

УДК 621.317.42

## МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

**В. М. Гудь**Національний університет водного господарства та природокористування,  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна. E-mail: V.M.Hud@nuwm.edu.ua

Наведено основні характеристики та параметри магнітотвердих матеріалів. Розглянуто основні методи контролю якості постійних магнітів. Описано принципи роботи основних приладів контролю якості постійних магнітів. Обґрунтовано доцільність використання кожного з методів. Встановлено, що найвища точність визначення параметрів магнітотвердих матеріалів досягається ферометром. Показано, що при контролі якості постійних магнітів веберметром з котушкою Гельмгольца необхідно узгоджувати розміри котушки з розмірами магніту. Приведено розміри стандартних котушок Гельмгольца. Встановлено, що альтернативним пристроєм контролю якості може бути тесламетр. Доведено, що точність визначення параметрів магнітотвердих матеріалів з використанням тесламетра залежить від відстані до поверхні полюсу магніту. Показано, що на достовірність контролю якості шляхом визначення сили відриву впливає форма та якість поверхні взаємодії.

**Ключові слова:** постійний магніт, контроль якості, ферометр, веберметр, тесламетр, сила відриву.

## МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

**В. Н. Гудь**Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
ул. Соборна, 11, г. Ровно, 33028, Украина. E-mail: V.M.Hud@nuwm.edu.ua

Приведены основные характеристики и параметры магнитотвердых материалов. Рассмотрены основные методы контроля качества постоянных магнитов. Описаны принципы работы основных приборов контроля качества постоянных магнитов. Обоснована целесообразность использования каждого из методов. Установлено, что самая высокая точность определения параметров магнитотвердых материалов достигается ферометром. Показано, что при контроле качества постоянных магнитов веберметр с катушкой Гельмгольца необходимо согласовывать размеры катушки с размерами магнита. Приведены размеры стандартных катушек Гельмгольца. Установлено, что альтернативным устройством контроля качества может быть тесламетр. Доказано, что точность определения параметров магнитотвердых материалов с использованием тесламетра зависит от расстояния до поверхности полюса магнита. Показано, что на достоверность контроля качества путем определения силы отрыва влияет форма и качество поверхности взаимодействия.

**Ключевые слова:** постоянный магнит, контроль качества, ферометр, веберметр, тесламетр, сила отрыва.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Постійні магніти використовують для збудження магнітних полів електродвигунів, генераторів, магнітних сепараторів [1], вимірвальних приладів [2] та інших електротехнічних пристроїв. При цьому, виробники та споживачі постійних магнітів постійно стикаються з необхідністю контролю їхньої якості. Проблема полягає тому, що незважаючи на необхідність проведення такого тестування лише ферометр дозволяє визначити основні параметри постійних магнітів з високою точністю. Однак, мало хто зі споживачів магнітотвердих матеріалів має можливість здійснювати контроль даним пристроєм. Це насамперед пов'язано з його високою вартістю. Проте внаслідок значного притягання до магнітопроводу він практично непридатний для здійснення контролю якості магнітотвердих матеріалів у намагніченому стані.

Невпинне зростання об'ємів виробництва високоенергетичних постійних магнітів та його концентрація в окремих країнах світу, потребує підвищеної уваги до проблеми контролю їхньої якості. Особливої актуальності вона набуває у зв'язку із зростанням їхнього використання в сучасних електричних машинах та апаратах характеристики яких залежать і від параметрів магнітотвердих матеріалів.

Стандартним методом контролю якості постійних магнітів є вимірювання магнітного потоку з використанням котушки Гемгольца [3] під'єднаної до веберметра. Іноді контроль якості постійних магнітів здійснюють визначаючи силу відриву [4].

При цьому, питання точності контролю якості магнітотвердих матеріалів існуючими методами залишається відкритим. Відповідно, проблема підвищення точності існуючих та розробки нових методів експрес-контролю якості постійних магнітів є однією з актуальних для сучасного електромашинобудування.

