

VYŠETROVANIE VLASTNOSTÍ FEROMAGNETIKA

Teoretický úvod:

Je známe, že v niektorých látkach vložených do vonkajšieho magnetického poľa sa magnetické pole zosilňuje. Je to spôsobené tým, že v látkovom prostredí prispievajú k magnetickému poľu vytvorenému makroskopickými (vonkajšími) prúdmi i elementárne magnetické dipóly (domény) obsiahnuté v látke.

Magnetickú indukciu v látke je možné preto vyjadriť vzťahom

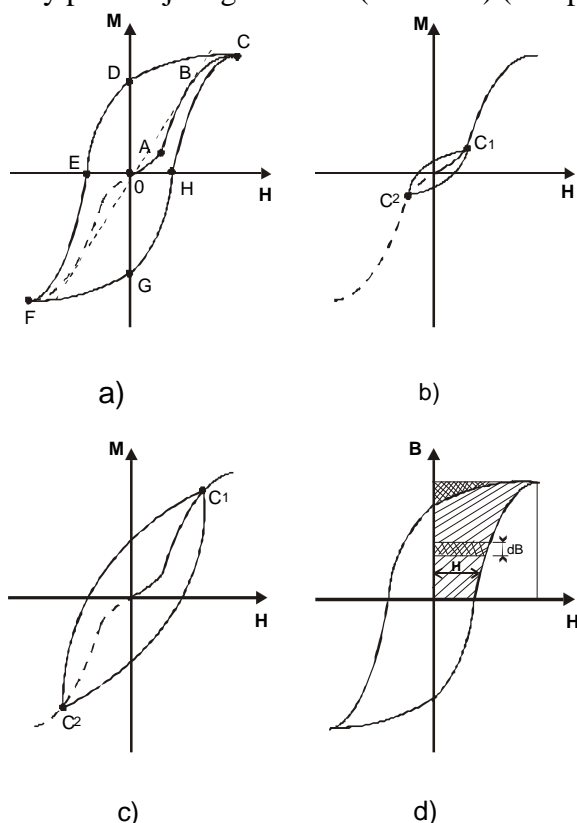
$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 H + \mu_0 \kappa H = \mu_0 (1 + \kappa) H = \mu H, \quad (1)$$

kde	B [T]	- hodnota vektora magnetickej indukcie vnútri látky
	H [A/m]	- hodnota vektora intenzity vonkajšieho magnetického poľa,
	M [T]	- hodnota vektora magnetizácie,
	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$	- permitivita vákua,
	κ	- magnetická susceptibilita, charakterizujúca magnetické vlastnosti materiálu jadra,

$$\mu = \mu_0 (1 + \kappa) = \mu_0 \mu_r \quad - \text{magnetická permeabilita materiálu jadra.}$$

Metóda merania:

V toroidnej cievke (a v mnohých iných prípadoch) je H úmerné intenzite elektrického prúdu. Avšak závislosť magnetizácie a tým aj magnetickej indukcie od intenzity magnetického poľa môže byť zložitá (obr. 1), vo všeobecnosti daná nejednoznačnou funkciou – rovnakej hodnote H môžu u tej istej látky prislúchať rôzne hodnoty magnetizácie. Ak magnetizujeme feromagnetickú látku prvýkrát, t.j. úplne odmagnetované feromagnetikum, magnetizácia materiálu jadra prebieha podľa krivky prvotnej magnetizácie (0-A-B-C) (tzv. panenskej) – obr. 1a, ktorá je pre danú látku jediná.



