Martin Beránek, 2.F, X–11

Úloha 21 – Studium hysterezních smyček feritů

PRACOVNÍ ÚKOL:

1. U feritových kroužků I, II a III
   a) změřte závislost indukce B_m a koercitivní síly H_c na intenzitě magnetického pole H_m.
   b) sledujte základní typy hysterezních smyček v závislosti na intenzitě pole H_m a zjistěte přibližně, při které intensitě pole H_m (nebo v kterém intervalu intenzit polí) jednotlivé typy hysterezních smyček přecházejí jeden v druhý.
2. Okalibrujte aparaturu pomocí střídavého napětí známé velikosti.
3. Výsledky dle bodu 1a) zpracujte tabelárně a graficky.

TEORIE: Magnetické pole v kroužku určím z proudu i procházejícího primárním vinutím podle vztahu (viz [1], str. 134)

$$H = \frac{2n_1 i}{\pi(d_1 + d_2)}\,, \tag{1}$$

kde n_1 je počet závitů, d_1 vnější a d_2 vnitřní průměr kroužku. Procházející proud zobrazuji na horizontální ose osciloskopu podle napětí měřeného na konstantním odporu. Toto napětí je úměrné proudu procházejícímu vinutím na kroužku. V obvodu primárního vinutí je zapojen také ampérmetr, takže mohu přímo odečítat efektivní hodnotu I_m procházejícího proudu.

Maximální hodnota magnetického pole v cívce je tedy

$$H_\mathrm{m} = \frac{2\sqrt{2}\, n_1 I_\mathrm{m}}{\pi(d_1 + d_2)}\,, \tag{2}$$

Velikost koercitivního pole určím ze stopy na osciloskopu. Podle známé efektivní hodnoty procházejícího proudu I a odpovídajícího rozměru stopy x mohu provést kalibraci a platí

$$H_\mathrm{c} = \frac{2n_1}{\pi(d_1 + d_2)} \cdot \frac{\sqrt{2}\, I}{x} \cdot x_\mathrm{c} = C_\mathrm{x} x_\mathrm{c}\,, \tag{3}$$

kde x_c je šířka smyčky na ose $B = 0$.

Na sekundárním vinutí se indukuje napětí rovné časové derivaci magnetického toku Φ smyčkou. Po zintegrování získám napětí úměrné magnetickému toku. Dále platí vztah mezi magnetickou indukcí a indukčním tokem

$$\Phi = S n_2 B = \frac{1}{2}\,(d_1 - d_2) v n_2 B\,. \tag{4}$$

S je průřez kroužku, v jeho výška a n_2 počet závitů sekundárního vinutí.

Pro kalibraci vertikální osy osciloskopu jsem použil zdroj střídavého napětí s úhlovou frekvencí ω a efektivní hodnotou napětím U_ef. Na vstup integrátoru bylo připojeno k-krát menší napětí z děliče. Na výstupu integrátoru je napětí

$$u \sim \frac{\sqrt{2}\, U_\mathrm{ef}}{k\omega}\,. \tag{5}$$

Konstanta úměrnosti je stejná jako při měření magnetické indukce. Pokud tedy pro známou hodnotu napětí U_ef změřím vertikální rozměr y, bude vertikálnímu rozměru y_m hysterezní smyčky odpovídat magnetická indukce B_m podle vztahu

$$B_\mathrm{m} = \frac{2\sqrt{2}\, U_\mathrm{ef}}{k\omega(d_1 - d_2) v n_2 y} \cdot y_\mathrm{m} = C_\mathrm{y}\, y_\mathrm{m}\,. \tag{6}$$

MĚŘENÍ: Pro vertikální osu osciloskopu jsem během celého měření používal stejné nastavení vstupů a všechny kroužky měly na sekundárním vinutí stejný počet závitů $n_2 = 6$. Při kalibraci jsem použil zdroj s napětím $U_\mathrm{ef} = (6{,}63 \pm 0{,}07)\,\mathrm{V}$ a síťovou frekvencí, kterou předpokládám $\omega = 2\pi \cdot 50\,\mathrm{Hz}$. Dělič

	n_1	n_2	d_1 [mm]	d_2 [mm]	v [mm]
I	50	6	29,2	20,75	4,4
II	50	6	30,65	21,8	4,35
III	300	6	31,0	21,8	4,15

Tabulka 1

napětí byl zapojen s odpory $1\,\Omega$ a $999\,\Omega$, takže $k = 1000$. Na osciloskopu jsem naměřil stopu o výšce $y = (13{,}1 \pm 0{,}5)\,\mathrm{cm}$.

