

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum II

Úloha č. 21

### Studium hysterezních smyček feritů

Měřil a zpracoval: Antonín Baďura, FOF

Měřil dne: 9. listopadu 2018

Odevzdal dne: 16. listopadu 2018

Poznámky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0–3	
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Seznam použité literatury	0–1	
<b>Úhrnem</b>	nejvýše 20	

Hodnotil ..... dne .....

# 1 Zadání úlohy

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 intenzitě 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 1 (a) zpracujte tabelárně a graficky.

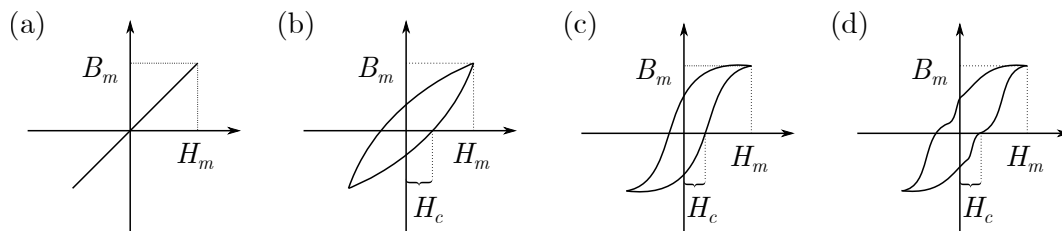
## 2 Teoretická část

### 2.1 Ferity a hysterezní křivky

Ferity jsou magnetické oxidy, které můžeme obecně zapsat vzorcem  $M^{2+} Fe_2^{3+} O_4$ , kde  $M^{2+}$  představuje kov s oxidačním číslem 2. Zde použité ferity jsou manganozinečnaté (platí pro kroužky I a II) a kobaltonikelnaté (kroužek III). Posledně jmenovaný je navíc tzv. perminvarový ferit, tj. pro velký rozsah magnetického pole se jeho permeabilita nemění. Tyto materiály mají měrný elektrický odpor v řádu  $10^0 - 10^4 \Omega m$  a ztráty vířivými proudy jsou při použití proměnného elektrického pole zanedbatelné [1].

Hysterezní křivkou je popisována závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$  při přemagnetování mezi poli  $H_m$  a  $-H_m$ , čemuž odpovídají hodnoty indukce  $B_m$  a  $-B_m$ . V obrázku 1 jsou zobrazené jednotlivé typy hysterezních křivek. Typ (a) odpovídá vratným změnám v doménách magnetika. U běžných materiálů je pozorovatelná jen pro slabá pole, na širokém rozsahu polí ji je možné pozorovat u perminvarových materiálů. Křivka (b) se nazývá Rayleighova, u tohoto typu se začínají uplatňovat i nevratné děje. U typu (c) se hovoří o normálním tvaru a již se plně uplatňují nevratné magnetizační děje, zřetelně se projevuje nasycování vzorku. Nakonec typ (d), zúžená hysterezní křivka, se vyskytuje u perminvarových materiálů a při přechodu ke smyčce normálního tvaru.

Pro typy (b)–(d) je rovněž zakreslena koercitivní síla  $H_c$ , která je pro typ (a) nulová.



Obrázek 1: Typy hysterezních křivek

### 2.2 Princip měření

Každý měřený kroužek disponuje primárním vinutím o  $n_1$  závitů a sekundárním s  $n_2$  závitů. Pomocí primárního vinutí můžeme střídavým magnetizačním proudem  $i$  vytvořit magnetické

pole o intenzitě  $H$ :

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

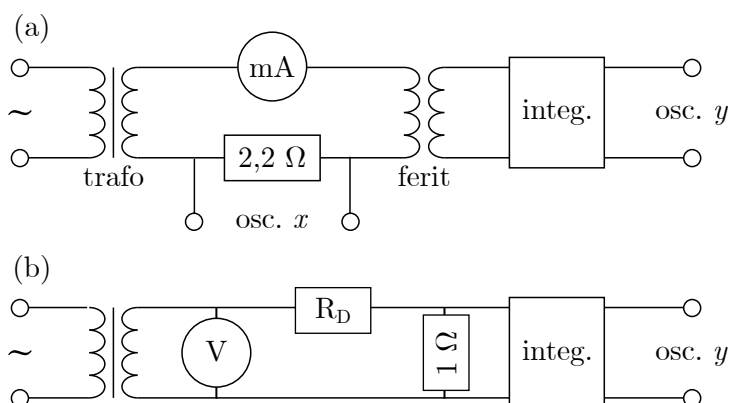
kde  $d = (d_1 + d_2)/2$  pro  $d_1$ ,  $d_2$  vnitřní, resp. vnější průměr kroužku. Signál úměrný  $i$  přivádíme na horizontální osu osciloskopu. Na sekundárním vinutí tak můžeme měřit indukované napětí, jehož integrál je úměrný magnetické indukci  $B$ . Schéma takto zapojeného obvodu je v obrázku 2 (a) [1].

