

## 1 Pracovní úkol

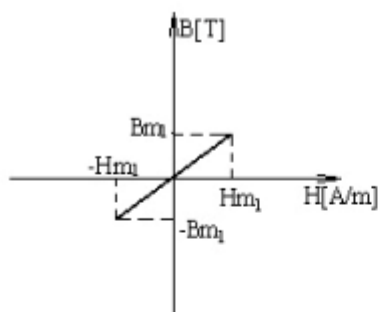
- U feritových kroužků I, II a III
  - Změřte závislost indukce  $B_m$  a koercitivní síly  $H_C$  na intenzitě magnetického pole  $H_m$ .
  - Sledujte základní typy hysterezních smyček v závislosti na intenzitě pole  $H_m$  a zjistěte přibližně, při které intenzitě pole  $H_m$  (nebo v kterém intervalu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

## 2 Teoretický úvod

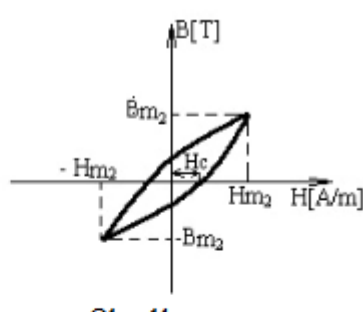
V této úloze budeme zkoumat závislost magnetické indukce a koercitivní síly na intenzitě magnetického pole aplikovaného na ferity.

*Ferity* jsou magnetické oxidy (se vzorem  $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ , kde  $M$  je kov s oxidačním číslem 2 [1]). Oproti klasickým feromagnetickým látkám mají však mnohem větší měrný odpor a ztráty vířivými proudy jsou proto nepatrné.

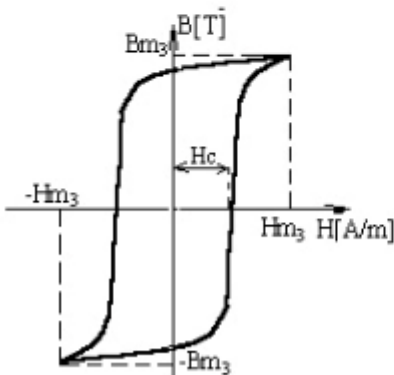
*Hysterezní smyčka* je závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$ . Není to funkce (kromě případu 1a), protože magnetická indukce závisí také na způsobu, jak jsme se na danou hodnotu intenzity  $H$  dostali. Plocha ohraničená touto křivkou udává práci potřebnou k přemagnetování látky [1]. Rozeznáváme čtyři typy hysterezních smyček [1]



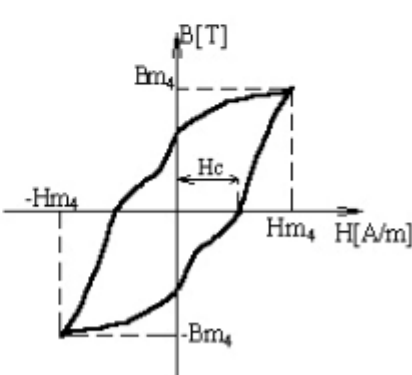
Obr. 1a



Obr. 1b



Obr. 1c



Obr. 1d

- a) lineární
- b) Rayleigho
- c) normální
- d) zaškrčená

Jejich tvary jsou na obrázcích 1a) až 1d).

## 2.1 Princip měření

Používáme vzorky feritů ve tvaru kroužků, protože se v nich magnetický tok zcela uzavírá. Primární vinutí o  $n_1$  závitů je rozloženo rovnoměrně po obvodu kroužku a sekundární vinutí o  $n_2$  závitů (pro měření indukčního toku) je realizováno málo (většinou šesti) závitů navinutými na jednom místě. Na primární vinutí kroužku přivedeme střídavý proud  $I$ , magnetické pole v kroužku pak spočítáme jako [1]

$$H = \frac{n_1 I}{\pi d}, \quad (1)$$

kde

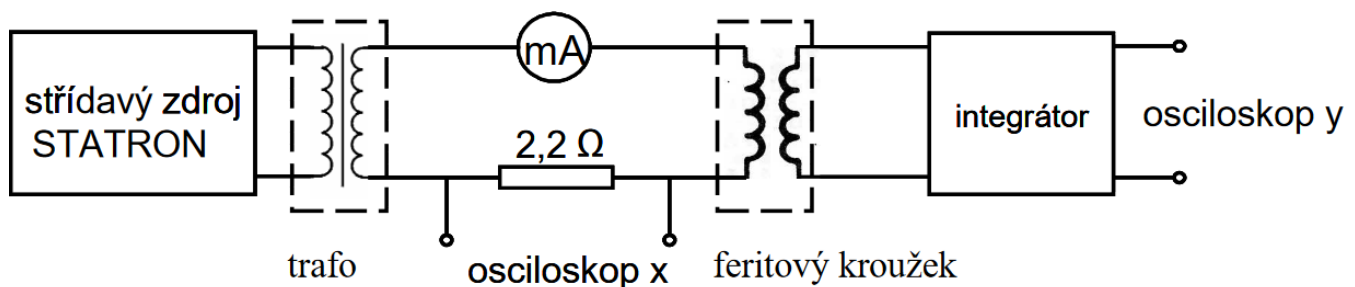
$$d = (d_1 + d_2)/2 \quad (2)$$

a  $d_1, d_2$  jsou vnitřní resp. vnější průměry kroužku.

Napětí úměrné této magnetické intenzitě přivedeme na horizontální destičky osciloskopu (v obrázku 2 „osciloskop x“). Na  $y$ -ovou osu osciloskopu přivedeme pomocí integrátoru napětí úměrné indukci  $B$  ve vzorku, před integrátorem je napětí úměrné časové derivaci indukce.

Měření provádíme podle zapojení na obrázku 2.

Obr. 2: Schéma zapojení pro měření hysterezních smyček



Velikost koercitivní síly  $H_c$  pak lze vypočítat snadno díky linearitě horizontální stupnice osciloskopu.