Rozměry kroužků jsou uvedeny v tabulce 1. Uvažuji celkovou chybu 7% danou hlavně nepřesností odečtu rozměrů na obrazovce osciloskopu. Ve všech třech případech vychází pak stejná hodnota konstanty úměrnosti

$$C_\mathrm{y} = (2{,}0 \pm 0{,}1)\,\mathrm{Tm}^{-1}\,.$$

Konstantu úměrnosti ve vztahu (3) musím určit pro každý kroužek zvlášť. Potřebné rozměry a počty závitů jsou v tabulce 1. Celkovou chybu výsledku odhaduji na 6% (nejvíce se na ní opět podílí nepřesnost odečítání velikosti stopy). Hodnoty pro první kroužek jsme kalibroval pomocí proudu $I = 150\,\mathrm{mA}$ a tomu odpovídal horizontální rozměr stopy na osciloskopu $x = 10{,}5\,\mathrm{cm}$. Pak vychází

$$C_\mathrm{1x} = (1290 \pm 80)\,\mathrm{Am}^{-2}\,.$$

Obdobně pro druhý kroužek kalibrovaný proudem $I = 250\,\mathrm{mA}$ se stopou o šířce $x = 13{,}5\,\mathrm{cm}$ vyjde

$$C_\mathrm{2x} = (1600 \pm 100)\,\mathrm{Am}^{-2}\,.$$

Třetí kroužek byl kalibrován proudem $I = 1{,}13\,\mathrm{A}$ a šířka stopy byla $x = 15{,}3\,\mathrm{cm}$. Tomu odpovídá hodnota

$$C_\mathrm{3x} = (38 \pm 2)\,\mathrm{kAm}^{-2}\,.$$

Pro každý kroužek jsem měřil závislost maximální hodnoty magnetické indukce B_m na maximální hodnotě intenzity magnetického pole H_m a závislost koercitivního pole H_c na H_m. Hodnoty H_m jsem přepočítával z údajů ampérmetru podle vztahu (2). Chyba je v tomto případě relativně nízká – odhaduji 2% podle třídy přesnosti přístroje a nepřesnosti rozměrů kroužků. Chyba určení B_m je dána chybou C_y a chybou odečtu rozměru smyčky na obrazovce osciloskopu. Tu odhadnu na 8%. Pro velké hodnoty y_m je sice trochu nižší, ale další upřesňování je vzhledem k tomu, že jde jen odhad, zbytečné. Celková chyba B_m tedy vychází 15%.

Hodnotu H_c jsem opět počítal z rozměrů stopy na osciloskopu, v tomto případě podle vztahu (3). Odečítání x_c bylo zatíženo větší chybou než odečítání y_m – odhaduji ji na 20% a spolu s chybou C_x vychází výsledná hodnota 26%.

Naměřené a přepočítané hodnoty pro jednotlivé kroužky jsou v tabulkách 2a až 2c.

Grafické znázornění závislosti magnetické indukce na intenzitě pro první kroužek je v grafu 1a, pro druhý, resp. třetí kroužek v grafu 1b, resp 1c. Závislost intenzity koercitivního a maximálního magnetického pole pro jednotlivé kroužky je v grafech 2a až 2c.

Zjišťoval jsem také hodnoty H_m při kterých se mění typ hysterezní smyčky. Lineární závislost mezi H a B reprezentovaná úsečkou na obrazovce osciloskopu zůstala u prvního kroužku až do hodnoty $H_\mathrm{m} = (7{,}2 \pm 0{,}9)\,\mathrm{Am}^{-1}$. U druhého kroužku to bylo až do $H_\mathrm{m} = (51 \pm 4)\,\mathrm{Am}^{-1}$ a u třetího vyrobeného z permivarového feritu zůstala závislost lineární až do intenzity $H_\mathrm{m} = (1{,}9 \pm 0{,}1) \cdot 10^3\,\mathrm{Am}^{-1}$. Při zvyšování intenzity pole přešla u prvních dvou kroužků smyčka do Rayleighova tvaru. Při hodnotách $H_\mathrm{m} = (14 \pm 2)\,\mathrm{Am}^{-1}$ u kroužku I, resp. $H_\mathrm{m} = (90 \pm 10)\,\mathrm{Am}^{-1}$ u kroužku II se tvar smyčky změnil v normální, kdy se projevuje magnetické nasycení. V případě třetího kroužku přechází lineární závislost ve zúžený tvar smyčky a při intenzitě $H_\mathrm{m} = (5{,}6 \pm 0{,}3) \cdot 10^3\,\mathrm{Am}^{-1}$ se smyčka změní v normální tvar.

