

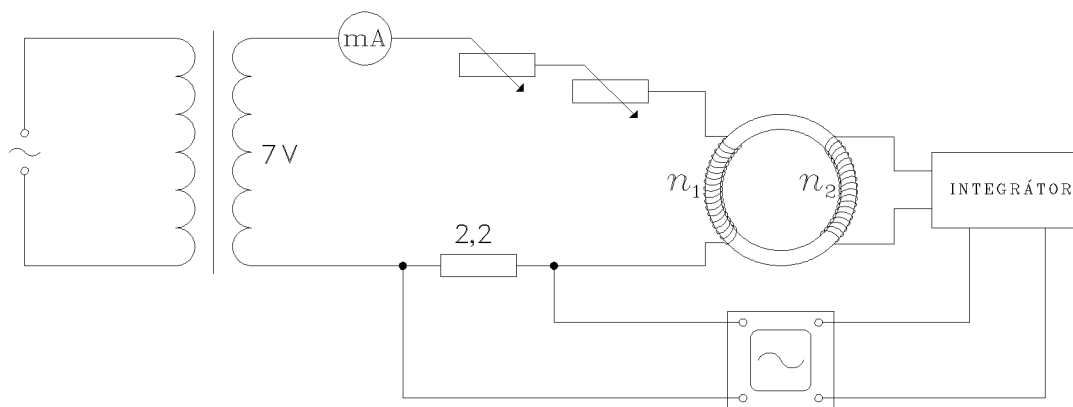
Úloha

- U feritových krúžkov I, II, III
 - odmerajte závislosť indukcie B_m a koercitívnej sily H_c na intenzite magnetického poľa H_m
 - sledujte základné typy hysteréznych slučiek v závislosti na intenzite poľa H_m a zistite približne, pri ktorej intenzite poľa H_m (alebo v akom intervale intenzít polí) jednotlivé typy hysteréznych kriviek prechádzajú jeden na druhý.
- Okalibrujte aparaturu pomocou striedavého napätia známej veľkosti.
- Výsledky podľa bodu 1a) spracujte tabelárne a graficky.

Teória

Ferity sú magnetické oxidy $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ s dvoma antiparalelne orientovanými magnetickými podmriežkami. Ich výhodou oproti kovovým feromagnetikám je vysoký odpor, ktorý pri použití vo vysokofrekvenčných obvodoch zabraňuje stratám vírivými prúdmi. Stále sú však prítomné straty spojené s nelineárnou závislosťou H a B , ktorú vyjadruje hysterézná slučka. Podľa veľkosti maximálnej použitej intenzity poľa H_m má hysterézná krivka nasledujúce tvary:

- úsečka - B je priamo úmerné H
- Rayleighov tvar - $\frac{dB}{dH}$ pri stúpajúcom H nadobúda maximum v H_m
- normálny tvar - stav nasýtenia, B_m už len málo závisí na H_m
- zúžený („zaškrtený“) tvar - vyskytuje sa u niektorých materiálov medzi tvarmi b) a c)



Obr. 1: Meranie hysteréznej slučky

Na meranie som použil obvod nakreslený na obrázku 1. Intenzita magnetického poľa vo feritovom krúžku s vonkajším priemerom d_1 , vnútorným priemerom d_2 (obdĺžnikový prierez) a výškou v je úmerná prúdu I pretekajúcim primárnym vinutím s počtom závitov n_1 . V tomto prípade bol použitý striedavý prúd so sínusovým priebehom, u ktorého som meral efektívnu hodnotu I_{ef} . Maximálna intenzita magnetického poľa je H_m .

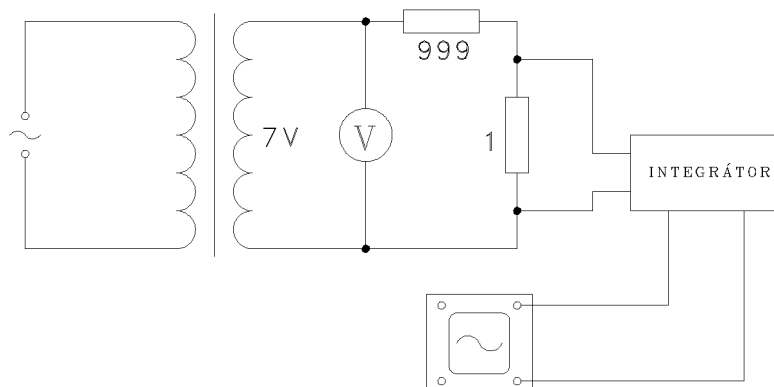
$$H = \frac{2n_1 I}{\pi(d_1 + d_2)} \quad H_m = \frac{2\sqrt{2}n_1 I_{ef}}{\pi(d_1 + d_2)} \quad (1)$$