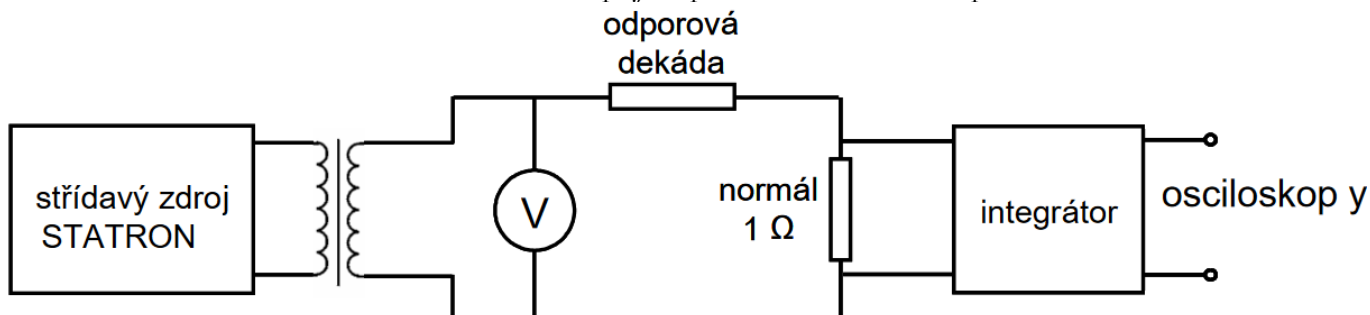
$$H_c = \frac{U_c}{U_x} H_m, \quad (3)$$

kde  $H_m$  je maximální hodnota hodnota elektrické intenzity, kterou můžeme dopočítat např. podle (1),  $U_x$  je maximální hodnota napětí na horizontální ose osciloskopu odpovídající  $H_m$  a  $U_c$  je hodnota napětí v místě, kde křivka protíná horizontální osu osciloskopu (za předpokladu, že je smyčka vycentrovaná).

## 2.2 Kalibrace

Svislá osa musí být zkalibrována, protože neznáme konstantu úměrnosti mezi napětím  $U_y$ , které ukazuje osciloskop na  $y$ -ové ose a skutečnou maximální výchylkou napětí  $U_m$  na vstupních svorkách integrátoru.

Obr. 3: Schéma zapojení pro kalibraci osciloskopu



Obvod zapojíme podle schématu na obrázku 3 a ke kalibraci použijeme voltmetr. Napětí na odporovém normálu  $U_{\text{eff}}$  lze z napětí  $U_0$  naměřeného na voltmetru podle Ohmova zákona dopočítat jednoduchým vztahem [2]

$$U_{\text{eff}} = \frac{R_n}{R_n + R_d} U_0, \quad (4)$$

kde jsme předpokládali ideální voltmetr i osciloskop, což si v případě použitého multimetru i osciloskopu můžeme dovolit.

Z efektivního napětí naměřeného na odporovém normálu lze pomocí voltmetru a napětí  $U_y$  naměřeném na osciloskopu vypočítat konstantu úměrnosti  $k$  jako [1]

$$k = \frac{U_{\text{eff}} \sqrt{2}}{U_y \omega}. \quad (5)$$

Maximální výchylku napětí  $U_m = U_{\text{eff}} \sqrt{2}$  pak můžeme pomocí konstanty  $k$  vypočítat z údaje na osciloskopu jako

$$U_m = k U_y \omega. \quad (6)$$

Maximální hodnotu magnetické indukce pak lze dopočítat následujícím vztahem [1]

$$B_m = \frac{U_{\text{eff}} \sqrt{2}}{\omega S n_2} = \frac{U_m}{\omega S n_2}, \quad (7)$$

kde  $S$  je obsah průřezu kroužku

$$S = \frac{1}{2} (d_1 - d_2) v,$$

kde  $v$  je výška kroužku.

## 3 Měření

Nejprve byl sestaven obvod podle schématu na obrázku 2. Byl použit střídavý zdroj o frekvenci  $f = 50$  Hz s nastavitelným napětím v rozsahu 0–250 V, které bylo posléze transformováno pomocí trafo na nižší, bezpečnější napětí do 6 V. Jako ampérmetr byl použit digitální multimetr METEX M3870D, jehož výrobce uvádí

pro námi použitý rozsah 4 A přesnost  $\pm(2,0\% + 5\text{dg})$  s rozlišením 1 mA. Nepřesnosti odporu  $2,2\Omega$ , integrátoru, trafa i vstupní frekvence  $f = 50\text{ Hz}$  můžeme vůči nejistotě způsobené čtením z displaye osciloskopu bezpečně zanedbat (níže uvidíme, že tato nejistota bude poměrně vysoká).

Nejprve byly zapojeny postupně tři kroužky a citlivost  $y$ -ové osy osciloskopu byla nastavena na co největší citlivost tak, aby se na display stále vešla hysterézní křivka každého kroužku při plném rozvinutí podle doporučeného rozsahu proudů [1].

Pro každý kroužek jsme měřili v doporučeném rozsahu proudů [1] a provedli jsme alespoň deset měření. Při každém změření jsme zaznamenali hodnotu proudu (na ampérmetru), velikost napětí  $U_x$  ve voltech (k vyšší přesnosti nám pomohlo uzemnění  $y$ -ového vstupu), velikost napětí  $U_y$  (pomocí uzemnění  $x$ -ového vstupu) a napětí  $2U_C$ . Protože hodnota  $U_C$  byla ve většině případů poměrně malá, odečítali jsme vždy dvojnásobek hodnoty  $U_C$  díky faktu, že křivka je symetrická. Toto hodnotu jsme odečetli tak, že jsme si křivku na displayi posunuli pouze ve směru osy  $x$  tak, aby procházela počátkem a odečetli jsme  $x$ -ovou souřadnici bodu, kde podruhé protínala osu  $x$ . Do tabulky byla zapisovaná tato hodnota dělena dvěma, tedy  $U_C$ . Tím jsme tedy zdvojnásobili přesnost měření  $U_C$ .

### 3.1 Kalibrace

Ačkoliv jsme kalibraci provedli jako poslední, začneme s ní na začátku, protože následující výpočty budou vycházet z těchto kalibrovaných hodnot.

