Úloha 21 Štěpán Roučka

Studium hysterezních smyček feritů

Pracovní úkol

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

Teorie

Hysterezní smyčka je závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H, které se cyklicky mění mezi hodnotami H_m a $-H_m$. Rozeznáváme 3 základní typy hysterezních smyček. Uvádím je seřazeny podle velikosti polí při kterých vznikají:
a) Smyčka má tvar úsečky, to znamená, že permeabilita materiálu je konstantní
b) Smyčku lze aproximovat dvěma parabolickými větvemi, tzv. Rayleighův tvar. Začínají se uplatňovat nevratné magnetizační děje.
c) Hysterezní smyčka normálního tvaru. Dochází k magnetickému nasycení vzorku a při velké intenzitě pole již indukce téměř nestoupá.

Dále se ještě vyskytuje zúžený tvar smyčky při přechodu z Rayleighova tvaru k normální tvaru. Koercitivní silou nazýváme velikost indukce při nulové intenzitě magnetického pole.

Intenzitu magnetického pole uvnitř kroužku spočteme ze vztahu

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

kde d_1 je vnější a d_2 vnitřní průměr kroužku, n_1 je počet závitů primárního vinutí a i je magnetizační proud Na horizontální destičky osciloskopu přivádím signál úměrný magnetizačnímu proudu. Na sekundárním vinutí se indukuje napětí úměrné časové derivaci indukce $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$. To napětí je připojeno na integrátor a jeho výstup je připojen na vertikální destičky osciloskopu. Na vertikální ose osciloskopu tedy vynášíme signál úměrný magnetické indukci. Dohromady tak získáváme obraz hysterezní smyčky. Abych zjistil, jaké pole H odpovídá výchylce x na osciloskopu. Vezmu nějaký referenční proud I_0 a jemu odpovídající výchylku x_0. Úměrnost je potom následovná:

$$H = x\frac{2n_1\sqrt{2}\, I_0}{x_0\, \pi(d_1 + d_2)} = C_x\, x \tag{2}$$

Výsledek je násoben $\sqrt{2}$, protože počítám s tím, že budu měřit efektivní hodnotu proudu na ampérmetru a srovnávat ji s maximální výchylkou na osciloskopu. Takto získaná konstanta úměrnosti je pro každý kroužek jiná, neboť pro různé kroužky měním rozsah osciloskopu.

Při kalibraci y-ové osy jsem na vertikální destičky osciloskopu připojil střídavé napětí známé velikosti. Ze znalosti efektivního napětí U_{ef}, průřezu kroužku S a počtu závitů na sekundárním vinutí n_2 lze vypočítat magnetickou indukci, při které by vznikla stejná výchylka na ose y osciloskopu.

$$B_m = \frac{\sqrt{2}\, U_{ef}}{\omega S n_2} \tag{3}$$

Za předpokladu, že při kalibraci naměřím výchylku y_0 lze libovolné hodnotě y přiřadit hodnotu B.

$$B = \frac{y}{y_0}\, \frac{2\sqrt{2}\, U_{ef}}{\omega\, (d_1 - d_2)\, v\, n_2} = C_y\, y \tag{4}$$

Měření

Zadané parametry použitých vzorků a příslušných cívek jsou uvedeny tabulce 1.

vzorek	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	21.8	4.15

Tabulka 1.: Zadané parametry vzorků

Obvod pro kalibraci y-ové osy jsem sestavil dle [1] str. 136. Na zdroji bylo napětí $U_{ef} = (6.6 \pm 0.2)$V Na odporové dekádě jsem nastavil odpor $R_d = (1220 \pm 1)\Omega$ Délka úsečky zobrazené na osciloskopu byla $y_0 = (134 \pm 5)$mm. Měřil jsem délku celé úsečky, ačkoliv hodnotě B odpovídá teoreticky pouze polovina úsečky. Protože i při všech ostatních měřeních používám délku celé úsečky, nemusím dělat žádný přepočet a přesto se nedopustím chyby. Chybu napětí a odporu jsem určil z přesnosti použitých přístrojů, chybu určení délky jsem odhadl na 5 mm jelikož se délka jevila různá v závislosti na pozorovacím úhlu. Konstantu C_y pro výpočet indukce jsem vypočetl pro jednotlivé cívky ze vztahu (4), ve kterém je také definovaná.

