MERANIE MAGNETIZAČNÝCH CHARAKTERISTÍK

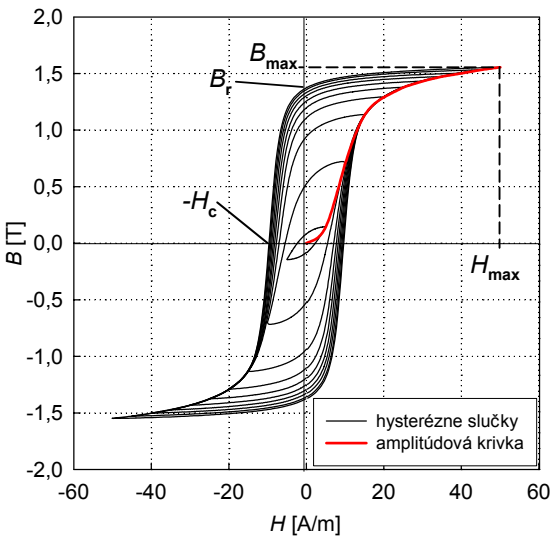
(Elemír Ušák)

Úloha.

1. Pomocou osciloskopu odmerajte maximálnu dynamickú hysteréznu slučku feromagnetického materiálu. Z tejto slučky odčítajte hodnoty remanentnej magnetickej indukcie B_r a koercitívneho poľa H_c.
2. Odmerajte amplitúdovú charakteristiku tejto vzorky.

Analýza úlohy.

Hysterézna slučka je závislosť veličín magnetického poľa, a to magnetickej indukcie B od intenzity magnetického poľa H vo feromagnetickej látke. V závislosti od rýchlosti zmien budiaceho magnetického poľa rozlišujeme hysterézne slučky (kvázi-)**statické** pre pomalé zmeny poľa, (ktoré možno považovať za takmer konštantné) a **dynamické** (rýchle zmeny poľa až do veľmi vysokých frekvencií). Príklad typickej hysteréznej slučky je na obrázku č. 1.



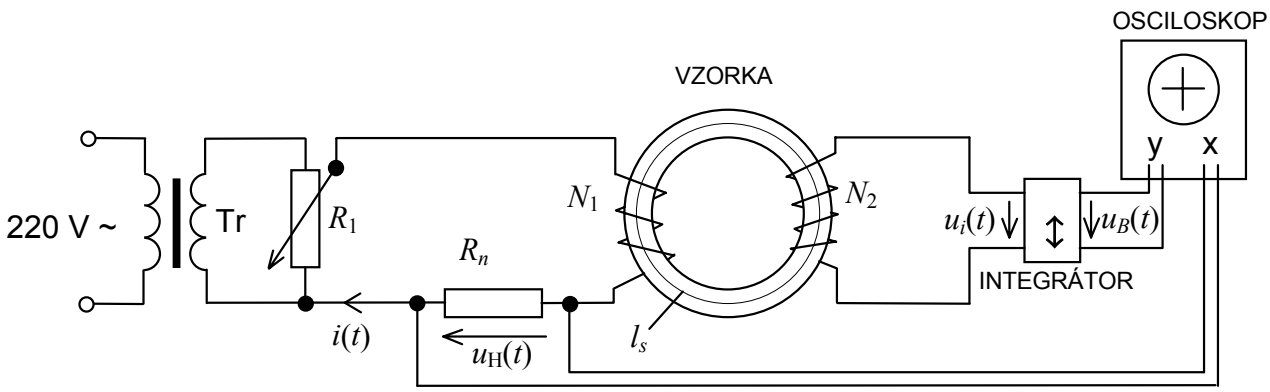
Obrázok č. 1: Príklad hysteréznej slučky.

Remanentná magnetická indukcia B_r je definovaná ako veľkosť magnetickej indukcie pri nulovej intenzite magnetického poľa na hornej vetve hysteréznej slučky.

Koercitívne pole H_c je definované ako veľkosť intenzity magnetického poľa pri nulovej magnetickej indukcii na dolnej vetve hysteréznej slučky (pozri obrázok č. 1).

Amplitúdová charakteristika magnetického materiálu je definovaná ako množina vrcholov hysteréznych slučiek $\{[H_{max,i}, B_{max,i}]\}$ v prvom kvadrante súradnicovej sústavy HB meraných pri rôznych veľkostiach amplitúdy intenzity magnetického poľa. Meraná vzorka je v tomto prípade magnetovaná časovo premenlivým prúdom s definovanou amplitúdou I_{max} (z ktorej je možné určiť H_{max}) a frekvenciou základnej harmonickej zložky.

Dynamické hysterézne slučky možno snímať zariadeniami nazývanými hysterézigrafy. Princíp takéhoto zariadenia je znázornený na obrázku č. 2.



