

VLASTNOSTI FEROMAGNETICKÉ LÁTKY

Teorie:

Schopnost výrazně zesilovat vnější magnetické pole (případně si své magnetické pole ponechat i bez přispění vnějšího pole) má poměrně úzká skupina látek. Je to především čisté železo (odtud název feromagnetismus), dále různé druhy ocelí a slitiny kobaltu, niklu či chrómu. Z feromagnetických látek se vyrábějí například jádra transformátorů nebo paměťové prvky pro záznam informací.

Základní vztahy:

Po vložení feromagnetické látky do vnějšího pole o indukci B_0 , se k němu připočte

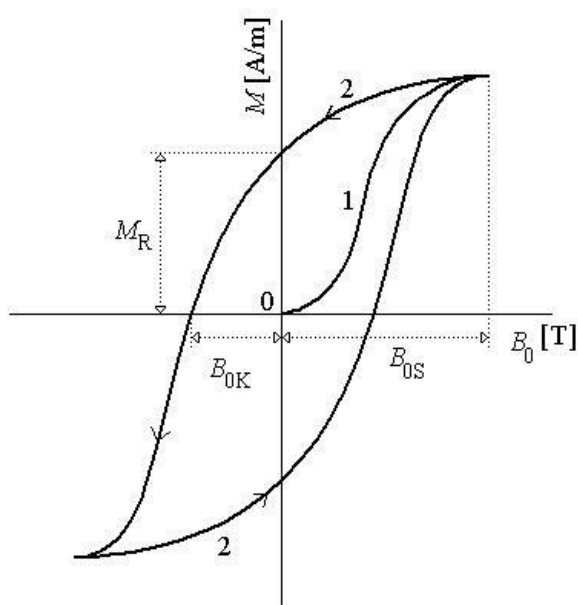
magnetická odezva feromagnetika, kterou nazýváme *magnetickou polarizací* J . V případě izotropního materiálu bude velikost B výsledné indukce rovna součtu velikostí obou veličin

$$B = B_0 + J.$$

Relativní „zesílení“ magnetického pole uvnitř feromagnetika můžeme popsat poměrem $\mu_r = B/B_0$,

(1)

kde μ_r je *poměrná permeabilita*, která charakterizuje uvažované prostředí. Pro vakuum je rovna jedné, pro vzduch prakticky také (přesnější hodnota pro vzduch teploty 0 °C a normálního tlaku je 1,000 000 38). U feromagnetických látek nabývá poměrná permeabilita hodnot řádově 10^2 až 10^5 a navíc je funkcí B_0 ($\mu_r = \mu_r(B_0)$) a teploty.



Obr. 1 : Křivka počáteční magnetizace a hysterezní smyčka

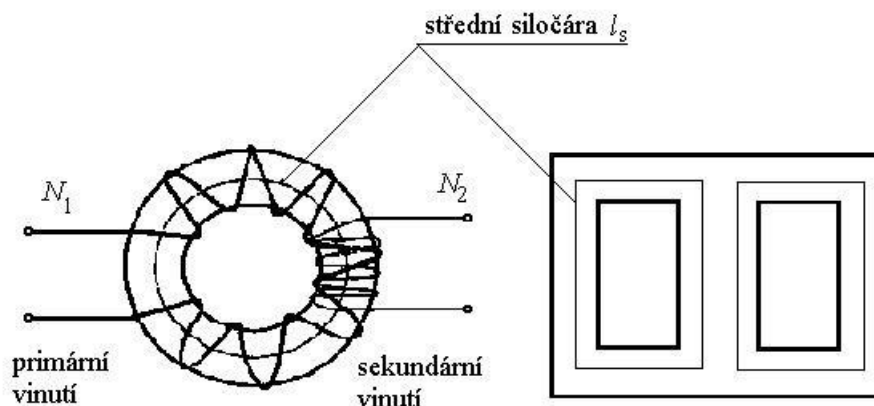
Závislost velikosti indukce B nebo *magnetizace* $M = (B - B_0)/\mu_0 = J/\mu_0$,