$$C_y^{\mathrm{I}} = (1.64 \pm 0.08)\, \mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

$$C_y^{\mathrm{II}} = (1.58 \pm 0.08)\, \mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

$$C_y^{\mathrm{III}} = (1.59 \pm 0.08)\, \mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

Konstanty úměrnosti se v rámci chyb shodují, cívky jsou tedy zřejmě vyrobeny tak, aby jejich konstanty úměrnosti byly stejné. Přesto používám pro každý vzorek vlastní přepočetní konstantu. Výše uvedené konstanty užívám pro určování koercitivní síly, intenzitu maximálního pole počítám ze znalosti proudu procházejícího primárním vinutím. Dále jsem určil přepočetní vztahy pro intenzitu magnetického pole užitím vztahu (2). První vzorek jsem kalibroval proudem $I_0 = (40 \pm 2)$mA a šířka stopy byla $x_0 = (36 \pm 2)$mm. Konstanta úměrnosti magnetického pole a šířky stopy pro vzorek I je:

$$C_x^{\mathrm{I}} = (1.00 \pm 0.07) \cdot 10^3\, \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

Druhý vzorek jsem kalibroval při hodnotách $I_0 = (250 \pm 8)$mA a $x_0 = (143 \pm 5)$mm.

$$C_x^{\mathrm{II}} = (1.50 \pm 0.02) \cdot 10^3\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

Třetí vzorek jsem kalibroval při hodnotách $I_0 = (1200 \pm 38)$mA a $x_0 = (108 \pm 5)$mm.

$$C_x^{\mathrm{II}} = (56.84 \pm 0.13) \cdot 10^3\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

U prvního vzorku jsem vůbec nepozoroval tvar redukovaný na úsečku. Rayleighův tvar byl patrný od nejmenší intenzity pole. Někde v intervalu $H_m = (22 \pm 4)\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ přechází tvar křivky do normálního tvaru, který setrvává až do nejvyšších intenzit.

Hysterezní křivka vzorku II byla lineární pro intenzity pole do $H_m = (50 \pm 5)\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$. Poté přešla do Rayleighova tvaru a při intenzitě $H_m = (80 \pm 5)\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ se změnila ve smyčku normálního tvaru.

Vzorek III z perminvarového materiálu vykazoval lineární tvar křivky při intenzitách menších než $H_m = (2.3 \pm 0.2)\,10^3 \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$. Rayleighův tvar byl pozorovatelný v úzkém intervalu okolo hodnoty $H_m = (2.6 \pm 0.2)\,10^3 \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$. Při vyšších intenzitách velmi rychle přešla do zúženého tvaru. Po překonání intenzity $H_m = (3.8 \pm 0.2)\,10^3 \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ se objevil normální tvar křivky.

Do tabulek 1 až 3 jsem zapsal naměřené hodnoty závislostí pro vzorky I až III a odpovídající hodnoty polí. Chyby odečítání délek z osciloskopu odhaduji na 5%, nejméně však 2 mm. Třída přesnosti použitého ampérmetru byla 2.5.