Na osciloskope je výchylka na osi x (U_x vo voltoch) úmerná H .

$$I = a \cdot U_x \quad a = \frac{I_{ef} \cdot \sqrt{2}}{U_{xm}} \quad (2)$$

Napätie na sekundárnom vinutí je úmerné $\frac{dB}{dt}$, preto je potrebné použiť integrátor, ktorého výstupné napätie je potom úmerné B a to umožňuje priamo kresliť hysteréznú slučku na osciloskope.

Pri súčasnom meraní I_{ef} a U_{xm} (maximálna výchylka na osi x) môžeme s pomocou vzorca (2) určiť neznámu konštantu a (odpor $2,2\Omega$ nepoznáme s dostatočnou presnosťou) a následne vypočítať H_c (koercitívna sila) z odčítanej hodnoty napätia U_{xc} v mieste, kde hysterézná slučka pretína os x .



Obr. 2: Kalibrácia osi y

Os y musím kalibrovať (zapojením podľa obrázku 2), pretože nepoznáme konštantu úmernosti b medzi $\int U dt$ (U je napätie vstupujúce do integrátora) a U_y (odmerané na osciloskope). Podľa [1] pre striedavé kalibračné napätie frekvencie $\nu = 50$ Hz platí (U_{ym} je amplitúda na osciloskope):

$$U_{ym} = b \cdot \frac{U_{ef} \sqrt{2}}{2\pi\nu} \quad (3)$$

Napätie U_{ef} vo vzorci (3) je podľa hodnôt odporov v obrázku 2 tisícinou z napätia nameraného voltmetrom.

Získanú konštantu b potom použijem na výpočet B_m z U_{ym} v hysteréznych slučkách.

$$B_m = \frac{2U_{ym}}{b(d_1 - d_2)\nu n_2} \quad (4)$$

Meranie

Trieda presnosti ampérmetra bola 2.5, čo som zanedbal vzhľadom k malej presnosti osciloskopu: 1 mm na obrazovke. Použité rozsahy osciloskopu na osi x boli 0,01; 0,02; 0,05; 0,10; 0,2; 0,5; 1 V/cm a na osi y 2 V/cm (teda chyba 0,2 V, pri kalibrácii 0,1 V). Pri meraní H_c som na osciloskope väčšinou nastavil o jeden stupeň citlivejší rozsah. Pri kalibrácii bol použitý napäťový delič 1:1000. Namerané napätie pred deličom bolo $7,22 \pm 0,05$ V. Východzie hodnoty pre vzorec (3) (pre U_{ef} bol použitý digitálny voltmeter s presnosťou minimálne 0,5%):

$$U_{ym} = (6,4 \pm 0,1) \text{ V} \quad U_{ef} = (7,22 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ V} \quad \nu = 50 \text{ Hz}$$

$$b = \frac{(6,4 \pm 0,1) \cdot 2\pi \cdot 50}{(7,22 \pm 0,04) \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2}} = (1,97 \pm 0,03) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

V ďalších meraniach (tabuľky 1, 2, 3) som súčasne zaznamenával I_{ef} a U_{xm} , čo mi podľa vzorca (2) umožnilo zistiť kalibračnú konštantu a (pre každú tabuľku som vypočítal priemer vážený $\frac{\sigma U_{xm}}{U_{xm}}$ a z týchto priemerov výslednú hodnotu). Použil som ju na výpočet H_c z U_{xc} podľa (1) a $I_c = a \cdot U_{xc}$.

$$a = 0,445 \pm 0,006 \text{ A.V}^{-1}$$

Ferit I

$$n_1 = 50 \quad n_2 = 6 \quad d_1 = 29,9 \text{ mm} \quad d_2 = 20,75 \text{ mm} \quad v = 4,4 \text{ mm} \quad \bar{a} = 450,4 \text{ mA.V}^{-1}$$