Obr. 1

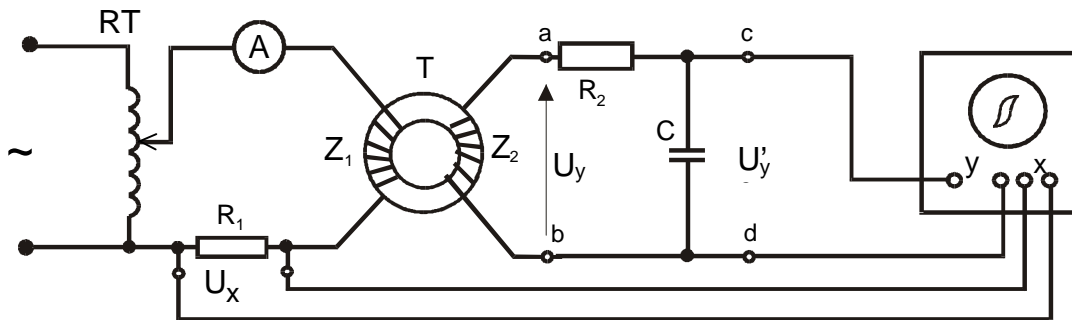
Do bodu A magnetizácia mierne rastie, od bodu A do bodu B rastie prudko vplyvom spontánnej orientácie domén a medzi bodmi B-C je nárast mierny, orientácia domén sa končí. Od bodu C už magnetizácia nerastie, dochádza k tzv. magnetickému nasýteniu jadra.

Pri znižovaní H z bodu C sa však už nebudeme vracat' rovnakými stavmi ale pre $H = 0$ skončíme v bode D. Látka ostáva zmagnetizovaná (remanentný magnetizmus). Odmagnetovanie látky dosiahneme opačným H v bode E (koercitívna sila). Cyklickou zmenou H sa budeme stále pohybovať po uzavretej krivke – hysteréznej slučke – C-D-E-F-G-H-C. Táto hysterézná slučka je pre danú látku maximálna a hodnota remanentného magnetizmu M_r (alebo remanentnej magnetickej indukcie B_r) v bode D a koercitívnej sily H_c v bode E sú charakteristickými veličinami pre túto látku.

Ak zmagnetizovanie cyklicky premenným H nedosiahne stavu nasýtenia, t.j. aspoň bodu C, budeme obiehať po menšej hysteréznej slučke. Takto môžeme pre danú látku získať celý rad

hysteréznych slučiek, pre ktoré je charakteristické, že ich hroty C_1 , C_2 ležia na krivke prvotnej magnetizácie, obr. 1b – 1c.

Hysteréznú slučku (nie však krivku prvotnej magnetizácie) môžeme zobrazíť na obrazovke



Obr. 2

osciloskopu pomocou zapojenia na obr. 2

Z feromagnetickej látky, ktorej magnetické vlastnosti skúmame, urobíme jadro transformátora T, najlepšie prstencové, malého prierezu S , aby všetky magnetické siločiarly boli približne rovnako dlhé. Cievkou Z_1 vytvárame vonkajšie magnetické pole H , pre ktoré platí

$$H = \frac{Z_1 I}{l} = \frac{Z_1 I}{\pi D}, \quad (2)$$

kde Z_1 - počet závitov primárnej cievky,
 $I = I_0 \sin \omega t$ [A] - prúd primárnou cievkou,
 $l = \pi D$ [m] - stredná dĺžka magnetickej siločiarly v toroide
 D [m] - stredný priemer jadra.

V jadre sa vytvorí magnetické pole, ktorého indukcia $B = \mu H$ a magnetický indukčný tok $\Phi = BS$. Na sekundárnej strane sa indukuje napätie

$$u_y = Z_2 \frac{d\phi}{dt} = Z_2 S \frac{dB}{dt},$$

ktoré je úmerné $\frac{dB}{dt}$. Preto k sekundárnemu vinutiu Z_2 pripájame integračný obvod $R_2 C$, na ktorého výstupe dostaneme napätie u_y úmerné B [T] ako je vidno z nasledovného vzťahu

$$U'_y = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{\tau} \int U_y dt = \frac{1}{\tau} \int Z_2 S \frac{dB}{dt} dt = \frac{Z_2 S}{\tau} B(t). \quad (3)$$

V tomto vzťahu $\tau = R_2 C$ je časová konštanta integračného obvodu, ktorá musí byť oveľa väčšia ako perióda striedavého prúdu privádzaného na vstup a Z_2 je počet závitov sekundárnej cievky.

Takto sme získali napätia U_x , úmerné H a U'_y , úmerné B , ktoré privedieme na vodorovné a zvislé vychýľovacie doštičky osciloskopu. Na obrazovke sa zobrazí hysterézná slučka.