$\frac{I}{\mathrm{mA}}$	$\frac{x_c}{\mathrm{mm}}$	$\frac{y_m}{\mathrm{mm}}$	$\frac{H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\mathrm{T}}$
5.5	1	9	5.0	0.3	1	1	0.015	0.001
10	2	16	9.0	0.3	2	1	0.026	0.002
15	4	26	13.5	0.3	4	1	0.043	0.003
20	5	37	18	1	5	1	0.061	0.004
30	8	60	27	1	8	2	0.098	0.007
40	10	80	36	1	10	2	0.131	0.009
50	12	91	45	1	12	2	0.149	0.010
60	13	102	54	1	13	2	0.167	0.012
80	16	115	72	3	16	3	0.188	0.013
100	15	125	90	3	15	3	0.205	0.014
120	16	129	108	3	16	3	0.211	0.015
140	16	133	126	3	16	3	0.218	0.015
150	16	134	135	3	16	3	0.219	0.015

Tabulka 2.: vzorek I

Do grafů 1 až 3 jsem vykreslil závislosti indukce B_m na intenzitě pole H_m vzorků I až III.

Do grafů 4 až 6 jsem vykreslil závislosti koercitivní síly H_c na intenzitě pole H_m vzorků I až III.

$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{x_c}{\text{mm}}$	$\frac{y_m}{\text{mm}}$	$\frac{H_m}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta H_m}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta H_c}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{B_m}{\text{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\text{T}}$
30		14	26	1			0.022	0.002
50		22	43	1			0.036	0.002
70	2	36	60	3	3	2	0.059	0.004
90	4	48	77	3	6	2	0.079	0.005
110	6	60	94	3	9	3	0.098	0.007
130	9	75	112	3	14	3	0.123	0.009
150	12	86	129	3	18	3	0.141	0.010
180	18	107	154	6	27	5	0.175	0.012
210	22	123	180	6	33	5	0.201	0.014
230	25	133	197	6	38	6	0.218	0.015
250	26	140	215	6	39	6	0.229	0.016

Tabulka 3.: vzorek II

$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{x_c}{\text{mm}}$	$\frac{y_m}{\text{mm}}$	$\frac{H_m\cdot 10^{-3}}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta H_m\cdot 10^{-3}}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{H_c\cdot 10^{-3}}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta H_c\cdot 10^{-3}}{\text{A}\cdot\text{m}^{-1}}$	$\frac{B_m}{\text{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\text{T}}$
300	0	13	1.53	0.08			0.021	0.001
400	0	20	2.05	0.08			0.032	0.002
500	8	30	2.56	0.08	0.45	0.11	0.048	0.003
600	20	73	3.07	0.08	1.14	0.17	0.116	0.008
650	24	90	3.3	0.2	1.4	0.2	0.144	0.010
700	25	103	3.6	0.2	1.4	0.3	0.164	0.011
800	26	122	4.1	0.2	1.5	0.3	0.195	0.013
900	28	130	4.6	0.2	1.6	0.3	0.207	0.014
1000	30	139	5.1	0.2	1.7	0.3	0.222	0.015
1100	30	140	5.6	0.2	1.7	0.3	0.223	0.015
1200	31	143	6.1	0.2	1.8	0.3	0.228	0.016