I_{ef} [mA]	U_{xm} [V]	U_{xc} [V]	U_{ym} [V]	a [mA/V]	H_m [A/m]	H_c [A/m]	B_m [T]
10	0,033(2)	0,003(1)	0,6	429	9,0	0,9(3)	0,027(9)
15	0,048(2)	0,007(1)	1,0	442	13,5	2,0(3)	0,046(9)
20	0,063(2)	0,014(1)	1,5	449	18,0	4,0(3)	0,068(9)
30	0,092(5)	0,024(2)	2,4	461	27,0	6,8(6)	0,109(9)
40	0,125(5)	0,032(2)	3,1	453	36,0	9,1(6)	0,141(9)
50	0,155(5)	0,038(2)	3,6	456	45,1	10,8(6)	0,164(9)
60	0,185(5)	0,042(2)	4,0	459	54,1	11,9(6)	0,182(10)
70	0,220(5)	0,045(2)	4,3	450	63,1	12,8(6)	0,196(10)
90	0,285(10)	0,048(5)	4,7	447	81,1	13,6(14)	0,214(10)
110	0,350(10)	0,048(5)	4,9	444	99,1	13,6(14)	0,223(10)
130	0,41(2)	0,050(10)	5,1	448	117	14,2(28)	0,232(10)
150	0,46(2)	0,051(10)	5,2	461	135	14,5(28)	0,237(10)

Tabuľka 1: Ferit I

Krivka typu a) sa nevyskytovala, prechod medzi krivkami typu b) a c) nastal pri $H_m \approx 40 \text{ A/m}$.

Ferit II

$$n_1 = 50 \quad n_2 = 6 \quad d_1 = 30,65 \text{ mm} \quad d_2 = 21,8 \text{ mm} \quad v = 4,35 \text{ mm} \quad \bar{a} = 439,0 \text{ mA.V}^{-1}$$

I_{ef} [mA]	U_{xm} [V]	U_{xc} [V]	U_{ym} [V]	a [mA/V]	H_m [A/m]	H_c [A/m]	B_m [T]
30	0,094(10)	0,000(2)	0,5	451	25,7	0,0(5)	0,022(9)
40	0,125(10)	0,002(2)	0,6	453	34,3	0,5(5)	0,026(9)
50	0,155(10)	0,003(2)	0,8	456	42,9	0,8(5)	0,035(9)
70	0,278(10)	0,010(2)	1,2	356	60,1	2,7(5)	0,053(9)
90	0,29(2)	0,018(5)	1,6	439	77,2	4,9(14)	0,070(9)
110	0,34(2)	0,030(5)	2,1	458	94,4	8,1(14)	0,092(9)
130	0,41(2)	0,06(1)	2,6	448	112	16,2(27)	0,114(9)
150	0,47(2)	0,07(1)	3,1	451	129	18,9(27)	0,136(9)
170	0,54(2)	0,09(1)	3,5	445	146	24,3(27)	0,154(9)
190	0,60(2)	0,11(1)	3,9	448	163	29,7(27)	0,171(9)
220	0,69(2)	0,13(1)	4,6	451	189	35,1(27)	0,202(9)
250	0,72(2)	0,15(1)	5,0	491	215	40,5(27)	0,220(9)

Tabuľka 2: Ferit II

Prechod medzi krivkami typu a) a b) nastal pri $H_m \approx 40$ až 50 A/m , a medzi krivkami typu b) a c) pri $H_m \approx 160 \text{ A/m}$.

Ferit III

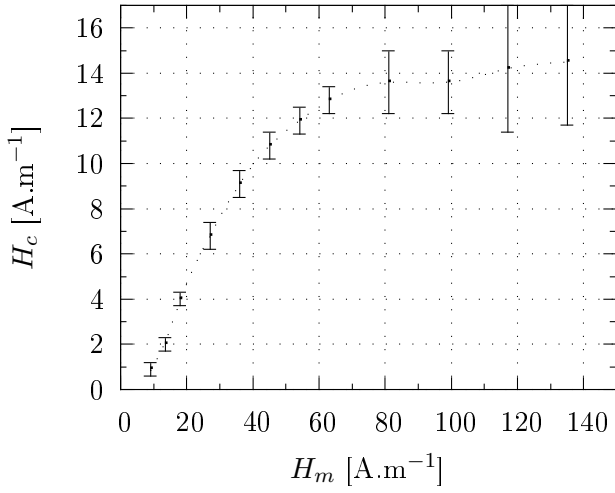
$$n_1 = 300 \quad n_2 = 6 \quad d_1 = 31,0 \text{ mm} \quad d_2 = 21,8 \text{ mm} \quad v = 4,15 \text{ mm} \quad \bar{a} = 441,1 \text{ mA.V}^{-1}$$

Prechod medzi krivkami typu a) a b) nastal pri $H_m \approx 1800$ až 2000 A/m , medzi krivkami typu b) a d) pri $H_m \approx 2400 \text{ A/m}$ a medzi krivkami typu d) a c) pri $H_m \approx 4000$ až 4500 A/m .