(2)

($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je permeabilita vakua) na indukci B_0 se obvykle znázorňuje graficky (viz *obrázek 1*). Vystavíme-li odmagnetované feromagnetické těleso vlivu vnějšího magnetického pole, jehož indukci B_0 zvyšujeme, roste současně velikost jeho magnetizace po křivce 1, kterou nazýváme křivkou počáteční magnetizace. Po dosažení hodnoty B_{0S} jeví látka magnetické nasycení, velikost magnetizace již dále na indukci nezávisí. Začneme-li velikost indukce snižovat, magnetizace nesleduje křivku 1, nýbrž klesá po křivce 2. Při vymizení vnějšího pole zůstává uvnitř látky zbytková magnetizace M_R , nazývaná magnetická remanence. Abychom ji odstranili, musíme použít magnetické pole opačné orientace až do velikosti indukce B_{0K} . Závislost 2 (M na B_0) se nazývá *hysterezní smyčka*.

Názorně vysvětluje feromagnetické vlastnosti látek Weissova¹ fenomenologická teorie [1].

¹ Weiss, Pierre (1865-1940), francouzský fyzik



Obr.2: Tvar vzorků pro měření magnetických vlastností

Mikroskopické (kvantově-mechanické) vysvětlení podali Frenkel² a Heisenberg³ [2].

K charakterizování feromagnetické látky se užívá magnetizačních křivek (křivka počáteční magnetizace + hysterezní smyčka) $M = M(B_0)$ nebo $B = B(B_0)$ a závislosti $\mu_r(B_0)$ poměrné permeability na indukci B_0 vnějšího magnetického pole. K nalezení uvedených závislostí je možno použít vzorek feromagnetické látky ve tvaru uzavřeného prstence konstantního průřezu S , jehož tloušťka musí být malá ve srovnání s průměrem prstence. Na prstenci je po celém obvodu navinuta cívka (toroid) o N_1 závitů (primární vinutí), která bude vytvářet magnetické pole, a měrná cívka (sekundární vinutí) s N_2 závitů (obrázek 2). Pro méně přesná měření může mít vzorek obdélníkový tvar (obrázek 2, vpravo).

Na primární vinutí přivedeme ze sítě střídavý proud $I(t) = I_m \cdot \cos \omega t$ o maximální hodnotě I_m a úhlové frekvenci $\omega = 2\pi f$, který bude budit uvnitř vinutí magnetické pole o (střídavé) indukci $B_0(t)$

$$B_0(t) = \mu_0 \frac{N_1}{l_s} I_m \cdot \cos \omega t$$

kde l_s je délka střední siločáry v prstenci (jádra). Jelikož ručkové přístroje k měření střídavého proudu udávají efektivní hodnoty veličin, naměříme v primárním obvodu proud $I_1 = I_m/\sqrt{2}$. Pro maximální velikost B_{0m} indukce potom bude platit

$$B_{0m} = \frac{\mu_0 \sqrt{2} N_1}{l_s} I_1 \quad (3)$$

Závity sekundárního vinutí prochází celkový střídavý magnetický tok $\Phi(t)$ ⁴

² Frenkel, Jakov Iljič (1894-1952), ruský fyzik

³ Heisenberg, Werner Karl (1901-1976), německý fyzik, Nobelova cena 1932

⁴ Magnetický (indukční) tok Φ [Wb] je skalární součin plošného elementu $d\vec{A}$ a magnetické indukce \vec{B} :
 $d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{A}$; celkově $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$.

$$\Phi(t) = N_2 S B_m \cos \omega t ,$$

který v tomto vinutí indukuje (dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce [1]) střídavé napětí $U(t)$

$$U(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = \omega N_2 S B_m \cdot \sin \omega t, U(t) = U_m \cdot \sin \omega t$$