Obrázok č. 2: Principiálna schéma zapojenia zariadenia na pozorovanie dynamických hysteréznych slučiek. Tr je transformátor, potenciometer R_1 slúži na nastavenie veľkosti magnetujúceho prúdu.

Intenzita magnetického poľa $H(t)$ je daná vzťahom (1):

$$H(t) = \frac{N_1}{l_s . R_n} . u_H(t) \qquad (1)$$

kde N_1 je počet závitov magnetujúceho vinutia, l_s je stredná dĺžka siločiary, R_n je velkosť odporu normálového rezistora slúžiaceho na snímanie magnetujúceho prúdu a $u_H(t)$ je okamžitá hodnota napätia na snímacom rezistore odčítaná z obrazovky osciloskopu v danom bode hysteréznej slučky.

Magnetická indukcia sa dá vypočítať pomocou vzťahu (2):

$$B(t) \doteq \frac{CR}{N_2 . S} u_B(t) \qquad (2)$$

kde C je kapacita kondenzátora a R je odpor rezistora v integračnom RC-článku, N_2 je počet závitov snímacieho vinutia, S je priečny prierez vzorky a $u_B(t)$ je okamžitá hodnota napätia na výstupe integrátora odčítaná z obrazovky osciloskopu v danom bode hysteréznej slučky.

Postup pri meraní:

Úloha 1

1. Pomocou potenciometra R_1 nastavte magnetujúci prúd tak, aby bola dosiahnutá čo najväčšia hodnota maximálnej magnetickej indukcie B_{max} (aby materiál bol v nasýtenom stave prejavujúcom sa spomalením nárastu magnetickej indukcie).
2. Nastavte polohu jednotlivých osí súradnicovej sústavy na obrazovke osciloskopu tak, že odpojíte jednotlivé kanály (x, resp. y) a potenciometrami horizontálneho resp. vertikálneho posuvu nastavíte vhodnú polohu svetelnej stopy vzhľadom na raster.
3. Z obrazovky osciloskopu odčítajte hodnoty napätí u_{Hi} a u_{Bi} pre niekoľko bodov hysteréznej slučky (minimálne 10 v hornej polrovine súradnicovej sústavy).
4. Pomocou vzťahov (1) a (2) vypočítajte hodnoty H_i a B_i.
5. Z nameranej hysteréznej slučky odčítajte hodnoty remanentnej magnetickej indukcie B_r a koercitívneho poľa H_c.
6. Na konci merania prepnite osciloskop do režimu časovej základne a pozorujte časové priebehy intenzity magnetického poľa a magnetickej indukcie.

Úloha 2

1. Pomocou potenciometra R_1 nastavte magnetujúci prúd na rôzne hodnoty tak, aby interval od nuly po maximálnu možnú hodnotu intenzity magnetického poľa (určenú v úlohe 1) bol rozdelený na **minimálne 10 približne rovnakých úsekov**.
2. Z obrazovky osciloskopu odčítajte hodnoty napätí $u_{Hmax,i}$ a $u_{Bmax,i}$ určujúce vrchol hysteréznej slučky.
3. Pomocou vzťahov (1) a (2) vypočítajte hodnoty $H_{max,i}$ a $B_{max,i}$.
4. Postup zopakujte pre každú z hodnôt H zvolených v bode 1 a získanú množinu bodov vyneste do grafu ako amplitúdovú charakteristiku.

Spracovanie výsledkov.

Namerané a vypočítané hodnoty zapíšte do tabuliek nameraných a vypočítaných hodnôt podľa nasledovných vzorov:

Úloha 1

i	u_{Hi} [mV]	H_i [A/m]	u_{Bi} [mV]	B_i [T]

Úloha 2

i	$u_{Hmax,i}$ [mV]	$H_{max,i}$ [A/m]	$u_{Bmax,i}$ [mV]	$B_{max,i}$ [T]

Dodatok.

Na určenie veľkosti intenzity magnetického poľa vo vzorke je možné využiť I. Maxwellovu rovnicu v integrálnom tvare (3), ktorá vyjadruje vzťah medzi okamžitou hodnotou prúdu $i(t)$ tečúceho primárnym (tzv. budiacim alebo magnetujúcim) vinutím s počtom závitov N_1 a okamžitou hodnotou intenzity magnetického poľa vo vzorke $H(t)$.

