановлено, що стандартні методи визначення основних параметрів не повністю задовольняють сучасні вимоги до контролю якості постійних магнітів. Показано, що один із способів визначення залишкової намагніченості постійних магнітів може базуватися на вимірюванні індукції власного магнітного поля магніту. Доведено, що похибка визначення залишкової індукції даним методом залежить від відстані до поверхні магніту.

Ключові слова: контроль якості, ідентифікація магніту, перевірка параметрів магнітів, точність вимірювання

Проанализированы способы контроля качества постоянных магнитов. Установлено, что стандартные методы определения основных параметров не полностью удовлетворяют современным требованиям к контролю качества постоянных магнитов. Показано, что один из способов определения остаточной намагниченности постоянных магнитов может базироваться на измерении индукции собственного магнитного поля магнита. Доказано, что погрешность определения остаточной индукции данным методом зависит от расстояния к поверхности магнита.

Ключевые слова: контроль качества, идентификация магнита, проверка параметров магнитов, точность измерения

The methods of control as permanent magnets analyzed. It was established that the standard methods for determining the basic parameters not fully satisfy current requirements for quality control of permanent magnets. It is shown that one way to determine the residual magnetization of permanent magnets may be based on measuring the induction of its own magnetic field magnet. The error measurement of the residual induction of this method depends on the distance to the surface of the magnet that proved.

Key words: quality control, identification magnet test parameters magnets, measurement accuracy

Вступ. Постійні магніти використовуються в якості компонентів електричних машин, електронної та радіотехніки, вимірювальних приладів та систем автоматики. Невпинне зростання їхньої питомої енергії [1] (рис.1) призвело до складності намагнічування матеріалів даного типу, особливо значних геометричних розмірів. Тому при виробництві пристроїв, що містять постійні магніти постійно виникає необхідність у перевірці відповідності параметрів магнітів заявленим характеристикам. При цьому стандартні методи [2-5] перевірки параметрів магнітотвердих матеріалів є достатньо дорогими, складними або взагалі непридатними для контролю якості сучасних високоенергетичних постійних магнітів на основі сплавів Nd-Fe-B та Sm-Co.

Визначення статичних магнітних

характеристик магнітотвердих матеріалів проводиться індукційним методом у замкненому магнітному колі електромагніту [2, 3]. Однак даний метод є практично непридатним для контролю якості постійних магнітів. Це обумовлено, у першу чергу, наявністю значного притягання між полюсними наконечниками та магнітом. При цьому для отримання достовірних результатів контролю необхідно забезпечити щільне прилягання досліджуваного зразка, що складно виконати для дугоподібних або сегментних зразків [6], які широко використовуються в сучасних електричних машинах

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

Загальноприйнятим стандартним способом контролю якості постійних магнітів є

індукційний метод (рис. 2) [4], заснований на обчисленні інтегралу електрорушійної сили, яка наводиться на кінцях котушки Гельмгольца з числом витків w при проходженні через неї постійного магніту:

$$E = \int \varepsilon dt = \int -w \frac{d\Phi}{dt} dt = \int -wd\Phi, \quad (1)$$

де Φ - магнітний потік постійного магніту, зі збудженням від постійних магнітів.

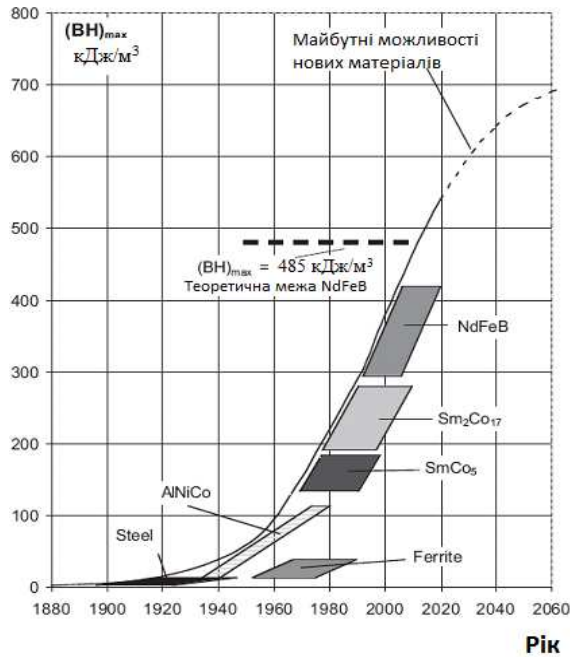


Рисунок 1 - Динаміка змін питомої енергії постійних магнітів

Проте, для забезпечення високої точності визначення магнітних характеристик він потребує узгодження розмірів котушки з розмірами магніту [4], що ускладнено в умовах неперервного технологічного процесу при виробництві постійних магнітів різних форм.