Obvod byl zapojen podle schématu na obrázku 3. Byl použit zdroj i transformátor popsany výše. Jako voltmetr byl použit multimetr METEX M3870D s přesností  $\pm(8,0\% + 3\text{dg})$  na použitém rozsahu (rozlišení 10 mV). Přesnost odporové dekády byla 0,1 % a její odpor byl nastaven na  $(999 \pm 1)\Omega$ . Nepřesnost odporového normálu (odpor normálu je  $1\Omega$ ) můžeme vůči ostatním nepřesnostem zanedbat.

Po zapojení bylo na voltmetru naměřeno efektivní napětí

$$U_0 = (8,05 \pm 0,09)\text{ V}.$$

Efektivní napětí na normálu tedy je podle (4)

$$U_{\text{eff}} = (8,05 \pm 0,09)\text{ mV},$$

kde jsme při výpočtu nejistoty zanedbali nepřesnost odporové dekády, protože je značně menší, než nepřesnost voltmetru (resp. multimetru). Při tomto zapojení ukazoval osciloskop na ose  $y$  hodnotu

$$U_y = (7,2 \pm 0,2)\text{ V}.$$

Z toho tedy podle vztahu (5) můžeme dopočítat konstantu úměrnosti  $k$ , kde  $\omega = 2\pi f = 100\pi\text{ s}^{-1}$

$$k = (5,03 \pm 0,15) \cdot 10^{-6}\text{ s},$$

jejíž nejistota byla spočtena podle gaussova zákona šíření nejistot[3]<sup>1</sup>

### 3.2 Parametry kroužků

V tabulce 1 jsou uvedené parametry každého ze tří použitých kroužků. Nebyly u nich uvedeny nejistoty, proto bereme jako nejistotu polovinu poslední uvedené cifry.

Tabulka 1: parametry kroužků

kroužek	$n_1$	$n_2$	$\frac{d_1}{\text{mm}}$	$\frac{d_2}{\text{mm}}$	$\frac{v}{\text{mm}}$	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{S}{\text{mm}^2}$
I	50	6	$29,20 \pm 0,05$	$20,750 \pm 0,005$	$4,40 \pm 0,05$	$24,98 \pm 0,03$	$18,6 \pm 0,2$
II	50	6	$30,650 \pm 0,005$	$21,80 \pm 0,05$	$4,350 \pm 0,005$	$26,23 \pm 0,03$	$19,2 \pm 0,1$
III	300	6	$31,00 \pm 0,05$	$21,80 \pm 0,05$	$4,150 \pm 0,005$	$26,40 \pm 0,04$	$19,1 \pm 0,1$

<sup>1</sup>Nejistotu (úhlové) frekvence můžeme vůči nejistotě napětí bezpečně zanedbat  $\sigma_k^2 = k \left( \frac{U_{\text{eff}}}{\sigma_{U_{\text{eff}}}} + \frac{U_y}{\sigma_{U_y}} \right)$

Naměřené hodnoty napětí  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_c$  na osciloskopu a proudu  $I$  na multimetru jsou uvedeny v tabulkách 2, 3 a 4. Tabulky rovnou obsahují i výpočet  $U_m$  podle (6),  $B_m$  podle (7),  $H_m$  dle (1) a  $H_c$  podle vztahu (3)<sup>2</sup>. První sloupeček každé tabulky obsahuje popis tvaru křivky. Křivka vždy zaujímal jeden z tvarů na obrázku 1, až na několik přechodových případů (hlavně v případě přechodu mezi zaškrnceným a normálním typem smyčky pro třetí kroužek), kdy nebylo snadné určit pouhým pohledem, o jaký typ se jedná.

Závislosti  $B_m$  na  $H_m$ , respektive  $H_c$  na  $H_m$  jsou následně vyneseny v grafech 1 až 6. Naměřené hodnoty jsou proloženy hladkou křivkou, protože analytickou závislost neznáme a pravděpodobně by byla značně komplikovaná.

### 3.3 Kroužek I

Tabulka 2: Kroužek I

typ	$\frac{U_x}{V}$	$\frac{U_y}{V}$	$\frac{U_c}{V}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{U_m}{\text{mV}}$	$\frac{B_m}{T}$	$\frac{H_m}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}}$
a)	$0.2 \pm 0.1$	$0.4 \pm 0.2$	$0 \pm 0.1$	$5 \pm 3$	$0.6 \pm 0.3$	$0.02 \pm 0.01$	$3 \pm 2$	0
b)	$0.4 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.2$	$0.2 \pm 0.1$	$14 \pm 3$	$1.9 \pm 0.3$	$0.05 \pm 0.01$	$9 \pm 2$	$1 \pm 1$
c)	$0.8 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.1$	$25 \pm 4$	$3.5 \pm 0.3$	$0.10 \pm 0.01$	$16 \pm 2$	$3 \pm 1$
	$1.2 \pm 0.1$	$3.6 \pm 0.2$	$0.6 \pm 0.1$	$40 \pm 4$	$5.7 \pm 0.4$	$0.16 \pm 0.01$	$25 \pm 2$	$4 \pm 1$
	$1.8 \pm 0.1$	$4.4 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.1$	$55 \pm 4$	$7.0 \pm 0.4$	$0.20 \pm 0.01$	$35 \pm 3$	$6 \pm 1$
	$2.2 \pm 0.1$	$5.2 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$70 \pm 4$	$8.2 \pm 0.4$	$0.23 \pm 0.01$	$45 \pm 3$	$9 \pm 1$
	$2.8 \pm 0.1$	$5.6 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$90 \pm 5$	$8.9 \pm 0.4$	$0.25 \pm 0.01$	$57 \pm 3$	$10 \pm 1$
	$3.4 \pm 0.1$	$6.0 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$110 \pm 5$	$9.5 \pm 0.4$	$0.27 \pm 0.01$	$70 \pm 3$	$12 \pm 1$
	$4.0 \pm 0.1$	$6.0 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$130 \pm 6$	$9.5 \pm 0.4$	$0.27 \pm 0.01$	$83 \pm 4$	$14 \pm 2$
	$4.6 \pm 0.1$	$6.0 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$150 \pm 6$	$9.5 \pm 0.4$	$0.27 \pm 0.01$	$96 \pm 4$	$16 \pm 2$