Мета роботи – порівняльна оцінка існуючих методів визначення параметрів постійних магнітів для обґрунтування можливих шляхів їх вдосконалення у плані підвищення точності та зниження затрат часу на проведення вимірювань.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Основні параметри магнітних матеріалів. Як відомо [5], що для характеристики магнітного поля користуються двома векторними величинами індукцією магнітного поля та напруженістю. Взаємозв'язок між ними у вакуумі описується співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна.

При цьому показано [6], що магнітне поле в магнетиках є суперпозицією зовнішнього магнітного поля  $\mu_0 \vec{H}$  і власного магнітного поля намагніченого магнетика  $J$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}), \quad (2)$$

де  $\vec{J} = \mu_0 \vec{M}$  – магнітна поляризація магнетика;  $\vec{M}$  – намагніченість магнетика.

$$\bar{M} = \chi \bar{H}, \quad (3)$$

де  $\chi$  – магнітна сприйнятливість речовини, яка характеризує здатність речовин намагнічуватися у зовнішньому магнітному полі.

З врахуванням (3), вираз (2) набуде виду:

$$\bar{B} = \mu_0(\bar{H} + \chi \bar{H}) = \mu_0(1 + \chi)\bar{H} = \mu_0 \mu \bar{H}, \quad (4)$$

де  $\mu$  – магнітна проникливість речовини.

Відповідно до значення величини  $\mu$  магнетика поділяються на:

- діаманетики  $\mu < 1$ ;
- парамагнетики  $\mu > 1$ ;
- феромагнетики  $\mu \gg 1$ .

Показано [6], що у діаманетиків та парамагнетиків магнітна проникливість практично не змінюється з підвищенням напруженості магнітного поля.

У той же час для феромагнетиків величина  $\mu$  нелінійно залежить від  $H$ , тому її представляють у виді залежності  $B(H)$  або  $\mu(H)$ . Криву намагнічування-розмагнічування феромагнетиків називають петлею гістерезису (рис. 1). Вона представляє залежність індукції магнітного поля  $B$  у феромагнетик у від напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$ , що створюється як правило електромагнітом. Площа петлі гістерезису характеризує величину енергії, яку необхідно затратити на один цикл перемагнічування феромагнетика.

Петля гістерезису феромагнетиків характеризується:

- магнітна індукція насичення  $B_S$ ;
- залишковою магнітною індукцією  $B_r$ ;
- коерцитивною магнітною силою по індукції  $H_{cB}$ ;
- коерцитивною магнітною силою по намагніченості  $H_{cJ}$ .

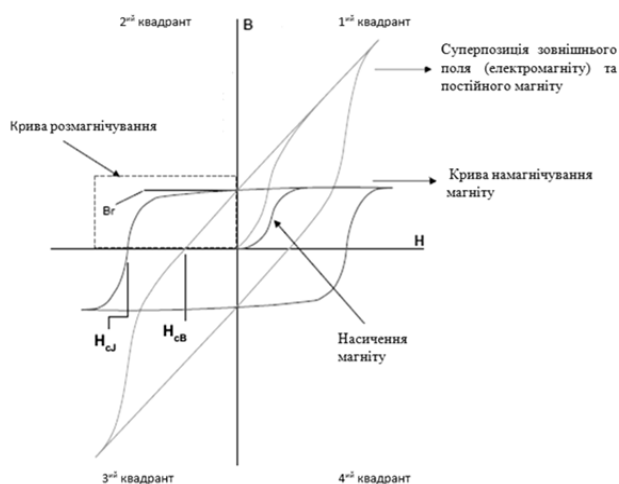


Рисунок 1 – Петля гістерезису феромагнетика

Індукція насичення  $B_S$ , характеризує значення магнітної індукції в матеріалі, який знаходиться у стані намагніченості технічного насичення. Вона визначається шляхом лінійної екстраполяції ділянки гістерезису за індукцією з області полів, що відповідають даному стану до нульового значення напруженості магнітного поля.

Залишкова магнітна індукція  $B_r$  характеризує інтенсивність власного магнітного поля, яке створюється феромагнетиком. При цьому, максимальна величина магнітної індукції, що створюється феромагнетиком може бути досягнута, лише в замкнутому магнітному колі.