Postup merania:

A. URČENIE KRIVKY PRVOTNEJ MAGNETIZÁCIE.

Pretože sa krivka prvotnej magnetizácie na obrazovke nezobrazí, využijeme pre jej zistenie skutočnosť, že hysterézne slučky s $H_{max} < H_{nasýt}$ majú hroty C_1 - C_2 položené na nej (obr. 1). Zistíme si prúd primárnym obvodom, pri ktorom už dochádza k nasýteniu jadra a približne po desatinách tejto hodnoty budeme prúd od nuly zvyšovať. Pre každú nastavenú hodnotu prúdu odčítame súradnice x, y zobrazenej hysteréznej slučky. Keďže hysterézná slučka je stredovo symetrická, robíme to tak, že pri určovaní súradnice x vypneme rozmietanie v smere y a na obrazovke sa objaví úsečka o dĺžke $l_x = 2x$. Analogicky určíme súradnicu y . Výsledky zapisujeme do tabuľky napr. tvaru:

Tabuľka I.

n	U_x [V]	U_y [V]	x [mm]	y [mm]	H [A/m]	B [T]	μ [TAm ⁻¹]
1							
.							
.							
n							

Hodnotu H určíme z prúdu $I = U_x/R_1$ pomocou vzťahu (2)

$$H = \frac{Z_1 U_x}{\pi D R_1}, \quad (4)$$

Kde $U_x = k_x x$ a k_x [V/mm] je napäťová konštanta osciloskopu Hodnotu B určíme zo vzťahu (3)

$$B = U_y \frac{R_2 C}{Z_2 S}, \quad (5)$$

kde $U_y = k_y y$ a k_y [V/mm] je napäťová konštanta osciloskopu, t.j. napätie potrebné na vychýlenie elektrónového lúča o jednotku dĺžky. Tabuľka súčasne slúži na transformácie x [mm] \rightarrow H [A/m] a y [mm] \rightarrow B [T].

B. SNÍMANIE HYSTERÉZNEJ SLUČKY A URČENIE HYSTERÉZNYCH STRÁT.

Energiu potrebnú na preorientáciu magnetických dipólov (domén), t. j. straty, môžeme vypočítať ako rozdiel prác potrebných na nárast magnetického indukčného toku a práce získanej pri jeho poklese. Možno ukázať, že tento rozdiel je úmerný ploche hysteréznej slučky vyjadrujúcej závislosť B od H . Pre prácu môžeme písať $dA = Id\Phi$, kde $\Phi = Z_1 SB$, takže $dA = IZ_1 SdB$.

Za prúd I dosadíme zo vzťahu (2)

$$I = \frac{\pi D H}{Z_1},$$

takže

$$dA = \frac{\pi D}{Z_1} Z_1 S H dB = \pi D S H dB = V H dB,$$

kde $V = \pi D S$ [m³] je objem feromagnetického jadra.

Integráciou cez celú hysteréznú slučku dostaneme práve rozdiel uvedených prác

$$W_1 = \oint dA = \oint V H dB$$

naznačený na obr. 1d a spotrebovaný za jeden cyklus v jednotkovom objeme jadra.

Z uvedeného je zrejmé, že veľkosť strát je úmerná ploche hysteréznej slučky, ktorú získame prekreslením z obrazovky osciloskopu. Pri tom nesmieme zabudnúť na merítka a smer osí x , y . Z údajov v tab. 1 urobíme transformácie $x \rightarrow H$ a $y \rightarrow B$. Zakresľujeme hysteréznú slučku, pri ktorej práve došlo k nasýteniu, alebo miernemu presýteniu jadra.

Celková stratená energia za jednu sekundu pripadajúca na jednotku objemu jadra je teda úmerná frekvencii prúdu a ploche P hysteréznej slučky vyjadrená v súčine

$$W_c = P V f = H B V f, \quad (6)$$

kde $P = H B$ [Jm⁻³] a f [Hz] je frekvencia použitého striedavého prúdu.

Veličinu $P = H B$, úmernú ploche hysteréznej slučky, určíme z hysteréznej slučky nakreslenej vo vhodnej mierke na milimetrový papier. Zistíme si hodnotu 1 cm v smere x vyjadrenú v H [A/m] a hodnotu 1 cm v smere y vyjadrenú B [T] a vypočítame hodnotu 1 cm² v $P_1 = H_1 B_1$ [AT/m], ktorú vynásobíme plochou ohraničenou hysteréznou slučkou v cm².

