

## 19. Měření amplitudové permeability

### Úkol měření

1. Zobrazte na osciloskopu dynamickou hysterezní smyčku prstencového vzorku magneticky měkkého materiálu při napěťovém magnetování (sinusovém průběhu  $B$ ) pro zadanou maximální hodnotu magnetické indukce  $B_m = \dots$  T. Pozorujte vliv velikosti integrační konstanty použitého pasivního integračního RC článku na tvar smyčky a pro další měření zvolte nejvhodnější možnost. Z naměřených hodnot  $I_m$  a  $U_m$  a zadaných parametrů vzorku určete skutečné hodnoty  $H_m$  a  $B_m$ . Dále pomocí osciloskopu zjistěte hodnotu remanence  $B_r$  a koercitivitu  $H_c$ .
2. Změřte závislost amplitudové permeability  $\mu_a$  na maximální hodnotě magnetické indukce pro zadané hodnoty  $B_m = \dots; \dots; \dots; \dots; \dots; \dots; \dots$  T.

### Poznámky k měření:

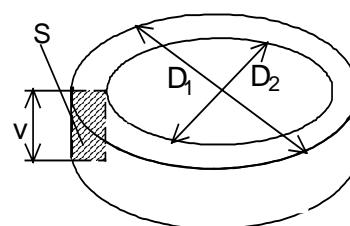
Před měřením spočítejte pro zadané hodnoty  $B_m$  odpovídající hodnoty napětí na měřicím vinutí  $N_2$ . Při měření nastavte buzení vzorku tak, abyste těchto hodnot napětí dosáhli.

Maximální hodnoty magnetovacího proudu  $I_m$  zjišťujte pomocí měření úbytku napětí na snímacím rezistoru číslicovým osciloskopem. Synchronizace: Line (síťový kmitočet), hodnotu  $U_{\max}$  měřte s průměrováním.

Parametry vzorku:

počty závitů:  $N_1 = (\varnothing \text{ mm}),$   
 $N_2 = (\varnothing \text{ mm})$   
 rozměry:  $D_1 = \text{ mm}, D_2 = \text{ mm},$   
 $v = \text{ mm}$

RC článek:  $C = 470 \text{ nF}, R_1 = 40 \text{ k}\Omega,$   
 $R_2 = 120 \text{ k}\Omega, R_3 = 350 \text{ k}\Omega$



obr.1 Prstencový vzorek

### Schéma zapojení

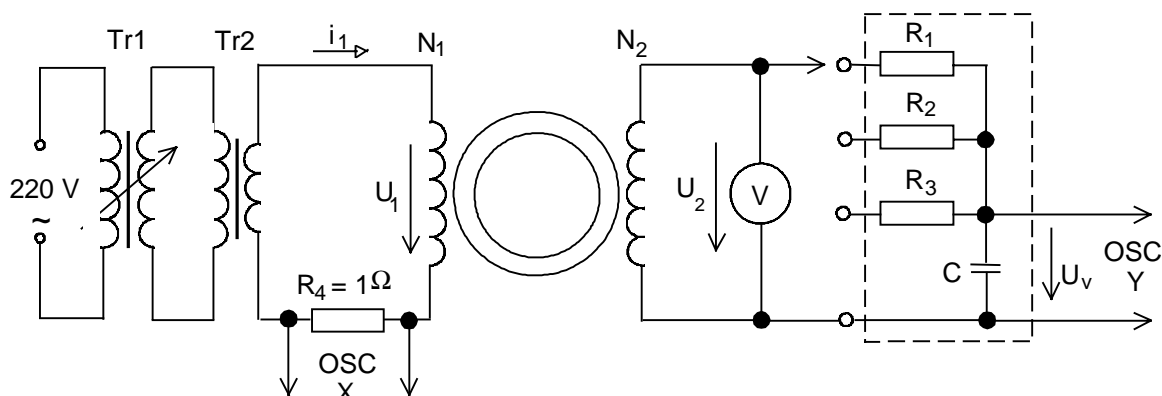


Schéma zapojení pro měření amplitudové permeability a zobrazení dynamické hysterezní smyčky na osciloskopu

### Teoretický rozbor úlohy

Pro intenzitu magnetického pole uvnitř prstencového vzorku platí vztah

$$H(t) = \frac{N_1}{l_s} i_1(t) \quad (1)$$

kde  $H(t)$  - okamžitá hodnota intenzity magnetického pole,  
 $N_1$  - počet závitů primárního (magnetovacího) vinutí,  
 $l_s$  - střední délka siločáry ve vzorku,

$$l_s = \pi \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{pro } \frac{D_1}{D_2} < 1,3$$

$i_1(t)$  - okamžitá hodnota magnetovacího proudu,  
 $D_1, D_2$  - vnější, vnitřní průměr vzorku.

Z Faradayova indukčního zákona odvodíme

$$u_i(t) = N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = N_2 S_{Fe} \frac{dB(t)}{dt} \quad (2)$$

kde  $u_i(t)$  - okamžitá hodnota indukovaného napětí,  
 $N_2$  - počet závitů sekundárního (měřicího) vinutí,  
 $S_{Fe}$  - průřez měřeného vzorku (viz obr. 1),  
 $\Phi(t)$  - okamžitá hodnota magnetického toku ve vzorku,

a pro okamžitou hodnotu magnetické indukce  $B(t)$  platí

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S_{Fe}} \int_0^t u_i(t) dt \quad (3)$$

Ze vztahů (1) a (3) vyplývá, že časový průběh intenzity magnetického pole má stejný tvar jako průběh magnetovacího proudu a časový průběh magnetické indukce má stejný tvar jako průběh integrálu indukovaného napětí. Průběhy intenzity magnetického pole a magnetické indukce se velmi liší díky nelinearitě magnetického materiálu.