Коерцитивна магнітна сила по індукції  $H_{cB}$  вказує на величину напруженості магнітного поля при якій магнітна індукція у феромагнетик у рівна нулеві.

Коерцитивна магнітна сила по намагніченості  $H_{cJ}$  вказує на величину напруженості магнітного поля при якій магнетик, спочатку намагнічений до стану насичення, розмагнічується. Чим вища коерцитивна сила, тим краще магнітний матеріал зберігає залишкову намагніченість. За величиною коерцитивної сили по намагніченості феромагнетики поділяються на:

- магнітом'які  $H_{cJ} < 10^3$  А/м;
- магнітотверді  $H_{cJ} > 10^3$  А/м.

Для магнітом'яких матеріалів характерні невеликі втрати енергії на перемагнічування, високі значення відносної магнітної проникливості, а відповідно малого магнітного опору. Тому вони широко використовуються, в якості магнітопроводів або концентраторів магнітного потоку.

У той же час втрати на перемагнічування магнітотвердих матеріалів достатньо високі, що й сприяло їхньому застосуванню в якості постійних магнітів.

Основні параметри постійних магнітів. Основною характеристикою постійного магніту є частина петлі гістерезису (рис. 1), яка знаходиться у другому квадранті – крива розмагнічування (рис. 2).

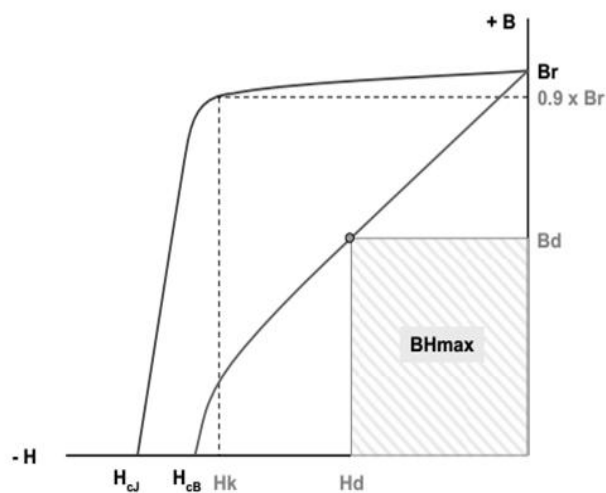


Рисунок 2 – Крива розмагнічування постійного магніту

При цьому, окрім кривої розмагнічування постійні магніти характеризують [7]:

- максимальна питома магнітна енергія  $(BH)_{max}$ ;
- температурний коефіцієнт залишкової магнітної індукції  $Tc(B_r)$ ;
- температурний коефіцієнт коерцитивної сили по намагніченості  $Tc(H_{cJ})$ ;

- максимальна робоча температура  $T_{max}$  ;
- температура Кюрі  $T_{cur}$  .

Максимальна питома магнітна енергія  $(BH)_{max}$  визначає, силу притягання магніту. Чим більшою є ця величина, тим потужнішим є постійний магніт.

Температурний коефіцієнт залишкової магнітної індукції  $Tc(B_r)$  показує зміни залишкової магнітної індукції при збільшенні температури на  $1^\circ C$  .

Температурний коефіцієнт коерцитивної сили по намагніченості  $Tc(H_{cJ})$  показує зміни коерцитивної сили по намагніченості при збільшенні температури на  $1^\circ C$  .

Максимальна робоча температура  $T_{max}$  визначає температуру до якої магніт тимчасово втрачає частину своїх магнітних властивостей. При зниженні температури магніт повністю відновлює всі магнітні властивості.

Температура Кюрі  $T_{cur}$  визначає температуру при якій магніт повністю розмагнічується. При зниженні температури постійний магніт який був нагрітий вище  $T_{cur}$  не відновлює магнітні властивості. У той же час магніт який нагрівається в межах від  $T_{max}$  до  $T_{cur}$  , при зниженні температури властивості відновлюються частково.