C. URČENIE ZÁVISLOSTI PERMEABILITY FEROMAGNETICKEJ LÁTKY JADRA OD INTENZITY MAGNETICKÉHO POĽA

Túto závislosť určíme z krivky prvotnej magnetizácie s využitím vzťahu (1), z ktorého plynie

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{resp.} \quad \mu_{dyn.} = \frac{dB}{dH} .$$

D. VYŠETRENIE AMPLITÚDOVÝCH A FÁZOVÝCH POMEROV NAPÄTÍ V OBVODE S FEROMAGNETIKOM.

Skúmaný obvod je zložený z lineárneho člena odporového elementu a indukčnosti obsahujúcej feromagnetikum. Vplyv feromagnetika sa prejaví nielen na zosilnení magnetickej indukcie, ale jeho nelinearita, menovite v oblasti saturácie, zmení i charakter priebehu indukovaného napätia.

Pre vyšetrovanie týchto skutočností si prepne osciloskop na vlastnú časovú základňu.

Ako prvé si overíme závislosť krivky napájacieho prúdu od amplitúdy a to na odpore R_1 . Napätie U_x pripojíme na vstup y osciloskopu a napájací prúd meníme od nuly až do hodnoty, kedy dochádza k presýteniu jadra. Pretože ostáva približne platné

$$I = I_0 \sin(\omega t) \quad \text{bude i} \quad H = \frac{Z_1}{l} I_0 \sin(\omega t) .$$

Potom si overíme priebeh napätia U_y na výstupe transformátora, t.j. medzi bodmi a-b. Platí $B = \mu H$ a $U_y = k dB / dt$. Priebeh B je ale deformovaný závislosťou μ na H , a preto napätia U_y nebude vždy sinusové.

Nakoniec si overíme, aký je priebeh napätia U'_y na výstupe integračného člena, t.j. medzi bodmi c-d.

Úlohy:

1. Zapojte prístroje podľa schémy.
2. Zistíte prúd, pri ktorom dochádza k miernemu presýteniu jadra a túto hodnotu rozdeľte na 10 častí. Pri každej hodnote takto určeného prúdu určte súradnice x a y hrotov hysteréznej slučky (body C_1 z obr. 1). Namerané hodnoty zapisujte do tabuľky.
3. Odkreslite si z obrazovky osciloskopu hysteréznú slučku pri mierne presýtenom jadre.
4. Podľa časti D si overte vplyv prvkov obvodu na priebehy napätí v uvedených miestach a urobte si ich nákresy.

Spracovanie výsledkov:

1. Z obrazovky prekreslenú hysteréznú slučku preneste na milimetrový papier. Na krivke si zvolte dostatočný počet bodov a určte ich súradnice x v [A/m] a y v [T].
2. S využitím vzťahov (4) a (5) prevedte súradnice x a y v tab. 1 pre body na A/m pre H a na T pre B . Vypočítajte μ a doplňte tabuľku.
3. Pomocou doplnenej tabuľky priradte bodom x a y hysteréznej slučky hodnoty H [A/m] a B [T].
4. Do spoločného grafu B [T] = f (H [A/m]) zakreslite krivku prvotnej magnetizácie a hysteréznú krivku.
5. Z hysteréznej slučky zistíte pre materiál jadra hodnoty remanentnej magnetickej indukcie B_r a koercitívnej sily H_c .

6. Určte plochu ohraničenú hysteréznou krivkou a z nej pomocou vzťahu (6) hysterézne straty v jadre.
7. Doplňte získané nákresy priebehov napätí vysvetlujúcim komentárom.

Kontrolné otázky:

1. Vysvetlite vlastnosti feromagnetických látok.
2. Ktorými veličinami je charakterizovaný magnetický stav látky?
3. Čo je to krivka prvotnej magnetizácie jadra a čo hysterézna slučka? Ako spolu súvisia?
4. Čo sú to hysterézne straty?
5. Vysvetlite Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie a jeho uplatnenie v obvode pre snímanie hysteréznej slučky.
6. Čo je to napäťová konštanta osciloskopu a ako sa určuje?