y_m [cm]	I_m [mA]	x_c [cm]	H_m [Am^{-1}]	B_m [T]	H_c [Am^{-1}]
1,0	25	0	$21{,}5 \pm 0{,}4$	$0{,}020 \pm 0{,}003$	0
2,3	50	0	$42{,}9 \pm 0{,}9$	$0{,}046 \pm 0{,}007$	0
3,8	75	0,2	64 ± 1	$0{,}08 \pm 0{,}01$	$3{,}2 \pm 0{,}8$
5,3	100	0,5	86 ± 2	$0{,}11 \pm 0{,}02$	8 ± 2
6,3	125	0,8	107 ± 2	$0{,}13 \pm 0{,}02$	13 ± 3
8,1	150	1,3	129 ± 3	$0{,}16 \pm 0{,}02$	21 ± 5
9,5	175	1,5	150 ± 3	$0{,}19 \pm 0{,}03$	24 ± 6
10,8	200	2,0	172 ± 3	$0{,}22 \pm 0{,}03$	32 ± 8
12,7	250	2,6	215 ± 4	$0{,}25 \pm 0{,}04$	42 ± 11

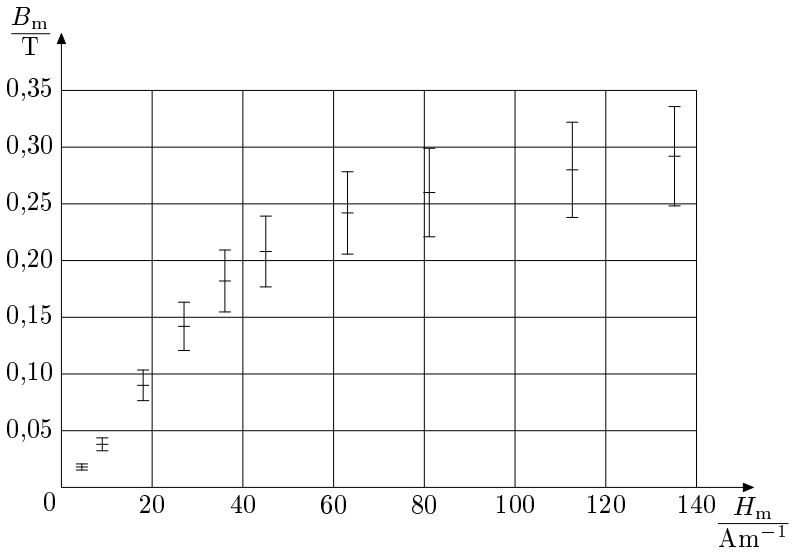
Tabulka 2b – hodnoty pro kroužek II

y_m [cm]	I_m [mA]	x_c [cm]	H_m [Am^{-1}]	B_m [T]	H_c [Am^{-1}]
0,9	5	0	$4{,}5 \pm 0{,}1$	$0{,}018 \pm 0{,}003$	0
1,9	10	0	$9{,}0 \pm 0{,}2$	$0{,}038 \pm 0{,}006$	0
4,5	20	0,3	$18{,}0 \pm 0{,}4$	$0{,}09 \pm 0{,}01$	4 ± 1
7,1	30	0,5	$27{,}0 \pm 0{,}5$	$0{,}14 \pm 0{,}02$	6 ± 2
9,1	40	0,6	$36{,}0 \pm 0{,}7$	$0{,}18 \pm 0{,}03$	8 ± 2
10,4	50	0,7	$45{,}1 \pm 0{,}9$	$0{,}21 \pm 0{,}03$	9 ± 2
12,1	70	0,8	63 ± 1	$0{,}24 \pm 0{,}04$	10 ± 3
13,0	90	0,85	81 ± 2	$0{,}26 \pm 0{,}04$	11 ± 3
14,0	125	0,9	113 ± 2	$0{,}28 \pm 0{,}04$	12 ± 3
14,6	150	0,95	135 ± 3	$0{,}29 \pm 0{,}04$	12 ± 3