Рисисунок 2 - Схема контролю якості постійних магнітів індукційним методом

Альтернативним способом перевірки якості є пондеромоторний метод [5], який полягає у вимірюванні механічної сили, яку необхідно прикласти для відриву феромагнітного матеріалу від поверхні полюсу магніту:

$$F = \frac{B_0^2 S}{2\mu_0}, \quad (2)$$

де B_0 - індукція магнітного поля на поверхні полюсу магніту, S - площа контакту феромагнітного матеріалу та полюсу, μ_0 - магнітна постійна.

Однак, основним недоліком методу є те, що сила притягання магніту експоненціально зменшується при збільшенні відстані від його поверхні [5]. Тому, навіть невеликі повітряні зазори між магнітом і феромагнетиком впливають на величину сили притягання, а відповідно і достовірність визначення залишкової намагніченості постійного магніту.

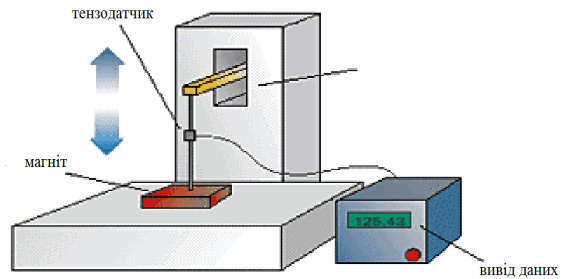


Рисунок 3 - Схема контролю якості постійних магнітів пондеромоторним методом

Відкриття ефекту Холла [7] дозволило з високою точністю вимірювати індукцію магнітного поля, що сприяло розвитку нових магнітометричних методів контролю якості постійних магнітів заснованих на визначенні їхніх параметрів за індукцією магнітного поля. При цьому контроль проводять шляхом вимірювання індукції у замкненому магнітному колі (рис.4) в яке поміщають постійний магніт або шляхом визначення індукції на його поверхні.

Однак, незважаючи на простоту контролю останнім, точність визначення з його використанням залишкової намагніченості залишається нез'ясованою.

Відповідно, мета роботи – дослідити похибку визначення залишкової намагніченості постійних магнітів методом магнітометрії, з'ясувати вплив точності вимірювання геометричних розмірів та індукції магнітного

поля на її величину.

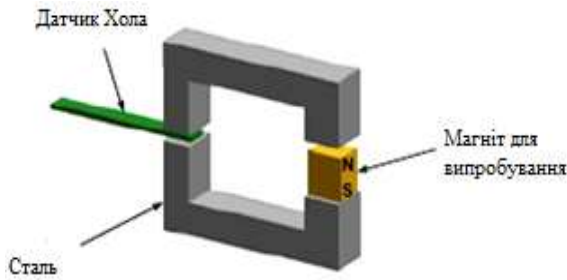


Рисунок 4 - Схема контролю якості постійних магнітів методом магнітометрії

Висвітлення основного матеріалу. З'ясуємо точність визначення залишкової індукції для циліндричних постійних магнітів з осьовим намагніченням, які широко використовуються у магнітних системах сепараторів та ловильних пристроїв [1].

Відомо [8], що величина індукції магнітного поля, яку генерує постійний магніт на відстані x від центру полюсу (рис.5) визначається за співвідношенням:

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right), \quad (3)$$

де B_r - залишкова індукція постійного магніту, L та R - висота та радіус магніту, x - відстань від поверхні полюсу до точки визначення індукції.