<sup>2</sup> Nejistoty těchto čtyř veličin jsou vypočteny podle gaussova zákona šíření nejistot následujícími vztahy

$$\sigma_{U_m}^2 = U_m^2 \left( \frac{\sigma_k^2}{k^2} + \frac{\sigma_{U_y}^2}{U_y^2} \right),$$

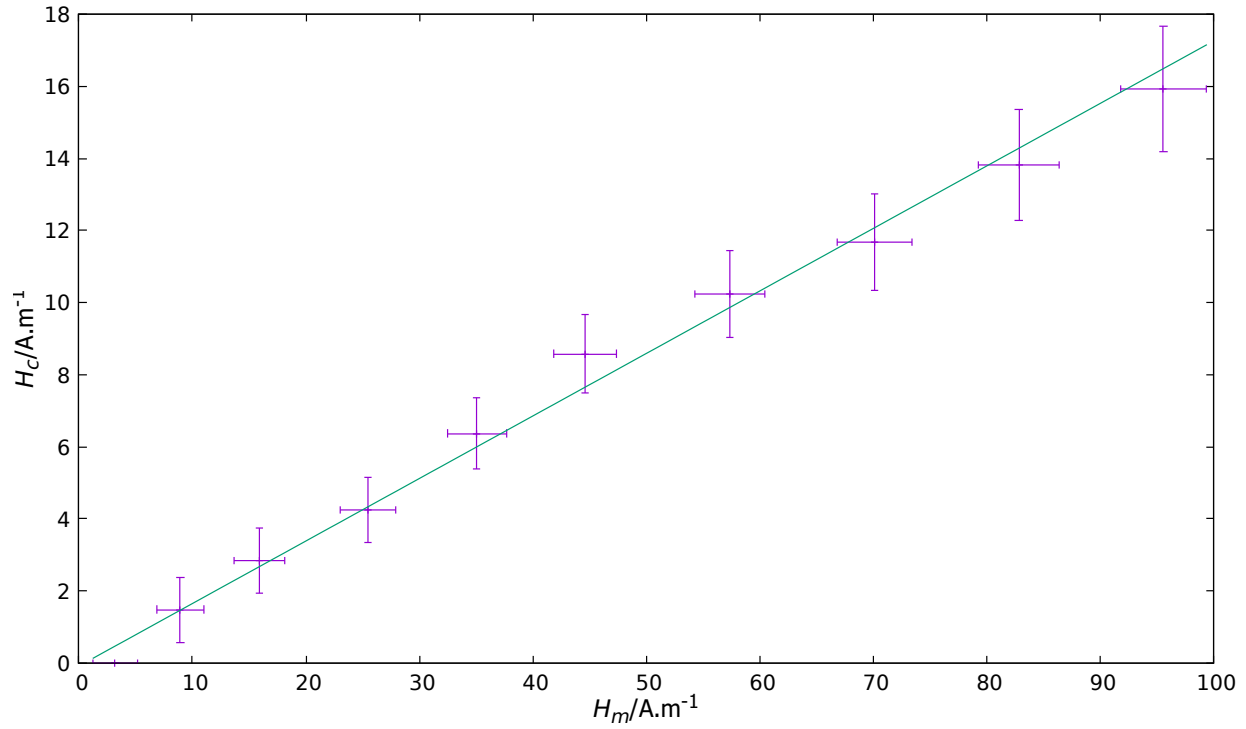
$$\sigma_{B_m}^2 = B_m^2 \left( \frac{\sigma_{U_m}^2}{U_m^2} + \frac{\sigma_S^2}{S^2} \right),$$

$$\sigma_{H_m}^2 = H_m^2 \left( \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} \right),$$

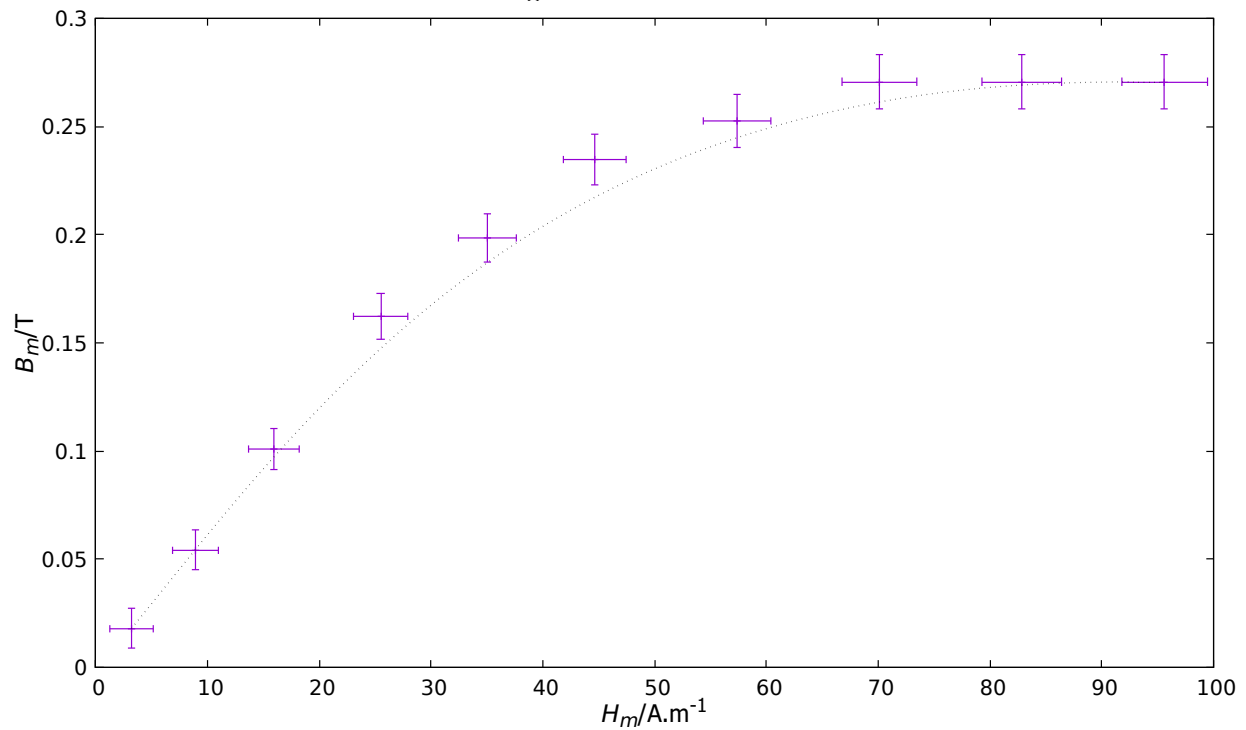
$$\sigma_{H_c}^2 = H_c^2 \left( \frac{\sigma_{H_m}^2}{H_m^2} + \frac{\sigma_{U_c}^2}{U_c^2} + \frac{\sigma_{U_x}^2}{U_x^2} \right),$$