Tabulka 4.: vzorek III

Diskuze

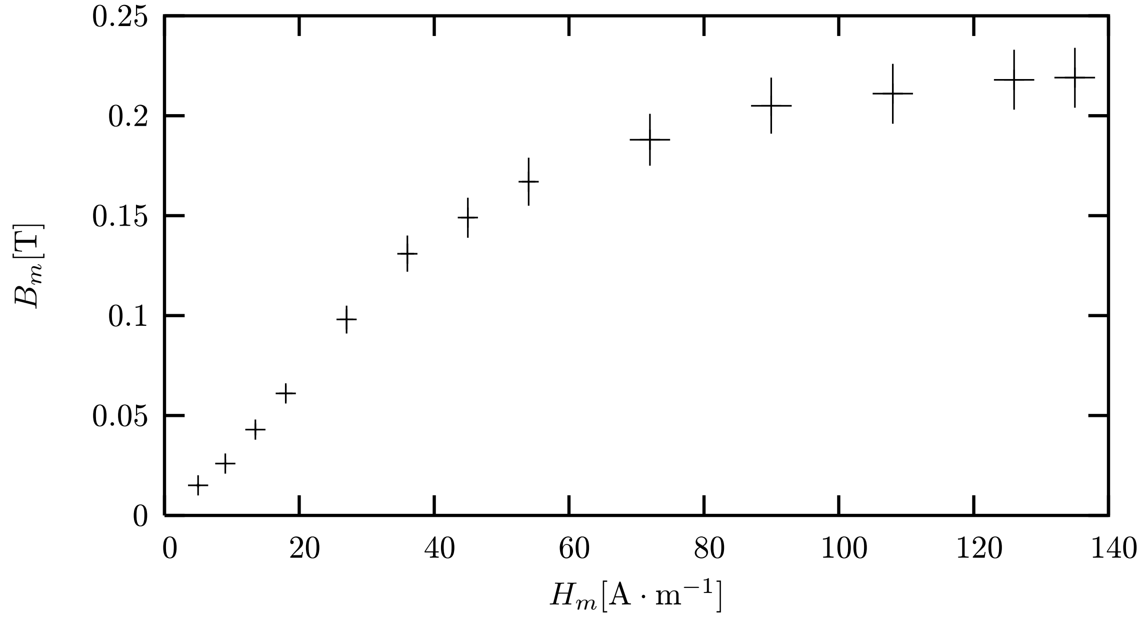
Naměřené závislosti dobře odpovídají předpokladům. U vzorků I a III je pozorovatelný stav nasycení. Největší nepřesnosti byly způsobeny problematickým odečítáním délek z obrazovky osciloskopu. Myslím, že ostatní nepřesnosti jako například indukčnost potenciometrů nebo nepřesnost integrátoru jsou ve srovnání s chybami měření délky zanedbatelné.

Nejproblematičtější bylo, určit, při kterých intenzitách se mění tvary hysterzních křivek. Toto určení bylo značně subjektivní, neboť křivky plynule měnily tvar. Proto jsem odhadl chyby v této části úlohy tak velké.

