

# 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

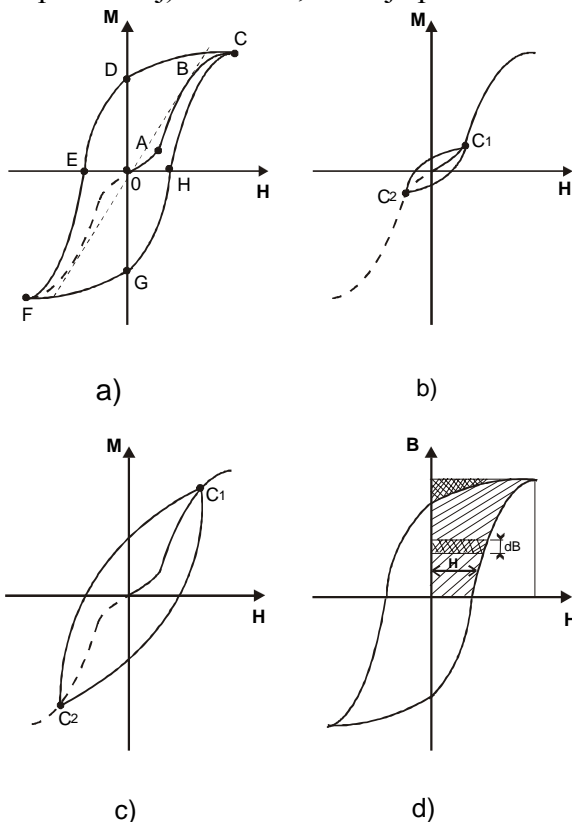
$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 H + \mu_0 \kappa H = \mu_0 (1 + \kappa) H = \mu H, \quad (1)$$

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,  
 $\kappa$  - magnetická susceptibilita, charakterizujúca magnetické vlastnosti materiálu jadra,

$\mu = \mu_0(1 + \kappa) = \mu_0 \mu_r$  - 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, magnetizácia materiálu jadra prebieha podľa krivky prvotnej magnetizácie (0-A-B-C) (tzv. panenskej) – obr. 1a, ktorá je pre danú látku jediná.



Obr. 1

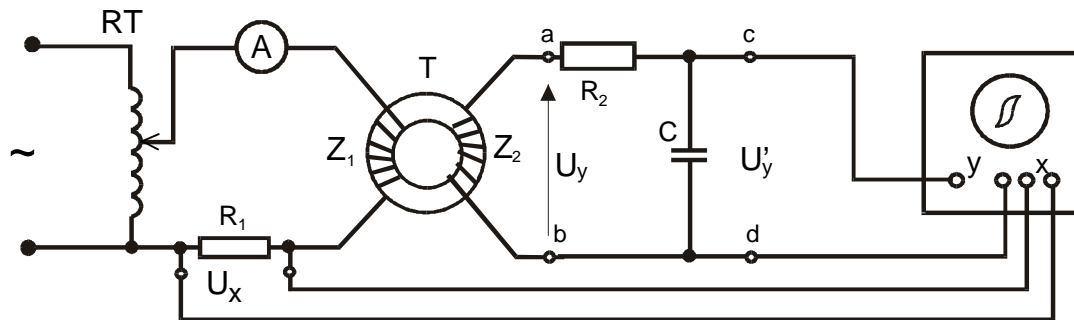
Do bodu A magnetizácia mierne rastie, od bodu A do bodu B rastie prudko vplyvom spontánnej orientácie domén a medzi bodmi B-C je nárast mierny, orientácia domén sa končí. Od bodu C už magnetizácia nerastie, dochádza k tzv. magnetickému nasýteniu jadra.

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). Odmagnetizovanie 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  $M_r$  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 osciloskopu pomocou zapojenia na obr. 2



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	$I$ [A]	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$H$ [A/m]	$B$ [T]	$\mu$ [TAm <sup>-1</sup> ]
1						
.						
.						
n						

Hodnotu  $H$  určíme z prúdu pomocou vzťahu (2)

$$H = \frac{\sqrt{2} Z_1 I}{\pi D}, \quad (4)$$

kde sme násobiteľ  $\sqrt{2}$  pridali preto, aby sme získali maximálnu hodnotu (amplitúdu). 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)

$$I = \frac{\pi DH}{Z_1},$$

takže

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

kde  $V = \pi D S$  [m<sup>3</sup>] 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<sup>-3</sup>] 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 cm<sup>2</sup> v  $P_1 = H_1 B_1$  [AT/m], ktorú vynásobíme plochou ohraničenou hysteréznou slučkou v cm<sup>2</sup>.

### 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  $\mu$  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  $\mu$  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?