nevažujeme nejistotu úhlové frekvence  $\omega$  a proto se nedopouštíme chyby, když nejprve ve vztahu (6) touto veličinou násobíme a výsledek pak ve vztahu (7) dělíme. V tabulkách jsou uvedeny pouze zaokrouhlené hodnoty, podle jejich nejistot, ale ve skutečnosti bylo počítáno s přesnými čísly bez zaokrouhlování.

Graf 1: Závislost koercitivní síly na  $H_m$  - Kroužek I



Graf 2: Závislost magnetické indukce na  $H_m$  - Kroužek I



V grafu 1 je závislost koeficientní síly na  $H_m$  proložena lineární závislostí  $H_c(H_m) = a_1 H_m + b_1$ , kde koeficienty vyšli fitem v programu Gnuplot (s uvážením jednotlivých  $x$ -ových i  $y$ -ových nejistot) jako

$$a_1 = 0,173 \pm 0,005,$$

$$b_1 = (-0,1 \pm 0,2) \text{ A/m}.$$

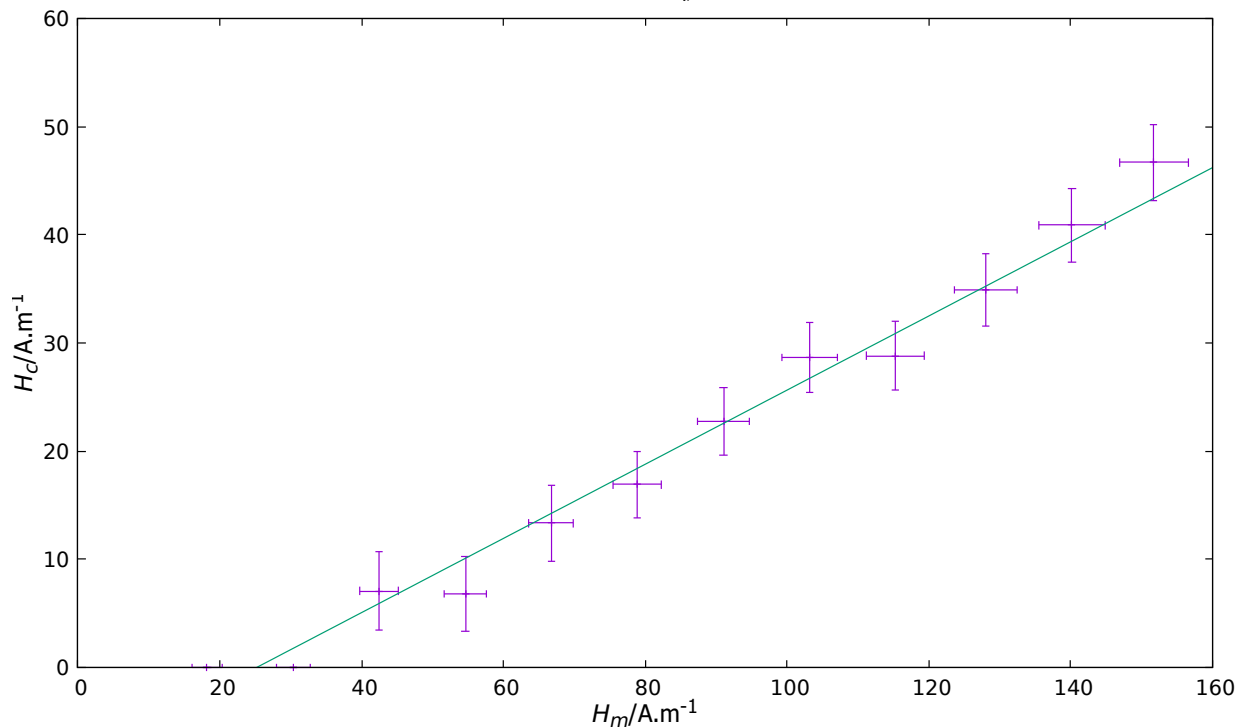
V grafu 2 je závislost proložena pouze hladkou křivkou (která i tak nekopíruje ideálně naměřené hodnoty, protože se uprostřed rozsahu mírně odchyluje do nižších hodnot), protože neznáme analytickou závislost těchto dvou veličin.