Střídavá magnetická měření se standardně provádějí při sinusovém průběhu magnetické indukce, což odpovídá požadavku sinusového průběhu indukovaného napětí. Tuto podmínku je nutné dodržet, protože parametry magnetických materiálů, jako např. permeabilita, koercitivita nebo ztráty jsou závislé na průběhu indukce.

Požadovaného sinusového průběhu indukce  $B(t)$  se dosahuje tzv. napěťovým magnetováním, tj. buzením vzorku ze zdroje sinusového napětí. Celkový odpor magnetovacího obvodu musí být tedy malý. Jako snímací rezistor pro měření magnetovacího proudu je nutné použít rezistor malé hodnoty (pro měření magnetovacího proudu nelze použít miliampérmetr, protože má poměrně velký odpor a navíc průběh proudu je nesinusový). Při měření musíme dodržet také nízký výstupní odpor napájecího zdroje (což je obvykle odpor vinutí napájecího transformátoru) a nízký odpor primárního (magnetovacího) vinutí vzorku. Tento požadavek lze snadno dodržet při použití napájecího transformátoru dimenzovaného na velký proud (s velkým průřezem vinutí) a magnetovacího vinutí s velkým průřezem drátu.

Kvalitu sinusového průběhu  $B(t)$  lze posuzovat buď porovnáváním efektivní hodnoty a aritmetické střední hodnoty indukovaného (sekundárního) napětí  $u_i(t)$ , jejichž poměr by podle standardu IEC měl být  $1,11 \pm 1 \%$ , nebo pohodlněji sledováním průběhu na osciloskopu (norma předepisuje současné použití obou metod).

Amplitudová permeabilita je definována z poměru amplitud (tj. maximálních hodnot) veličin  $B$  a  $H$  podle vztahu

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (-; T, H.m^{-1}, A.m^{-1}) \quad (4)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

Jak ukážeme později, hodnotu  $B_m$  lze snadno stanovit z aritmetické střední hodnoty indukovaného napětí i pro obecný průběh  $B(t)$ .

Je-li průběh  $H(t)$  a  $I(t)$  deformovaný, nelze hodnotu  $H_m$  počítat ani z efektivní, ani z aritmetické střední hodnoty proudu  $I(t)$ . Možnosti měření  $I_m$  a následného výpočtu  $H_m$  jsou tyto:

1. Použití voltmetru pro měření špičkové hodnoty - některé multimetry vyšší kategorie toto měření umožňují.
2. Použití číslicového osciloskopu - některé typy měří špičkovou hodnotu s dostatečnou přesností; tento způsob měření využíváme v této úloze.
3. Použití měřicího systému pro magnetická měření řízeného počítačem - všechny parametry se vypočtou z ovzorkovaných hodnot magnetovacího proudu a indukovaného napětí, lze nakreslit i dynamickou hysterezní smyčku atd.
4. Použití analogový detektor špičkové hodnoty s operačním zesilovačem.
5. Použití vzájemné indukčnosti.

### Výpočet magnetické indukce

Hodnotu  $B_m$  lze stanovit z aritmetické střední hodnoty indukovaného napětí. Integrujeme-li rovnici (2), dostaneme pro kladnou půlperiodu napětí  $u_i(t)$  rovnici

$$\int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} u_i(t) dt = N_2 \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} d\Phi \quad (6)$$

a po vydělení rovnice hodnotou  $T/2$  bude

$$\frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} u_i(t) dt = \frac{4}{T} N_2 \Phi_m, \text{ kde } \frac{1}{T} = f \quad (7)$$

Levá strana rovnice (7) je aritmetická střední hodnota  $U_{\text{sar}}$  indukovaného napětí, kterou určíme např. z údaje voltmetru s usměrňovačem vydělením údaje činitelem 1,11. (V tomto případě nelze použít voltmetr, který měří RMS efektivní hodnotu.)

Dostaneme tedy

$$U_{\text{sar}} = 4 f N_2 \Phi_m \quad (8)$$

a konečně pro maximální hodnotu magnetické indukce vztah

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f N_2 S_{\text{Fe}}} \quad (9)$$

kde

$U_2$  - údaj voltmetru s usměrňovačem, který měří aritmetickou střední hodnotu, ale udává tuto hodnotu násobenou činitelem 1,11;

$f$  - frekvence magnetovacího proudu.

### Integrace

Přenos pasivního integračního RC článku je

$$\frac{U_v}{U_2} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (10)$$

Platí-li

$$\omega RC \gg 1 \quad (11)$$

můžeme psát

$$\frac{U_v}{U_2} \approx \frac{1}{j\omega RC} \quad (12)$$

což je přenos ideálního integrátoru.

Použití příliš malé časové konstanty  $RC$  integrátoru a tedy nesplnění podmínky (11) vede ke zkreslení tvaru hysterezní smyčky. Použijeme-li velkou hodnotu  $RC$ , bude sice podmínka (11) splněna, ale amplituda výstupního napětí integrátoru  $U_v$  může být příliš malá pro kvalitní zobrazení hysterezní smyčky na osciloskopu.

Rozhodněte, který z rezistorů  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  v integračním článku v našem případě použít.

*Poznámka:*

Pasivní integrační RC článek lze nahradit přesným elektronickým integrátorem. V měřicím systému řízeném počítačem se integrace provádí numericky.