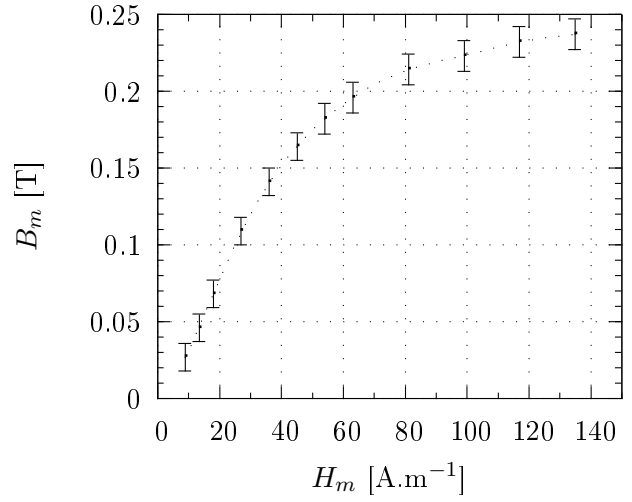
I_{ef} [mA]	U_{xm} [V]	U_{xc} [V]	U_{ym} [V]	a [mA/V]	H_m [A/m]	H_c [A/m]	B_m [T]
300	0,93(5)	0,015(10)	0,48	456	1535	24(16)	0,021(9)
350	1,1(1)	0,030(20)	0,60	450	1790	48(32)	0,027(9)
400	1,3(1)	0,07(5)	0,72	435	2046	110(80)	0,032(9)
450	1,4(1)	0,16(5)	0,9	455	2302	260(80)	0,040(9)
500	1,6(1)	0,35(5)	1,2	442	2558	560(80)	0,053(9)
600	1,9(1)	0,70(5)	2,3	447	3069	1180(80)	0,102(9)
700	2,2(2)	0,90(10)	3,6	450	3581	1450(160)	0,160(9)
800	2,5(2)	1,00(10)	4,1	453	4092	1610(160)	0,182(9)
900	2,9(2)	1,05(10)	4,5	439	4604	1690(160)	0,199(9)
1000	3,3(2)	1,10(10)	4,8	429	5115	1770(160)	0,213(9)
1100	3,6(2)	1,10(10)	4,9	432	5627	1770(160)	0,217(9)
1200	3,8(2)	1,15(10)	5,0	447	6139	1850(160)	0,222(9)