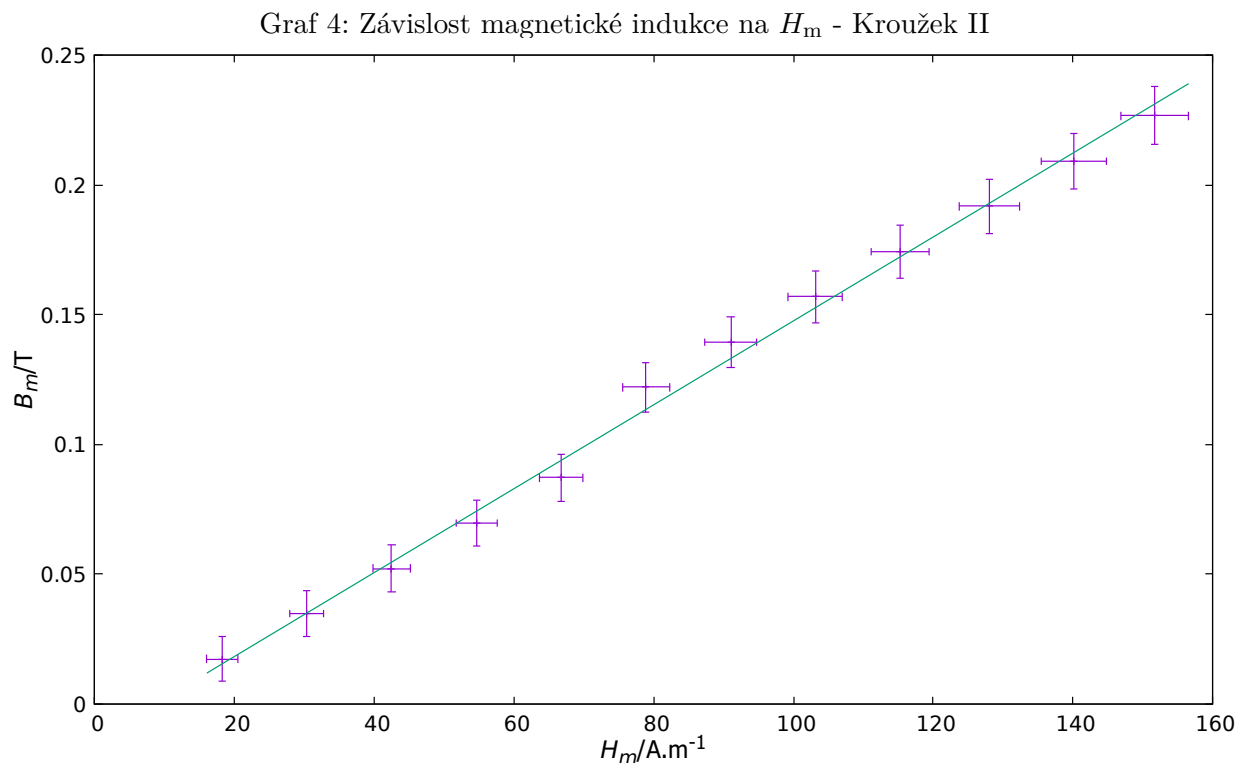
### 3.4 Kroužek II

Tabulka 3: Kroužek II

typ	$\frac{U_x}{V}$	$\frac{U_y}{V}$	$\frac{U_c}{V}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{U_m}{\text{mV}}$	$\frac{B_m}{T}$	$\frac{H_m}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}}$
a)	$0.4 \pm 0.1$	$0.4 \pm 0.2$	$0 \pm 0.1$	$30 \pm 4$	$0.6 \pm 0.3$	$0.017 \pm 0.009$	$18 \pm 2$	0
	$0.8 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.2$	$0 \pm 0.1$	$50 \pm 4$	$1.3 \pm 0.3$	$0.035 \pm 0.009$	$30 \pm 2$	0
b)	$1.2 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.2$	$0.2 \pm 0.1$	$70 \pm 4$	$1.9 \pm 0.3$	$0.052 \pm 0.009$	$42 \pm 3$	$7 \pm 4$
	$1.4 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.2$	$0.2 \pm 0.1$	$90 \pm 5$	$2.5 \pm 0.3$	$0.070 \pm 0.009$	$55 \pm 3$	$7 \pm 3$
	$1.8 \pm 0.1$	$2.0 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.1$	$110 \pm 5$	$3.2 \pm 0.3$	$0.087 \pm 0.009$	$67 \pm 3$	$13 \pm 3$
	$2.0 \pm 0.1$	$2.8 \pm 0.2$	$0.6 \pm 0.1$	$130 \pm 6$	$4.4 \pm 0.3$	$0.122 \pm 0.009$	$79 \pm 3$	$17 \pm 3$
	$2.4 \pm 0.1$	$3.2 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.1$	$150 \pm 6$	$5.1 \pm 0.4$	$0.139 \pm 0.010$	$91 \pm 4$	$23 \pm 3$
	$2.6 \pm 0.1$	$3.6 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$170 \pm 6$	$5.7 \pm 0.4$	$0.157 \pm 0.010$	$103 \pm 4$	$29 \pm 3$
c)	$3.0 \pm 0.1$	$4.0 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$190 \pm 7$	$6.3 \pm 0.4$	$0.174 \pm 0.010$	$115 \pm 4$	$29 \pm 3$
	$3.2 \pm 0.1$	$4.4 \pm 0.2$	$1.2 \pm 0.1$	$211 \pm 7$	$7.0 \pm 0.4$	$0.192 \pm 0.011$	$128 \pm 4$	$35 \pm 3$
	$3.6 \pm 0.1$	$4.8 \pm 0.2$	$1.4 \pm 0.1$	$231 \pm 8$	$7.6 \pm 0.4$	$0.209 \pm 0.011$	$140 \pm 5$	$41 \pm 3$
	$3.8 \pm 0.1$	$5.2 \pm 0.2$	$1.6 \pm 0.1$	$250 \pm 8$	$8.2 \pm 0.4$	$0.227 \pm 0.011$	$152 \pm 5$	$47 \pm 4$

Graf 3: Závislost koeficientní síly na  $H_m$  - Kroužek II





Závislost v grafu 3 byla proložena stejným postupem jako v případě prvního kroužku (viz. výše)  $H_c(H_m) = a_2 H_m + b_2$

$$a_2 = 0,34 \pm 0,02 ,$$
$$b_2 = (-9 \pm 1) \text{A/m} .$$

V grafu 4 je závislost proložena lineární funkcí  $B_m(H_m) = \alpha H_m + \beta$ , koeficienty jsme spočítali fitem obdobně jako v předchozím případě

$$a_1 = (1,62 \pm 0,03) \cdot 10^{-3} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} ,$$
$$b_1 = (-0,014 \pm 0,003) \text{T}$$