Матеріали постійних магнітів. Основою створення постійного магніту є магнітотвердий матеріал. За хімічним складом вони поділяються на 4 групи:

- магнітотверді матеріали системи альніко;
- магнітотверді ферити;
- рідкоземельні типу Sm-Co;
- рідкоземельні типу Nd-Fe-B.

Основні магнітні параметри магнітотвердих матеріалів наведено у табл. 1

Таблиця 1 – Основні параметри постійних магнітів [7]

Параметр	Альніко	Ферит	Sm-Co	Nd-Fe-B
$B_r$ , Тл	1,05-1,32	0,23-0,4	0,9-1,1	1,1-1,5
$H_{cB}$ , кА/м	44-110	127-240	600-740	780-995
$H_{cJ}$ , кА/м	59-115	135-320	1600-2400	950-2400
$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	32-80	10-29	155-240	240-380
$Tc(B_r)$ , %/°C	-0,01-0,02	0,3	-0,03-0,04	-0,10-0,12
$Tc(H_{cJ})$ , %/°C	-0,01-0,02	-0,18-0,2	-0,19-0,25	-0,56-0,57
$T_{max}$ , °C	520	250	380	220

Основним силовим параметром постійного магніту є залишкова магнітна індукція  $B_r$  . Тому всі відомі методи їхнього експрес-контролю засновані на визначенні величини  $B_r$  .

Контроль якості магнітотвердих матеріалів ферометром. Найбільш поширеним приладом контро-

лю магнітних властивостей магнітотвердих матеріалів є ферометр. Він дозволяє визначати миттєві значення напруженості та індукції магнітного у феромагнетиках, а відповідно відобразити петлю гістерезису [8]. Найпростіший ферометр складається з електромагніту з полюсними наконечниками між якими встановлюється досліджуваний зразок, джерела його живлення, вимірювальних котушок під'єднаних до веберметра та комп'ютеризованої системи керування (рис. 3). Принцип його роботи ґрунтується на поступовій зміні напруженості зовнішнього магнітного поля, що збуджується електромагнітом та вимірюванні індукції магнітного поля або магнітного потоку в замкненому магнітному колі з використанням датчика Холла або вимірювальної котушки.



Рисунок 3 – Будова найпростішого ферометра

Типові криві розмагнічування постійного магніту отримані з використанням ферометра приведені на рис. 4.

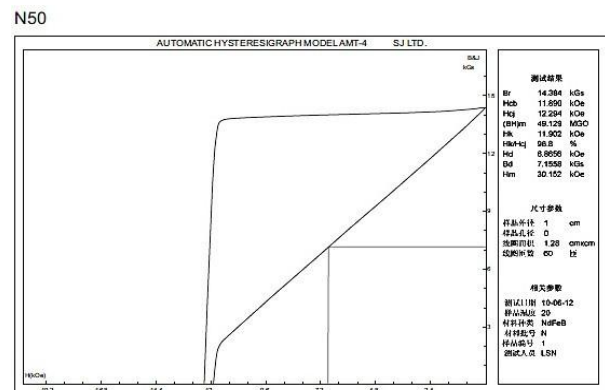


Рисунок 4 – Типова крива розмагнічування для магніту Nd-Fe-B марки N50

Однак незважаючи на високу точність та простоту вимірювань даний пристрій контролю якості постійних магнітів в стандартному виконанні він дозволяє контролювати магнітні характеристики циліндричних зразків з плоскими паралельними площинами діаметром до 120 мм та товщиною до 60 мм, які намагнічені нормально до площини основи. У той же час для контролю параметрів аркоподібних зразків необхідно виготовлення спеціальних полюсних наконечників, що прилягають до поверхні досліджуваного зразка. Тому він використовується, як правило, для отримання кривої розмагнічування магнітів на підприємствах-виробниках.

Контроль якості постійних магнітів веберметром. Для стандартного експрес-аналізу якості постійних магнітів використовують веберметр з під'єднаною до нього котушкою Гельмгольца [3]. При контролі параметрів даним приладом вимірюється кількість електрики, що переноситься струмом індукції через котушку при розміщенні або вийманні магніту з котушки (рис. 5).