Tabulka 2a – hodnoty pro kroužek I

y_m [cm]	I_m [mA]	x_c [cm]	H_m [Am^{-1}]	B_m [T]	H_c [Am^{-1}]
0,7	200	0	1020 ± 20	$0{,}014 \pm 0{,}002$	0
1,0	270	0	1380 ± 30	$0{,}020 \pm 0{,}003$	0
1,2	340	0	1740 ± 30	$0{,}024 \pm 0{,}004$	0
1,5	400	0,3	2050 ± 40	$0{,}030 \pm 0{,}005$	110 ± 30
2,4	500	1,1	2560 ± 50	$0{,}048 \pm 0{,}007$	400 ± 100
4,4	580	2,4	2970 ± 60	$0{,}09 \pm 0{,}01$	900 ± 200
7,2	660	3,2	3380 ± 70	$0{,}14 \pm 0{,}02$	1200 ± 300
8,9	740	3,8	3790 ± 80	$0{,}18 \pm 0{,}03$	1400 ± 400
10,6	960	4,3	4900 ± 100	$0{,}21 \pm 0{,}03$	1600 ± 400
11,3	1130	4,5	5800 ± 100	$0{,}23 \pm 0{,}03$	1700 ± 400

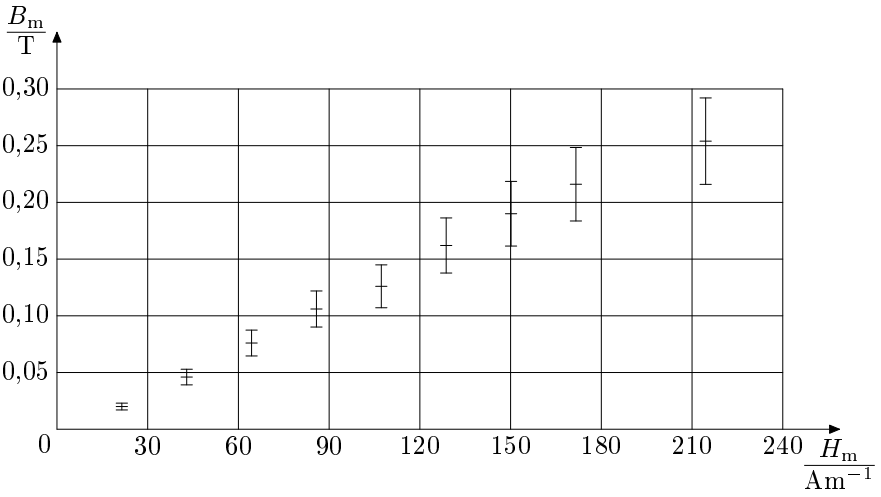
Tabulka 2c – hodnoty pro kroužek III



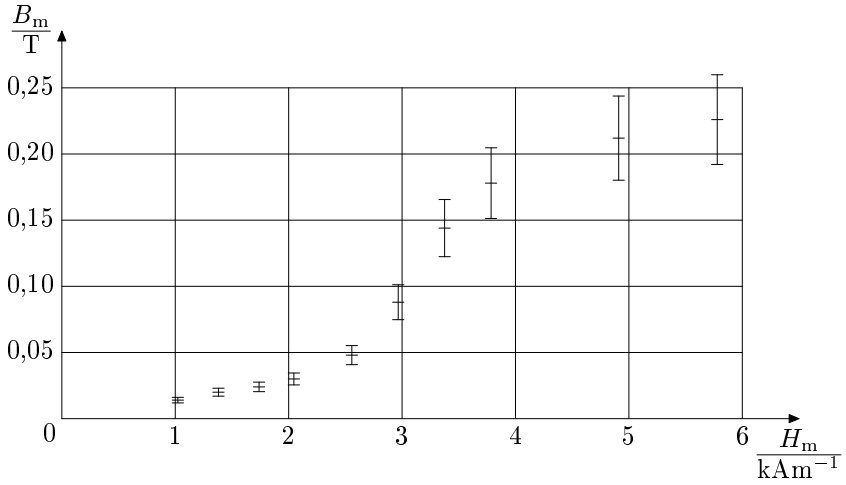
Graf 1a

Diskuze: Velká nepřesnost měření je způsobena hlavně chybami při odečítání hodnot z obrazovky osciloskopu. Mnohem lepších výsledků by bylo možné dosáhnout s digitálním osciloskopem, kde by chyba byla dána pouze chybou přístroje a ne přesností přiložení pravítka na obrazovku apod. Při určování hodnoty pole, kdy smyčka přechází mezi jednotlivými typy je možné získat pouze orientační hodnoty, protože tvar smyčky se mění spojitě a nelze určit přesnou hodnotu pole odpovídající změně typu. Další systematické chyby jsou způsobeny nenulovou indukčností odporu, na kterém se měřilo napětí pro horizontální osu osciloskopu a asi i nepřesností integrátoru, kterou ale neznám a ani nedokážu odhadnout.