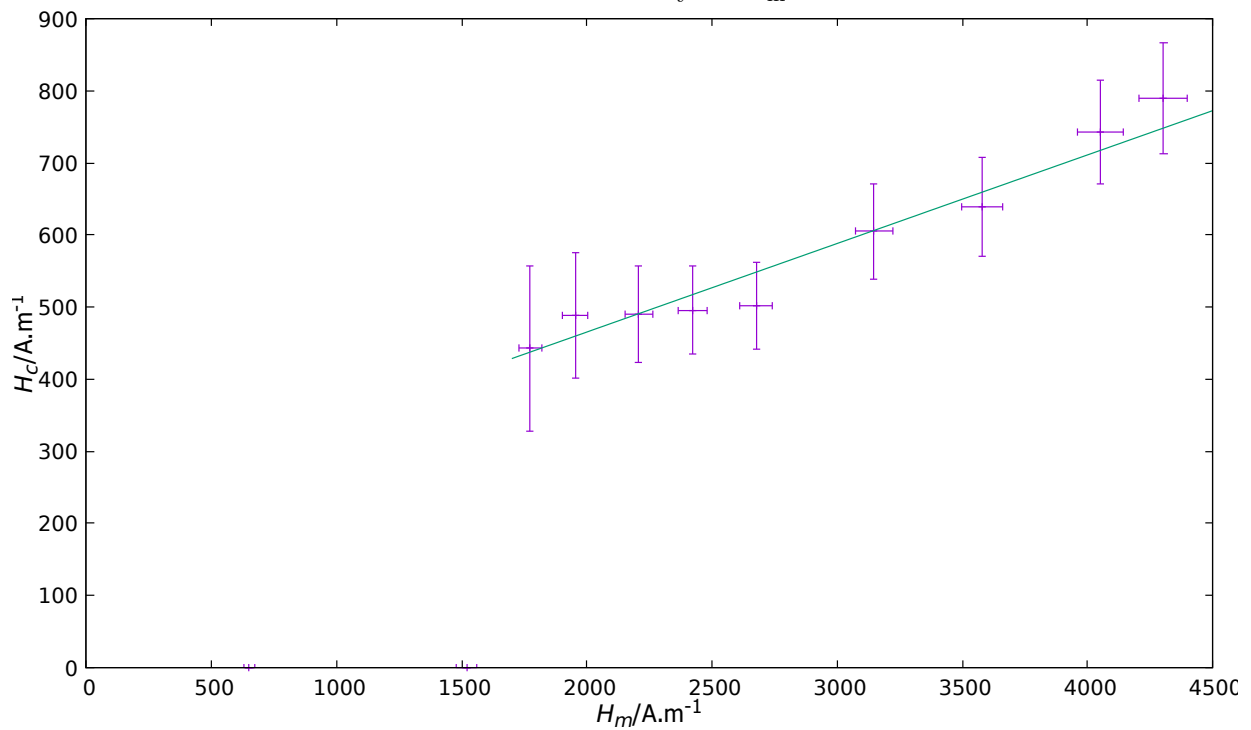


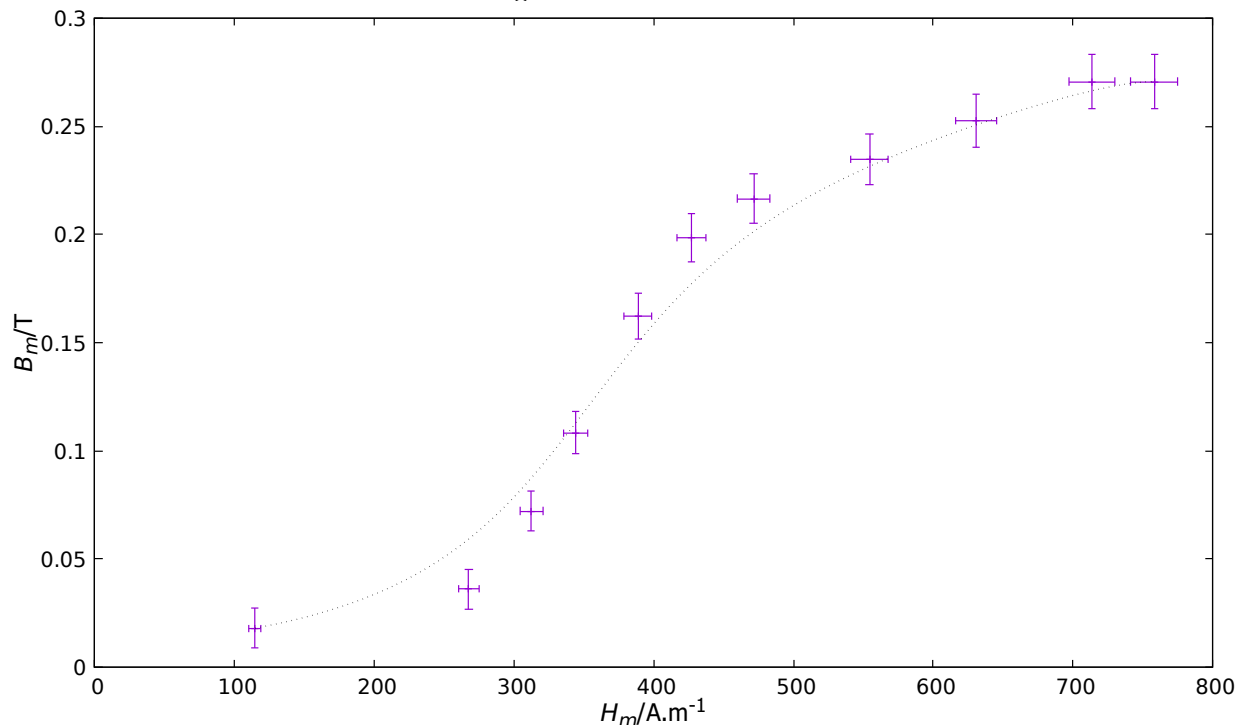
3.5 Kroužek III

Tabulka 4: Kroužek III

typ	$\frac{U_x}{V}$	$\frac{U_y}{V}$	$\frac{U_c}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U_m}{mV}$	$\frac{B_m}{T}$	$\frac{H_m}{A \cdot m^{-1}}$	$\frac{H_c}{A \cdot m^{-1}}$
a)	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0 ± 0.1	180 ± 10	0.6 ± 0.3	0.018 ± 0.009	650 ± 20	0
	1.2 ± 0.1	0.8 ± 0.2	0 ± 0.1	420 ± 10	1.3 ± 0.3	0.035 ± 0.009	1520 ± 40	0
b)	1.6 ± 0.1	1.6 ± 0.2	0.4 ± 0.1	490 ± 10	2.5 ± 0.3	0.070 ± 0.009	1770 ± 50	440 ± 110
	1.8 ± 0.1	2.4 ± 0.2	0.6 ± 0.1	540 ± 10	3.8 ± 0.3	0.105 ± 0.009	1950 ± 50	490 ± 90
c)	2 ± 0.1	3.6 ± 0.2	0.8 ± 0.1	610 ± 20	5.7 ± 0.4	0.158 ± 0.010	2210 ± 60	490 ± 70
	2.2 ± 0.1	4.4 ± 0.2	0.9 ± 0.1	670 ± 20	7.0 ± 0.4	0.193 ± 0.011	2420 ± 60	500 ± 60
	2.4 ± 0.1	4.8 ± 0.2	0.9 ± 0.1	740 ± 20	7.6 ± 0.4	0.211 ± 0.011	2680 ± 60	500 ± 60
	2.8 ± 0.1	5.2 ± 0.2	1.0 ± 0.1	870 ± 20	8.2 ± 0.4	0.228 ± 0.011	3150 ± 70	610 ± 70
d)	3.2 ± 0.1	5.6 ± 0.2	1.0 ± 0.1	990 ± 20	8.9 ± 0.4	0.246 ± 0.012	3580 ± 80	640 ± 70
	3.6 ± 0.1	6 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1120 ± 30	9.5 ± 0.4	0.264 ± 0.012	4050 ± 90	740 ± 70
	3.8 ± 0.1	6 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1190 ± 30	9.5 ± 0.4	0.264 ± 0.012	4300 ± 100	790 ± 80

Graf 5: Závislost koercitivní síly na  $H_m$  - Kroužek III



Graf 6: Závislost magnetické indukce na  $H_m$  - Kroužek III

Závislost v grafu 5 byla proložena stejným postupem jako v případě prvního a druhého kroužku (viz. výše) ale pouze na intervalu od  $1700 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  do  $4500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ . První dvě hodnoty byly z fitu vynechány, protože odpovídají lineární hysterézní smyčce, tedy napětí  $U_C$  bylo prakticky nulové (menší než nejmenší dílek stupnice osciloskopu). Z toho důvodu u těchto dvou bodů není uvedena ani chybová úsečka.  $H_c(H_m) = a_3 H_m + b_3$

$$a_3 = 0,12 \pm 0,01,$$

$$b_3 = (220 \pm 31) \text{ A/m}.$$

V grafu 6 má závislost podivný tvar (tzn. těžko by se hledal analytický předpis funkce), proto byla proložena pouze hladkou křivkou.

## 4 Diskuze výsledků

Závislosti  $H_C$  na  $H_m$  (viz. grafy 1, 3 a 5) jsou pro všechny tři kroužky v daném rozsahu přibližně lineární, avšak pouze závislost pro první kroužek lze považovat za procházející počátkem, tedy se zanedbatelným absolutním členem.