Na voltmetru v sekundárním vinutí naměříme efektivní hodnotu napětí $U_2 = U_m / \sqrt{2}$. Maximální hodnotu B_m indukce v materiálu prstence (jádra) vypočteme ze vztahu

$$B_m = \frac{\sqrt{2}}{\omega N_2 S} U_2. \quad (4)$$

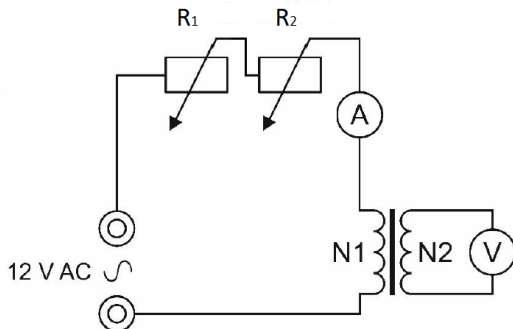
Poměrnou permeabilitu materiálu vypočteme buď ze vztahu (1) nebo přímo z naměřených hodnot proudů a napětí

$$\mu_r = \frac{l_s}{\mu_0 \omega N_1 N_2 S} \frac{U_2}{I_1}. \quad (5)$$

Pracovní úkol:

1. Proměřte křivku počáteční magnetizace feromagnetického materiálu (transformátorového plechu) a zjistěte závislost jeho poměrné permeability na velikosti indukce vnějšího magnetického pole.
2. Závislosti magnetizace, poměrné permeability a indukce materiálu na velikosti indukce vnějšího pole znázorníte graficky (i s chybovými úsečkami).
3. Naleznete maximální poměrnou permeabilitu materiálu.

Potřeby: zdroj střídavého napětí (oddělovací transformátor), autotransformátor, posuvné odpory, transformátor s feromagnetickým jádrem, voltmetr, ampérmetr.



Obr. 3: Schéma zapojení pro měření magnetických vlastností

Pokyny k měření a jeho zpracování:

- 1) Vzorek v transformátoru zapojíme do obvodu podle schématu na obrázku 3 a nejprve ho odmagnetujeme tak, že nastavíme magnetizační proud I_1 na hodnotu 1,5 A a snižujeme pomalu plynule k nule. Při vlastním měření zvyšujeme proud v primárním vinutí po předepsaných krocích (od 0,04 – 0,2 A krok po 0,02 A; od 0,2 – 1 A krok po 0,05 A; od 1 – 1,5 A krok po 0,1 A - nevracíme se k nižším hodnotám!) až po doporučenou konečnou velikost.
- 2) Poznamenanáme si uvedené parametry vzorku (l_s , S) a počty závitů vinutí transformátoru ($N_{1,2}$) i přesnost použitých měřidel.

- 3) Podle vztahů (3), (4), (2) a (1) či (5) vypočteme B_{0m} , B_m , M_m a μ_r , které spolu s naměřenými hodnotami I_1 a U_2 soustředíme do přehledné tabulky. Krajiní chyby vypočtených hodnot stanovíme $1 \times$ pro každou ze tří částí křivky počáteční magnetizace.
- 4) Graficky znázorníme magnetizační křivky $B_m = B_m(B_{0m})$ a $M_m = M_m(B_{0m})$ s chybovými úsečkami a rovněž závislost $\mu_r = \mu_r(B_{0m})$. Všechny tři křivky můžeme vynést do společného grafu, na vvislou osu v tom případě vyznačíme tři stupnice.
- 5) Po proložení grafu nalezneme maximální hodnotu poměrné permeability a jí příslušnou velikost indukce B_{0m} vnějšího magnetického pole.

Kontrolní otázky:

- 📖 V jakých jednotkách se měří indukce magnetického pole, magnetizace, magnetická polarizace a poměrná permeabilita?
- 📖 Jakých hodnot (řádově) nabývá poměrná permeabilita feromagnetických, diamagnetických a paramagnetických materiálů?
- 📖 Jakou číselnou hodnotu budete dosazovat za ω do vztahu (4)?

Literatura:

- [1] KOPAL, A., ERHART, J., ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L. *FYZIKA II*. Liberec: TUL, 2008.
- [2] KITTEL, Ch. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha: Academia, 1985.

Autoři: Mgr. Lubor Machonský, CSc.