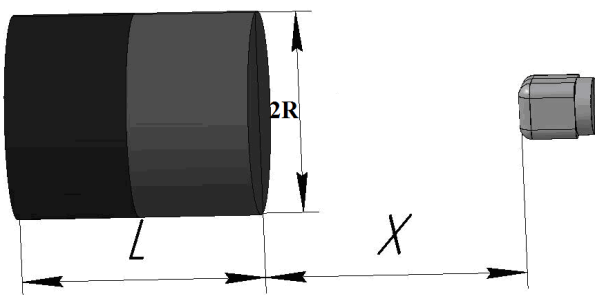


Рисунок 5 - До визначення індукції магнітного поля

Як слідує з останнього виразу величина індукції магнітного поля створюваного постійним магнітом залежить від залишкової індукції B_r матеріалу та його геометричних розмірів.

Абсолютну похибку вимірювання залишкової індукції представимо, як [9]:

$$\Delta B_x = B_x - B_x^*, \quad (4)$$

де B_x та B_x^* - дійсне та вимірне значення індукції.

Враховуючи те, що дійсне значення залежить від геометричних розмірів магніту, можна записати:

$$B_x^* = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L + \Delta L + x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (L + \Delta L + x + \Delta x)^2}} - \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right), \quad (5)$$

де ΔL , Δx та ΔR - точності визначення геометричних розмірів.

Тоді, з урахуванням (3) та (5), абсолютна похибка (4) набуде виду:

$$\begin{aligned} \Delta B_x = B_x - B_x^* = \frac{B_r}{2} & \left(\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) - \\ & \frac{B_r}{2} \left(\frac{L + \Delta L + x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (L + \Delta L + x + \Delta x)^2}} - \right. \\ & \left. - \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right) = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \right. \\ & \left. - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} - \frac{L + \Delta L + x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (L + \Delta L + x + \Delta x)^2}} + \right. \\ & \left. + \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right). \quad (6) \end{aligned}$$

Відносну похибку методу визначимо як

$$\varepsilon = \frac{\Delta B_x}{B_x}. \quad (7)$$

З урахуванням (3) та (6) відносна похибка визначиться так:

$$\varepsilon = \frac{\Delta B_x}{B_x} = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} - \frac{L + \Delta L + x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (L + \Delta L + x + \Delta x)^2}} + \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 & \left. + \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right) \div \\
 & \left(\frac{B_r}{2} \left(\frac{L + x}{\sqrt{R^2 + (L + x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) \right) = \\
 & = 1 - \left(\frac{L + \Delta L + x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (L + \Delta L + x + \Delta x)^2}} + \right. \\
 & \left. + \frac{x + \Delta x}{\sqrt{(R + \Delta R)^2 + (x + \Delta x)^2}} \right) \div \\
 & \left(\frac{L + x}{\sqrt{R^2 + (L + x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right). \quad (7)
 \end{aligned}$$

У випадку коли геометричні розміри вимірюються як правило одним технічним засобом, а радіус визначається за діаметром, можна записати, що:

$$\Delta L = \Delta x = 2 \cdot \Delta R = \Delta, \quad (8)$$

де Δ - роздільна здатність засобу вимірювання.

Тоді (7) набуде виду:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon = 1 - & \left(\frac{L + x + 2\Delta}{\sqrt{\left(R + \frac{\Delta}{2}\right)^2 + (L + x + 2\Delta)^2}} + \right. \\
 & \left. + \frac{x + \Delta}{\sqrt{\left(R + \frac{\Delta}{2}\right)^2 + (x + \Delta)^2}} \right) \div \\
 & \left(\frac{L + x}{\sqrt{R^2 + (L + x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right) \approx k(x) \cdot \Delta. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Характер залежності $k(x)$ співвідношення (9) у випадку, коли $R = L$ (рис. 6) показує, що похибка методу залежить від відстані на якій проводиться вимірювання індукції магнітного поля. Враховуючи те, що точність вимірювання стандартних технічних засобів змінюється в межах від 10^{-6} м до 10^{-3} м, відносна похибка вимірювання індукції на поверхні постійного магніту може досягати 10 %.