Рисунок 5 – Контроль якості постійних магнітів з використанням котушки Гельмгольца

Основною перевагою даного методу є висока швидкість контролю постійних магнітів. Це швидкий і надійний тест, який не надто чутливий до розміщення магніту всередині котушки. Проте, для забезпечення високої точності визначення магнітних характеристик він потребує узгодження розмірів котушки і магніту [3], що ускладнено в умовах неперервного технологічного процесу виробництва магнітотвердих матеріалів різних форм. Найпростіша установка контролю магнітів з використанням котушки Гельмгольца та веберметра приведена на рис. 6.

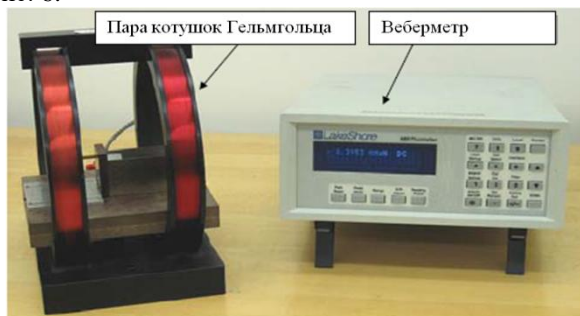


Рисунок 6 – Установка для контролю якості магнітів з використанням котушки Гельмгольца

Принцип роботи установки полягає у тому, що магнітний потік  $\Phi$ , пропорційний повному магнітному моменту зразка  $M$ :

$$\Phi = K_c \cdot M, \quad (5)$$

де  $K_c$  – постійна вимірювальної котушки.

Магнітний момент  $M$  магніту представимо як добуток його намагніченості у робочій точці  $J_d$  (рис. 7) на загальний об'єм  $V$ :

$$M = J_d \cdot V. \quad (6)$$

З врахуванням (6) вираз (5) прийме вид:

$$\Phi = K_c \cdot J_d \cdot V, \quad (7)$$

звідки маємо:

$$J_d = \frac{\Phi}{K_c \cdot V}. \quad (8)$$

Для феритових та рідкоземельних магнітів, у яких величина намагніченості  $J$  практично не залежить від напруженості зовнішнього поля  $H$  величина  $J_d$  практично рівна залишковій індукції магніту  $B_r$  (рис. 7).

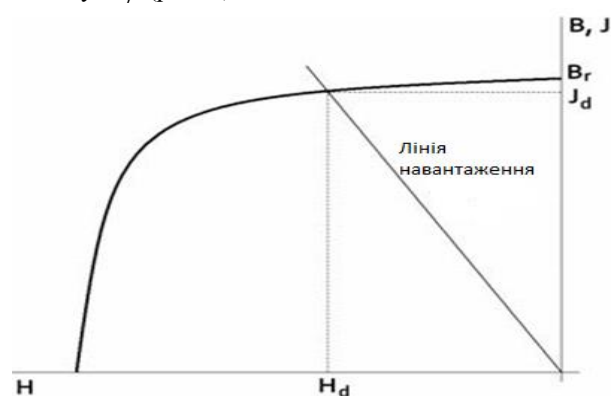


Рисунок 7 – Намагніченість магніту у робочій точці

Показано [3], що похибка вимірювань установкою лежить у межах 1 % у випадки коли радіус та висота магніту не перевищує 0,93 та 0,62 відповідно радіусу котушки (рис. 8).