$$\oint \boldsymbol{H}(t)\cdot d\boldsymbol{r} = N_1.i(t), \tag{3}$$

V prípade toroidnej vzorky s dostatočne malým rozdielom medzi vonkajším a vnútorným priemerom možno magnetické pole vo vzorke považovať za homogénne a vektor intenzity magnetického poľa za vektor s konštantnou veľkosťou, ktorý je v každom bode integračnej dráhy rovnobežný s vektorom elementu dráhy $d\boldsymbol{r}$ (platí to pre integračnú dráhu v tvare kružnice so stredom totožným so stredom toroidu). Vtedy sa skalárny súčin v integráli (3) zmení na obyčajný súčin a konštantnú intenzitu (vzhľadom na dráhu) možno vyňať pred integrál. Integrál elementu dráhy potom možno nahradiť dĺžkou integračnej dráhy - kružnice, ktorá sa zvykne označovať aj ako stredná dĺžka siločiary l_s. Do série s primárnym vinutím je zaradený normálový rezistor R_n. Úbytok napätia $u_H(t)$ na tomto rezistore úmerný magnetujúcemu prúdu je mierou intenzity magnetického poľa vo vzorke a je privedený na x-ový zosilňovač osciloskopu. Intenzita magnetického poľa $H(t)$ je potom daná vzťahom (4):

$$H(t) = \frac{N_1}{l_s.R_n}.u_H(t) \tag{4}$$

Na určenie veľkosti magnetickej indukcie je potrebné na vzorku navinúť sekundárne (tzv. snímacie) vinutie s počtom závitov N_2. Napätie indukované v tomto vinutí $u_i(t)$ je podľa Faradayovho zákona (5) úmerné derivácii magnetického toku $\Psi(t)$ podľa času v priečnom priereze vzorky S.

$$u_i(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = N_2 S\frac{dB(t)}{dt} \tag{5}$$

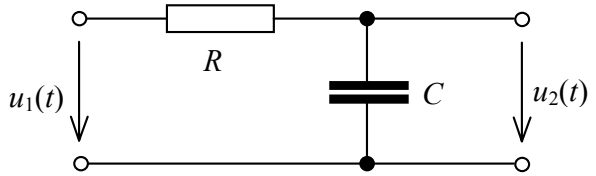
Hustotu magnetického toku (magnetickú indukciu $B(t)$) možno teda určiť podľa vzťahu (6):

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S}\int u_i(t)dt \tag{6}$$

Z uvedených vzťahov je zrejmé, že na získanie napätia úmerného magnetickej indukcii je nutné použiť integrátor. Takto získané napätie sa privádza na y-ový zosilňovač osciloskopu.

Ako najjednoduchší integrátor sa dá použiť pasívny *RC*-článok znázornený na obrázku č. 3, ktorého prenosová funkcia vyjadrená pomocou Laplaceovej transformácie má tvar (7):

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{pCR+1} \tag{7}$$



Obrázok č. 3: Zapojenie pasívneho *RC*-článku ako integrátora.

Nakoľko ale integrovanie v časovej oblasti (pri nulových počiatočných podmienkach) znamená v operátorovej oblasti delenie premennou *p*, ideálny integrátor má prenosovú funkciu *H*(*p*) danú vzťahom (8)

$$u_2(t) = k\int u_1(t)dt\,, \quad H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{k}{p} \tag{8}$$

Pre harmonické časové priebehy môžeme v predchádzajúcich dvoch vzťahoch premennú veličinu *p* nahradiť výrazom jω. Z porovnania výrazov (7) a (8) sa dá usúdiť, že jednoduchý pasívny *RC*-článok sa dá použiť ako integrátor vtedy, keď je možné zanedbať jednotku v menovateli vzťahu (7). Musí teda byť splnená podmienka (9)

$$\omega RC >> 1 \tag{9}$$

pričom súčin *RC*=τ udáva časovú konštantu integrátora. Táto podmienka sa dá využiť ako kritérium pre voľbu hodnôt prvkov *R* a *C*, prípadne minimálnej frekvencie, od ktorej je možné takýto *RC*-článok považovať za dostatočne kvalitný integrátor s minimálnou fázovou, ako aj amplitúdovou chybou. Vtedy vzťah (7) opisujúci prenosovú funkciu *RC*-článku možno napísať v tvare (10)

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} \doteq \frac{1}{pCR} \tag{10}$$

a výstupné napätie takéhoto integrátora bude podľa (8)

$$u_2(t) \doteq \frac{1}{CR}\int u_1(t)dt \tag{11}$$

pričom vstupné napätie integrátora $u_1(t) = u_i(t)$. Magnetická indukcia po skombinovaní rovníc (6) a (11) s využitím rovnosti $u_2(t) = u_B(t)$ je potom daná vzťahom (12)

$$B(t) \doteq \frac{CR}{N_2 S} u_B(t) \tag{12}$$

Nevýhodou uvedeného integrátora oproti ideálnemu je okrem iného aj nežiadúce zoslabenie výstupného napätia dané časovou konštantou v menovateli prenosovej funkcie (10), čo môže spôsobiť problémy pri meraní výstupného napätia. Z toho dôvodu sa v praxi používajú aktívne integrátory využívajúce rozličné zapojenia s operačnými zosilňovačmi.