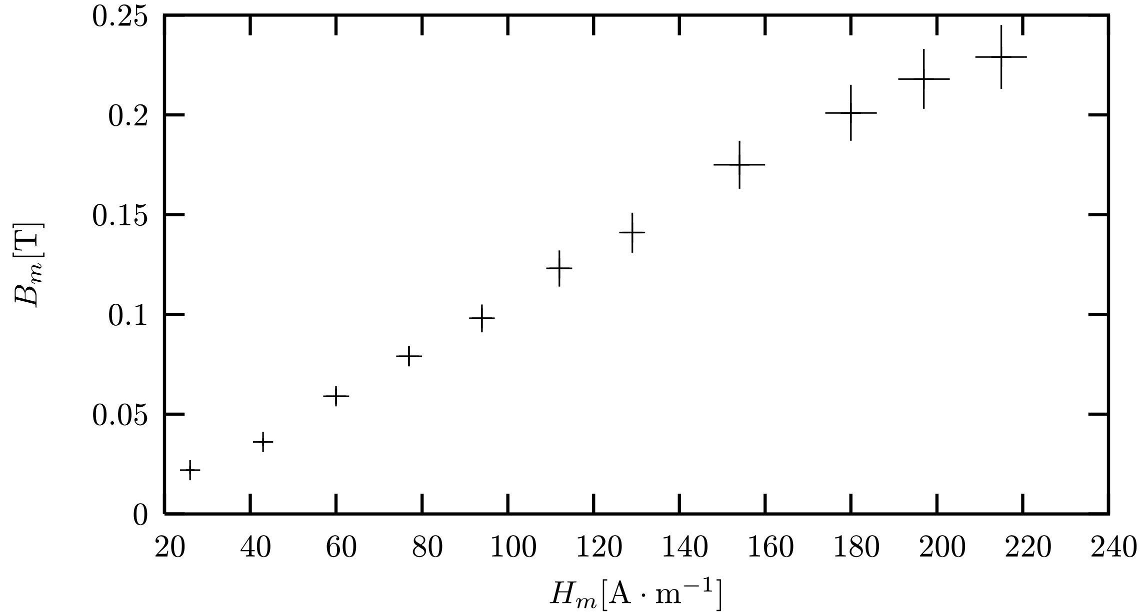
Závěr

Úspěšně jsem pozoroval čtyři základní typy hysterezních smyček. U zkoumaných vzorků jsem naměřil závislosti koercitivní síly a magnetické indukce na intenzitě magnetického pole.

Graf 1.: závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro vzorek I



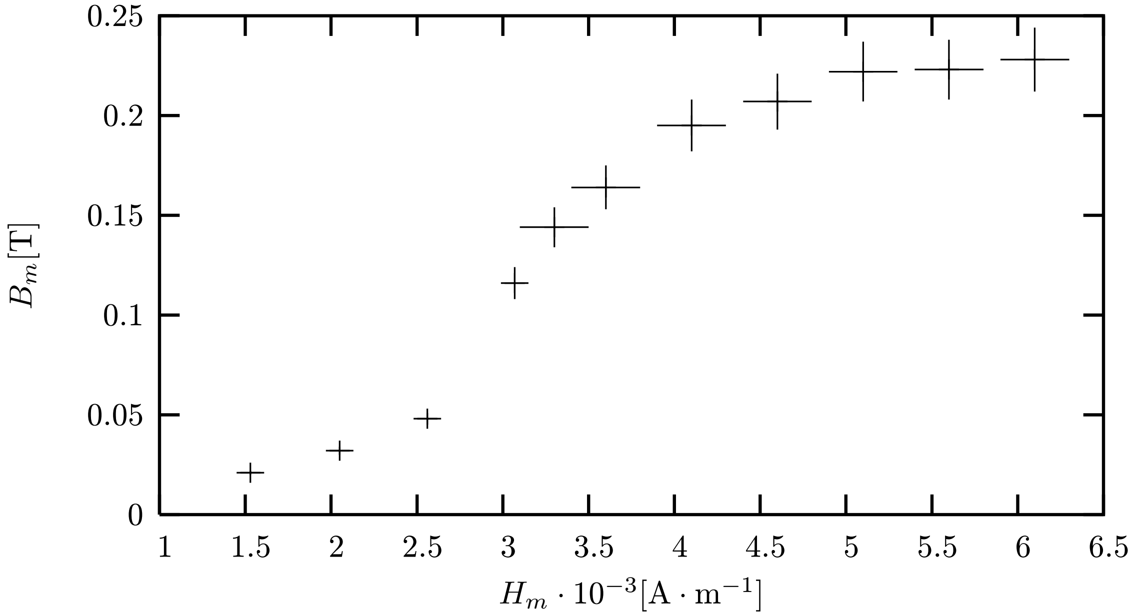
Graf 2.: závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro vzorek II