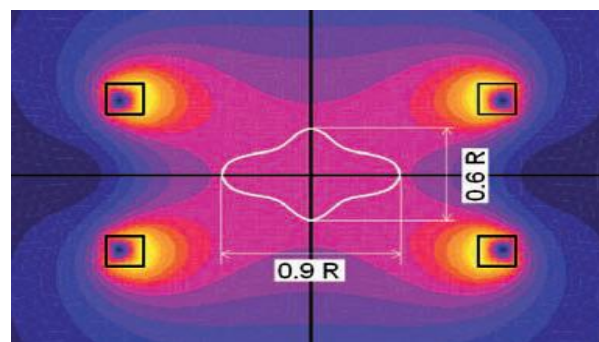


Рисунок 8 – Робоча область котушки Гельмгольца

Тому для забезпечення високої точності контролю якості постійних магнітів необхідно мати набір котушок Гельмгольца. Розміри стандартних котушок та їх характеристики приведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики стандартних котушок Гельмгольца

Модель	Діаметр котушки, мм	Постійна котушки	Максимальні розміри магніта	
			Діаметр, мм	Висота, мм
HM/R15	30	$4,5 \cdot 10^{-5}$	12	9
HM/R32	64	$1,1 \cdot 10^{-4}$	29	19
HM/R58	116	$4,5 \cdot 10^{-4}$	53	34
HM/R100	200	$2,8 \cdot 10^{-3}$	90	60
HM/R150	300	$7,3 \cdot 10^{-3}$	135	90
HM/R250	500	$8,8 \cdot 10^{-3}$	225	500

Контроль якості постійних магнітів тесла метром. Відкриття ефекту Холла [9] сприяло розвитку нових способів контролю якості постійних магнітів заснованих на вимірюванні індукції магнітного поля, яке створюється постійним магнітом. При цьому

вимірювання, як правило, здійснюється у замкненому магнітному колі (рис. 9) або на поверхні магніту (рис. 10) [10].

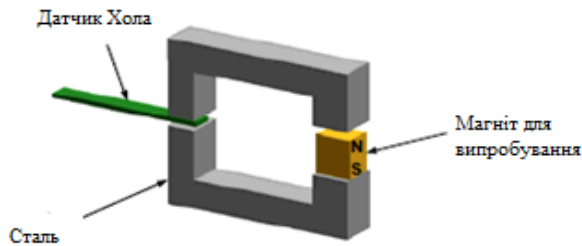


Рисунок 9 – Контроль якості в замкненому магнітному колі

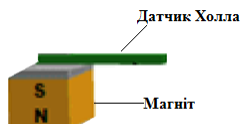


Рисунок 10 – Контроль якості шляхом вимірювання індукції магнітного поля на поверхні магніту

Проте проведені дослідження [11] показали, що вимірювання індукції магнітного поля на певній відстані до поверхні полюсу магніту дозволяє підвищити точність визначення залишкової індукції магнітотвердого матеріалу.

Принцип роботи даного методу заснований на співставленні виміряних значень індукції магнітного поля з розрахунковими значеннями. При цьому величину індукції магнітного поля яку генерує постійний магніт циліндричної форми на відстані  $x$  від центру полюсу (рис. 11) визначають за співвідношенням [12]:

$$B_x = \frac{B_r}{2} \left( \frac{L+x}{\sqrt{R^2+(L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2+x^2}} \right) \quad (9)$$

де  $B_r$  – залишкова магнітна індукція матеріалу;  $R$  та  $L$  – радіус та висота магніту.

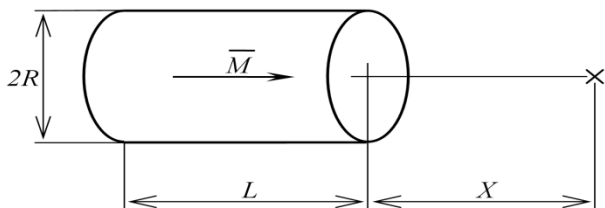


Рисунок 11 – Схема вимірювання магнітної індукції циліндричних постійних магнітів

А для прямокутно-призматичної форми магніту на відстані  $x$  від центру полюсу (рис. 12) визначається за співвідношенням [12]:

$$B_x = \frac{B_r}{\pi} \left( \tan^{-1} \left( \frac{AB}{2x\sqrt{4x^2+A^2+B^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{AB}{8(L+x)\sqrt{A^2+B^2+L+x^2}} \right) \right) \quad (10)$$

де  $B_r$  – залишкова магнітна індукція матеріалу;  $A$ ,  $B$  та  $L$  – геометричні розміри магніту.