Závěr: V rámci přesnosti použité metody a přístrojů jsem získal závislosti maximální magnetické indukce na intenzitě magnetického pole a závislost intenzity koercitivního a maximálního magnetického



Graf 1b

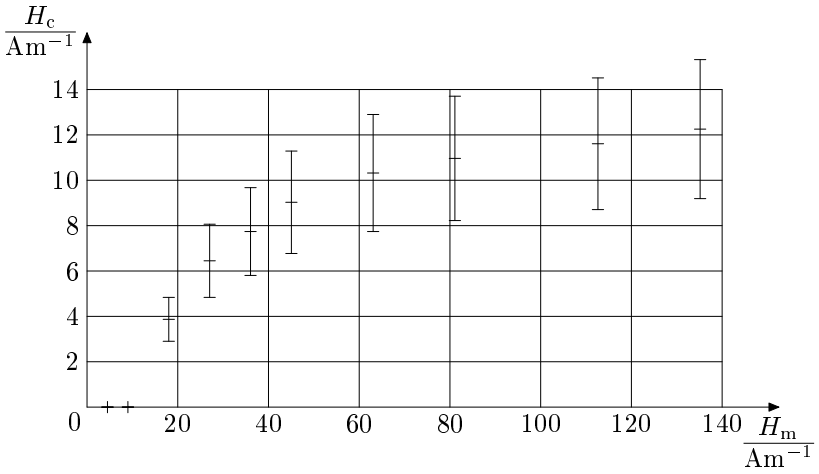


Graf 1c

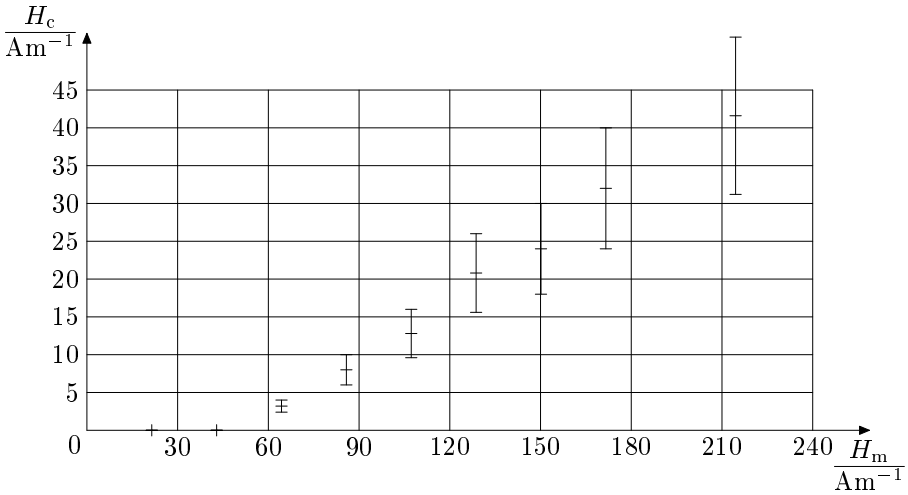
pole pro tři různé ferity. Pozorované změny tvaru smyček odpovídají tomu, jak by se dané materiály měly chovat.

Literatura:

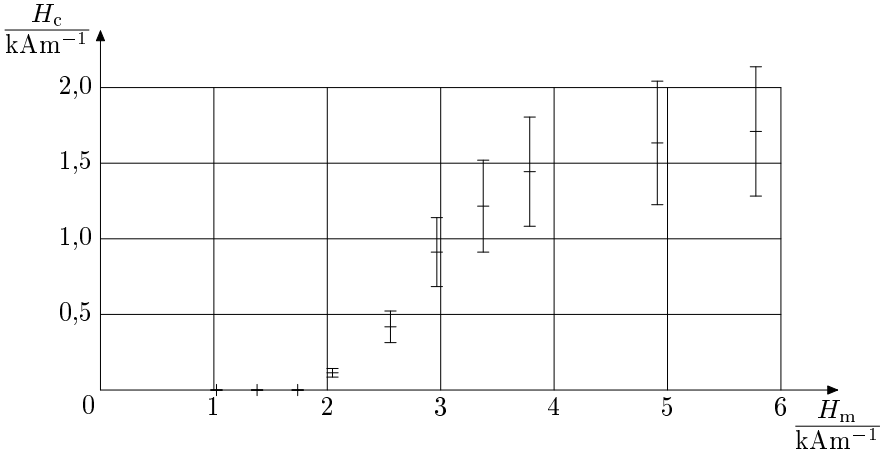
[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989



Graf 2a



Graf 2b



Graf 2c