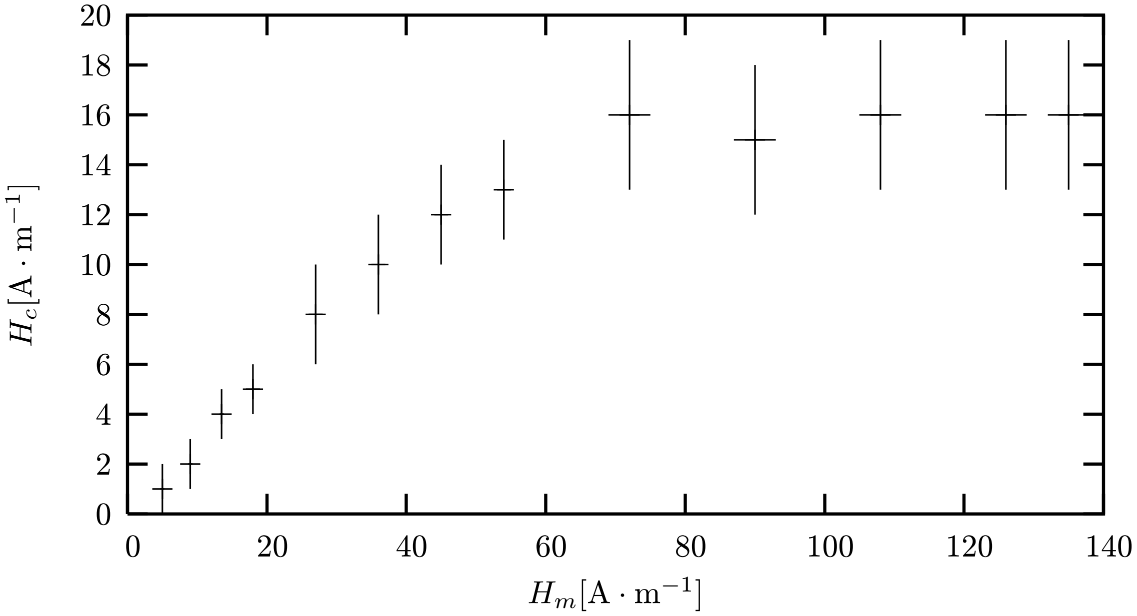
Literatura

[1] Studijní texty, úloha XXI. `http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/`

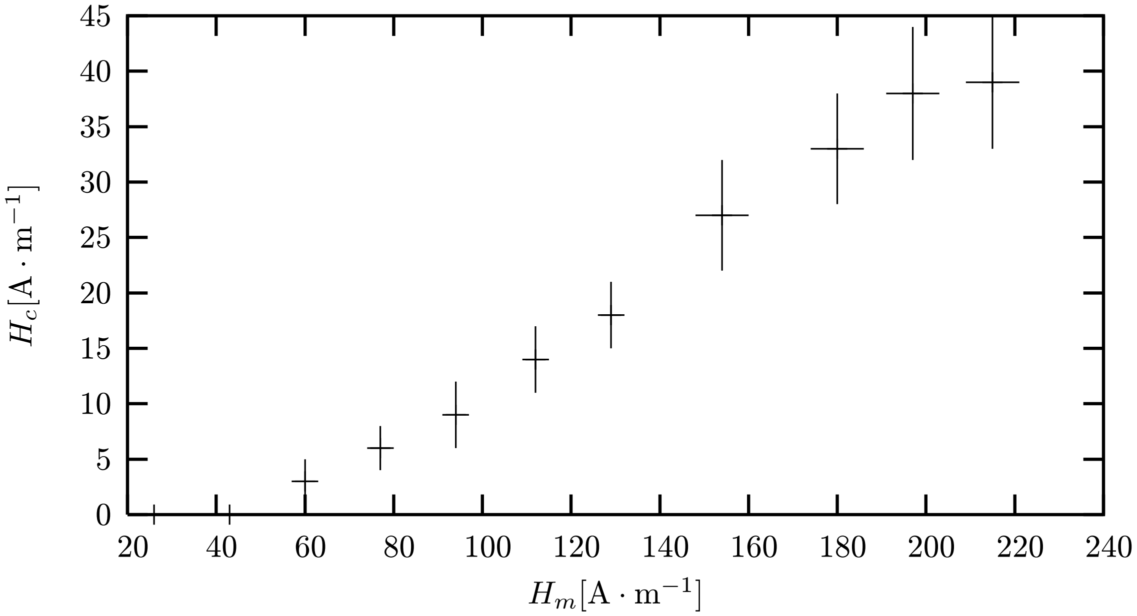
Graf 3.: závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro vzorek III



Graf 4.: závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro vzorek I



Graf 5.: závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro vzorek II



Graf 6.: závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro vzorek III