Závislosti  $B_m$  na  $H_m$  (viz. grafy 1, 3 a 5) se pro všechny kroužky značně liší. Pro první kroužek je oblastí nižších elektrických intenzit  $H_m$  možné závislost považovat za přibližně lineární a pro hodně velké intenzity za konstantu, protože zde dochází k nasycení. Analytická závislost v přechodové oblasti nám však není známa. Pro druhý kroužek je závislost lineární na celém měřeném rozsahu a pro třetí kroužek vychází podivná závislost, která výrazněji roste pouze v intervalu od  $300 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  do  $500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  a dále se růst zastavuje.

## 4.1 Nejistoty

Jednoznačně nejvyšší nejistotu do měření vnáší odečítání hodnot z displaye osciloskopu. To nám ale příliš nevadí, protože nám šlo o obecný charakter závislosti.

Vyšší přesnosti pro nízké proudy šlo dosáhnout například tím, kdybychm místo hodnot  $U_x$  a  $U_y$  odečítali jejich dvojnásobky podobným způsobem jako jsme to dělali pro  $U_C$ . Zároveň bychom mohli měření rozdělit na více fází a sice, že pro menší proudy bychom nastavili vyšší přesnost  $y$ -ové osy osciloskopu. A po několika měřeních bychom citlivost upravili. V tom případě by ale bylo potřeba před každou změnou rozsahu provést kalibraci nebo si zaznamenávat i použitý rozsah  $y$ -ové osy a následně dopočítat koeficienty  $k$  pro jednotlivé rozsahy. To by však přesahovalo rámec požadavků této úlohy.

## 5 Závěr

Byly pozorovány všechny čtyři typy hysterézních smyček. V tabulkách 2 až 4 je uvedeno, na jakém rozsahu intenzit pole lze jednotlivé typy smyček pozorovat, avšak je to pouze orientační rozložení, protože v přechodových oblastech bylo obtížné identifikovat, o jaký typ smyčky se jedná.

Dále byla okalibrována aparatura (konkrétně vertikální osa osciloskopu) a změřena přibližná závislost indukce  $B_m$  na  $H_m$  (grafy 1, 3 a 5) a  $H_C$  na  $H_m$  (grafy 1, 3 a 5).

Pokud jsi dočetl moje praktikum až sem, gratuluji a řeš online.fyziklani.cz!

## 6 Seznam použité literatury

- [1] R. BAKULE, J. ŠTERNBERK. *Fyzikální praktikum II*. Praha: SPN, 1989.
- [2] B. SEDLÁK, I. ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus*. Praha: Academia, 2002
- [3] B. VYBÍRAL. *Zpracování dat fyzikálních měření*. Hradec Králové: MAFY, 2002
- [4] BROŽ, J. a KOL. *Základy fyzikálních měření I*. 1. vyd. Praha: SPN, 1983, 669 s.