При цьому для кожного зразка існує

відстань x_0 , на якій величина похибки змінює свій знак. Аналіз співвідношення (9) показав, що у випадку $R = L$ величина похибки набуває нульового значення при

$$x_0 \approx 1,56 \cdot R = 1,56 \cdot L. \quad (10)$$

Для вибору засобу контролю якості визначимо величину індукції магнітного поля на відстані x_0 .

$$\begin{aligned}
 B_x(x_0) & \approx \frac{B_r}{2} \left(\frac{L + x_0}{\sqrt{R^2 + (L + x_0)^2}} - \frac{x_0}{\sqrt{R^2 + x_0^2}} \right) = \\
 & = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L + 1,56L}{\sqrt{L^2 + (L + 1,56L)^2}} - \frac{1,56L}{\sqrt{L^2 + (1,56L)^2}} \right) \approx \\
 & \approx 0,045 \cdot B_r. \quad (11)
 \end{aligned}$$

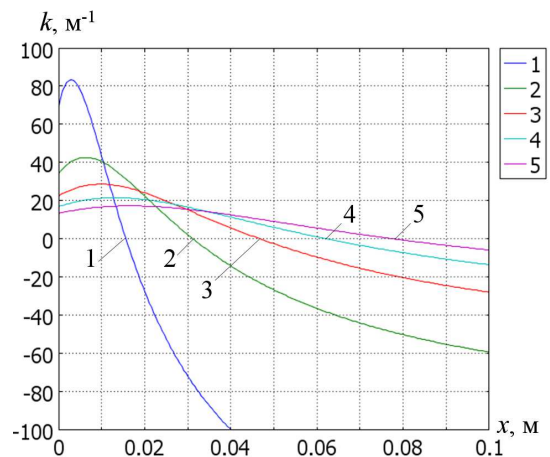


Рисунок 6 - Залежність величини коефіцієнта $k(x)$ співвідношення (9) від відстані до поверхні x полюсу циліндричного магніту при $R = L = 0,01$ м-1, $R = L = 0,02$ м-2, $R = L = 0,03$ м-3, $R = L = 0,04$ м-4, $R = L = 0,05$ м-5

Отже величина індукції магнітного поля на відстані x_0 не перевищує 4,5 % залишкової індукції постійного магніту.

Таким чином, з урахуванням (11) мінімальна роздільна здатність магнетометра для контролю залишкової індукції циліндричного постійного магніту повинна становити:

$$\Delta B_x(x_0) = 0,045 \cdot \Delta B_r, \quad (12)$$

де ΔB_r - абсолютна похибка визначення залишкової індукції при вимірюванні на відстані

x_0 .

Прийнявши величину $\Delta B_r = 0,0001$ Тл рівною роздільній здатності ферометра, одержуємо, що величина $\Delta B_x(x_0)$ повинна становити $\Delta B_x(x_0) = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Тл. Враховуючи те, що залишкова індукція сучасних магнітотвердих матеріалів досягає 1,5 Тл, величина вимірюваного магнітного поля постійного магніту на відстані x_0 становитиме не більше 0,068 Тл.

ВИСНОВКИ

Отже, на основі проведених досліджень показано, що похибка визначення залишкової індукції методом магнітометрії залежить від відстані до поверхні полюсу магніту. Визначено, відстань на якій похибка вимірювання залишкової індукції практично не залежить від точності визначення геометричних розмірів постійного магніту. Встановлено, величину роздільної здатності та діапазон вимірювань магнетометра для досягнення точності вимірювань ферометрів.

1. Svoboda J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials* // Kluwer Academic Publishers, USA. – 2004. – 404 p. 2. ГОСТ 8.268-77. *Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов.* -

М.: Изд-во стандартов, 1977. - 22 с. 3. ASTM A977 / A977M-07. *Standard Test Method for Magnetic Properties of High-Coercivity Permanent Magnet Materials Using Hysteresigraphs*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. 4. MMPA PMG-88. *Permanent Magnet Guidelines*. Magnetic Materials Producers Association. - Chicago, Illinois. 1988. - 28p. 5. MDFA 101 95. *Test Method for Determining Breakaway Force of a Magnet*. Magnetic Materials Producers Association. - Chicago, Illinois. 1995. – 5 p. 6. ГОСТ 24936-89. *Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования. Введ. 01.01.91.* - М.: Изд-во стандартов, 1989.-21.-С.7. Edward Ramsden, *Hall-Effect Sensors* - Santa Monica, USA: Advanstar Communications Incorporated, 2001. – 272 p. 8. *Постоянные магниты: Справочник/ Под ред. Ю. М. Пятина – Москва: "Энергия", 1980.— 488 с.* 9. *Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник/ Під ред. Є.С. Поліщук - Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2003. – 544.- с.*

Поступила в редакцію 25.05.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Древецький В. В., докт. техн. наук, проф. Маєвський С. М.