Tabuľka 3: Ferit III

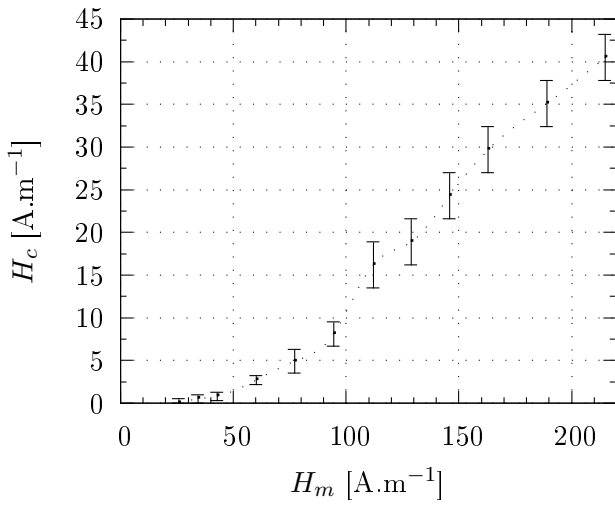
Graf 1: Závislosť H_c na H_m u feritu I



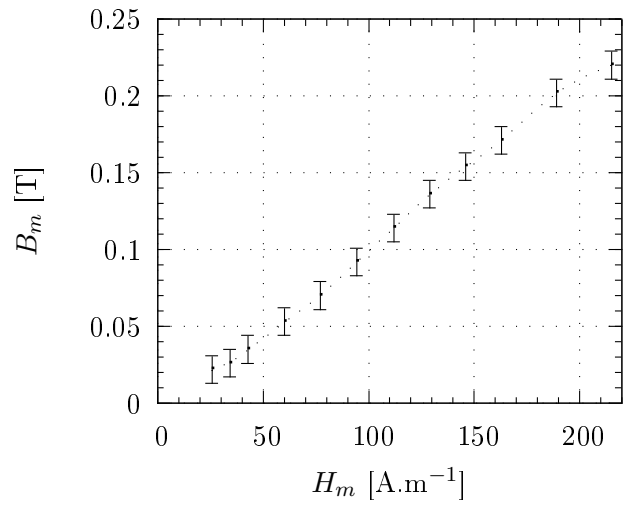
Graf 2: Závislosť B_m na H_m u feritu I



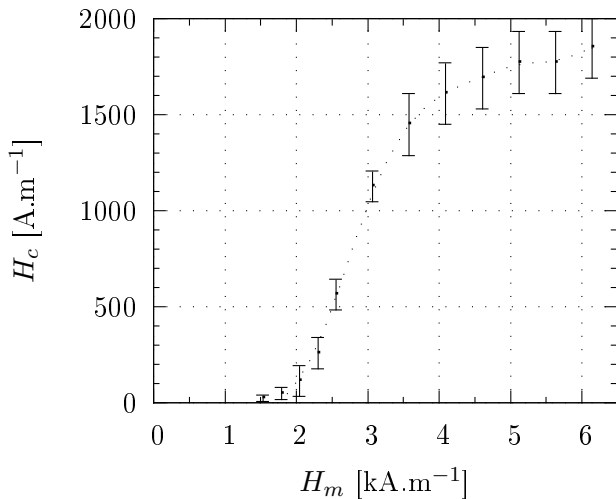
Graf 3: Závislosť H_c na H_m u feritu II



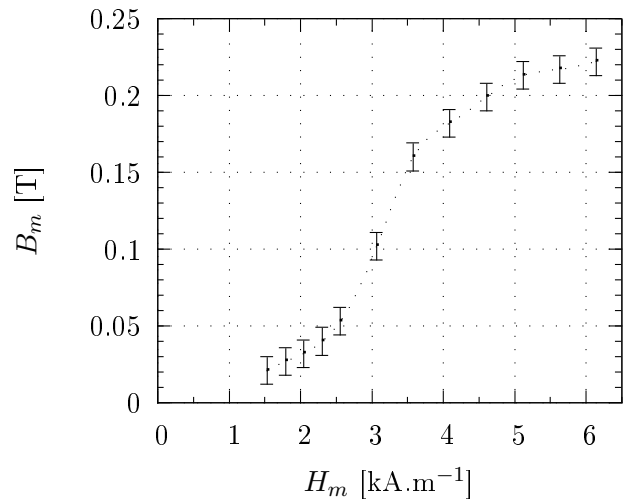
Graf 4: Závislosť B_m na H_m u feritu II



Graf 5: Závislosť H_c na H_m u feritu III



Graf 6: Závislosť B_m na H_m u feritu III



Diskusia

Chyba ampérmetra bola menšia oproti osciloskopu, preto som ju do grafov nevynášal. Pri ferite III a vyšších prúdoch sa obraz na osciloskope chvel, preto som zvýšil odhad chyby U_{cx} v týchto meraniach. Určité komplikácie spôsoboval aj integrátor, ktorého výstupné napätie nebolo vystredované na nulu, a bolo potrebné stále nastavovať os y na osciloskope.

Kalibračné konštanty boli určené relatívne presne - v osi x vďaka maximalizácii výchylky na osciloskope a použitiu presného voltmetra, v osi y veľkým počtom meraní, čo prakticky odstránilo náhodnú chybu. Prípadná odchýlka v týchto hodnotách by však mala za následok len zmenu škálovania osí v grafoch 1-6, tvar závislostí by zostal zachovaný.

Pri tomto type merania dosiahnutá presnosť postačuje, pretože odchýlky medzi jednotlivými kusmi spôsobené prípravou materiálu zrejme budú väčšie.

Záver

Ferit I mal najvyššiu relatívnu permitivitu pri malých hodnotách H_m (zhruba 3000). Ferit II ju mal nižšiu (okolo 800), zato však mal nižšie straty (užšia hysterézná slučka) a lepšiu linearitu. Ferit III bol pri vysokej intenzite poľa magneticky tvrdý so zaškrtenou hysteréznou krivkou, avšak pre intenzity do 1 kA/m bol lineárny s nízkou relatívnou permitivitou (asi 10).

Literatúra

[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989