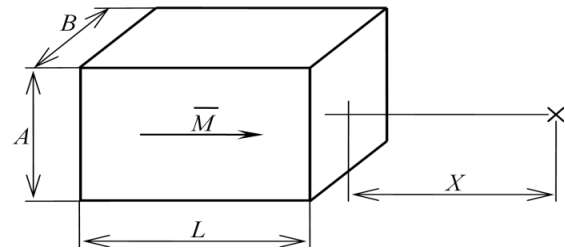


Рисунок 12 – Схема вимірювання магнітної індукції прямокутно-призматичних постійних магнітів

Враховуючи простоту методу він є найбільш перспективним для подальшого використання для експрес-контролю постійних магнітів. Однак, питання отримання аналітичних співвідношень для постійних магнітів інших форм залишається відкритим.

Контроль якості постійних магнітів за силою відриву. Іноді контроль якості магнітів здійснюють вимірюючи силу відриву магнітом'якого феромагнетика від поверхні полюсу магніту (рис. 13) [4].

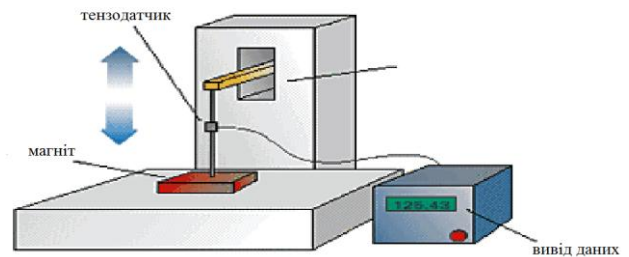


Рисунок 13 – Установка для визначення сили відриву

Робота пристрою ґрунтується на тому, що сила притягання магніту  $F$  пропорційна квадрату індукції на поверхні магніту  $B_0$  [4]:

$$F = \frac{B_0^2 S}{2\mu_0} \quad (11)$$

де  $S$  площа контакту феромагнетика з поверхнею полюсу постійного магніту.

При цьому, навіть невеликі повітряні зазори між магнітом і феромагнетиком суттєво впливають на точність контролю даним пристроєм.

**ВИСНОВКИ.** В результаті проведеного аналізу магнітних характеристик постійних магнітів та приладів контролю їхньої якості показано, що найвища точність визначення магнітних параметрів досягається ферометром.

Встановлено, що для зменшення похибки вимірювань залишкової магнітної індукції веберметром необхідно узгоджувати розміри котушки Гельмгольца та постійного магніту.

Доведено, що при контролі якості постійних магнітів методом відриву феромагнетика на точність вимірювань впливає поверхня контакту.

Показано, перспективність розробки методів контролю заснованих на визначенні розподілу магнітного поля, що створюється постійним магнітом.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Шведчикова И.А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
2. Slusarek B., Zakrewski K. Magnetic properties of permanent magnets for magnetic sensors working in wide range of temperature // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2012. – № 7b. – PP. 123–126.
3. Trout S.R. Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1988. – №4. – PP. 2108–2111.
4. MDFA 101 95. Test Method for Determining Breakaway Force of a Magnet. Magnetic Materials Producers Association. – Chicago, Illinois. 1995. – 5 p.
5. Svoboda J. Magnetic Techniques for the Treatment of Materials // *Kluwer Academic Publishers, USA*. – 2004. – 404 p.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука. 1984. – 208 с.
7. MMPA PMG-88. Permanent Magnet Guidelines. Magnetic Materials Producers Association. – Chicago, Illinois. 1988. – 28 p.

8. ASTM A977 / A977M-07. Standard Test Method for Magnetic Properties of High-Coercivity Permanent Magnet Materials Using Hysteresigraphs, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

9. Ramsden E., Hall-Effect Sensors - Santa Monica, USA: Advanstar Communications Incorporated, 2001. – 272 p.

10. Автоматический комплекс для тестирования и разбраковки высокоэнергетических постоянных магнитов / Ф.Б. Гриневиц, С.Г. Таранов, Р.О. Мазманыян, Б.А. Маршаленко // *Технічна електродинаміка*. – 2001. – № 4. – С. 64–65.

11. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятин – М.: «Энергия». 1980. – 488 с.

12. Гудь В.М. Аналіз похибки визначення залишкової індукції циліндричних постійних магнітів з осьовим намагніченням методом дистанційної магнітометрії // *Методи та прилади контролю якості*. – 2015. – № 34. – С. 78–82.

## METHODS AND DEVICES FOR QUALITY CONTROL OF THE PERMANENT MAGNETS

## V. Hud

National University of Water Management and Nature Resources Use  
vul. Soborna, 11, Rivne, 33028, Ukraine. E-mail: V.M.Hud@nuwm.edu.ua

**Purpose.** To compare the accuracy of known methods for determining of the permanent magnets parameters. **Methodology,** the basic characteristics and parameters of magnetic material are presented. The basic methods of quality control of permanent magnets are presented. The main principles of operation of devices for the quality control of permanent magnets are described. The expediency of using each method is shown. **Results,** It was established that the highest accuracy of the magnetic material parameters determination could be achieved by ferrometer. It is shown that for quality control of permanent magnet by fluxmeter with Helmholtz coil the coil size should coordinated with the size of the magnet. The standard sizes of Helmholtz coils are presented. It is shown that the gaussmeter could be used as an alternative device for quality control. It is proved that the accuracy of the magnetic material parameters determination with the gaussmeter depends on the distance to the surface of the magnet pole. It is shown that the shape and quality of interaction surface affect on the reliability of quality control by the determination of breakaway force. **Originality** shows that the measurement of the magnetic field at a distance to the surface of the magnet pole can increase the accuracy of the determination of residual induction of the magnetic material. **Practical value,** the results can be used to develop the quality control methods for permanent magnets. References 11, tables 2, figures 13.

**Key words:** permanent magnet, quality control, hysteresigraph, magnetic fluxmeter, gaussmeter, breakaway force.

## REFERENCES

1. Zagirnyak, M.V., Branspiz Y.A., Shvedchikova, I.A. (2011), *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya* [Magnetic separators. Problems of designing], Tehnika, Kyiv, Ukraine.
2. Slusarek, B., Zakrewski, K. (2012), "Magnetic properties of permanent magnets for magnetic sensors working in wide range of temperature", *Przegląd elektrotechniczny*, No.7b, pp. 123–126.
3. Trout, S.R. (1988), "Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements", *IEEE Transactions on Magnetics*, No.4, pp. 2108–2111.
4. MDFA 101 95 (1995), *Test Method for Determining Breakaway Force of a Magnet*. Magnetic Materials Producers Association, Chicago, Illinois, USA.
5. Svoboda, J. (2004), *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA.
6. Vonsovskiy, S.V. (1984), *Magnetizm* [Magnetics], Nauka, Moscow, Russia.
7. MMPA PMG-88 (1988), *Permanent Magnet Guidelines. Magnetic Materials*, Producers Association, Chicago, Illinois, USA.
8. ASTM A977 / A977M-07 (2007), *Standard Test Method for Magnetic Properties of High-Coercivity Permanent Magnet Materials Using Hysteresigraphs*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
9. Ramsden, E. (2001), *Hall-Effect Sensors*, Advanstar Communications Incorporated, Santa Monica, USA.
10. Hrynevych, F.B., Taranov, S.G., Mazmany-an, R.O., Marshalenko, B.A. (2001), "Automatic system for testing and grading of high-energy permanent magnets", *Technical Electrodynamics*, No. 4, pp. 64–65.
11. Pyatin, Y. M. (1980), *Postoyannuye magnity: Spravochnik* [Permanent magnets: Directory], Energiya, Moscow, Russia.
12. Hud, V.M. (2015), "Analysis of error determining residual induction cylindrical permanent magnets with axial magnetization by remote magnetometry", *Metody ta pryklady kontrolyu yakosti*, No. 34, pp. 78–82.

Стаття надійшла 27.10.2015.