Vertikální osu osciloskopu je třeba kalibrovat. K tomu slouží obvod vyobrazený v obrázku 2 (b). Změříme-li na osciloskopu délku úsečky  $y$ , která se objeví na stínítku díky tomuto zapojení, můžeme ze znalosti úhlové frekvence proudu  $\omega$ , průřezu  $S = (d_1 - d_2)v/2$  pro výšku kroužku  $v$  a napětí  $U_{ef}$  na odporovém  $1\Omega$  normálu  $R_1$  určit odpovídající hodnotu magnetické indukce  $B_m$ :

$$B_m = \frac{\sqrt{2}U_{ef}}{\omega n_2 S}. \quad (2)$$

Ostatní hodnoty  $B_m$  je možné snadno dopočítat z relativní velikosti hysterezní křivky na stínítku. Hodnotu napětí  $U_{ef}$  určíme ze znalosti odporu  $R_D$  na odporové dekádě a efektivního napětí  $U$  na voltmetru [1]:

$$U_{ef} = \frac{R_1}{R_D + R_1} U. \quad (3)$$



Obrázek 2: Schéma zapojení (a) měření hysterezních smyček, (b) kalibrace vertikální osy osciloskopu (vytvoreno dle [1])

### 3 Výsledky měření

Při měření byl použit multimetr Fluke 175, který při měření střídavého napětí na použitém rozsahu dosahoval nejistoty  $\pm 1\% \pm 0,003$  V a při měření proudu  $\pm 1.5\% \pm 3$  dig., a to na rozsazích 60 mA (dílky 0,01 mA), 400 mA (dílky 0,1 mA) a 6 A (dílky 1 mA). Ve všech následujících úvahách představuje  $x$ , resp.  $y$  počet dílků stupnice odečtených ze stínítka osciloskopu, jedná se tedy o bezrozměrné číslo; nejistota odečtu ze stínítka byla odhadnuta jako  $\pm 1$  dílek. Všechny přenesené nejistoty byly spočteny dle běžného vztahu pro přenos nejistoty:

$$\sigma_f = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (4)$$

Rozměry a další charakteristiky použitých feritových kroužků jsou uvedeny v tabulce 1.

kroužek	$\frac{d_1}{\text{mm}}$	$\frac{d_2}{\text{mm}}$	$\frac{v}{\text{mm}}$	$n_1$	$n_2$
I	29,2	20,75	4,4	50	6
II	30,65	21,8	4,35	50	6
III	31,0	21,8	4,15	300	6

Tabulka 1: Charakteristiky použitých feritových kroužků

Požadované závislosti  $B_m$ ,  $H_m$  a  $H_c$  byly měřeny nepřímou pomocí zapojení v obrázku 2 (a). Hodnota  $H_m$  byla vypočtena z hodnoty proudu primárním vinutím dle vzorce 1 po vynásobení naměřených efektivních hodnot proudu  $I_{ef}$  faktorem  $\sqrt{2}$ . Koercivní síla  $H_c$  byla určena úměrně z hodnot odečtených z osciloskopu a již spočteného  $H_m$ . Hodnota  $B_m$  byla určena dle vzorce 2, kde  $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}$  a  $U_{ef}$  bylo určeno ze vztahu

$$U_{ef} = \frac{y}{2\xi}, \quad (5)$$

kde  $y$  je hodnota naměřená na stínítku osciloskopu odpovídající  $2 \cdot B_m$  a  $\xi$  je koeficient určený při kalibraci osy  $y$  osciloskopu popsané níže. Spočtené hodnoty spolu s hodnotami naměřenými jsou uvedeny pro jednotlivé kroužky v tabulkách 3, 4 a 5. Graficky jsou vyobrazeny v grafech 3, 4 a 5.

Během měření výše uvedených závislostí jsem rovněž zjišťoval, při jakých hodnotách  $H_m$  dochází k přechodu mezi různými typy smyček, které jsou schematicky vyobrazeny v obr. 1. U prvního kroužku došlo k přechodu od typu (a) k typu (b) v rozmezí  $H_m = (8 - 11) \text{ mA}^{-1}$ , mezi typem (b) a (c) v rozmezí  $H_m = (24 - 30) \text{ mA}^{-1}$ . U kroužku II došlo k přechodu mezi (a) a (b) pro  $H_m = (59 - 62) \text{ mA}^{-1}$ , od (b) do (c) v rozmezí  $H_m = (120 - 137) \text{ mA}^{-1}$ . Na konec u posledního kroužku III k přechodu od typu (a) k typu (b) v rozmezí  $H_m = (2170 - 2270) \text{ mA}^{-1}$ , mezi typem (b) a (d) v rozmezí  $H_m = (2810 - 2910) \text{ mA}^{-1}$  a od (d) k (c) v rozmezí  $H_m = (4300 - 4800) \text{ mA}^{-1}$ .

Vertikální osa osciloskopu byla kalibrována podle schématu 2 (b). Odpor na dekádě činil  $R_D = 999 \Omega$  a normálu  $R_1 = 1 \Omega$ . Napětí  $U_{ef}$  na normálu bylo určeno z napětí na multimetru  $U$  dle vzorce 3. Celkově bylo změřeno napětí pro šest různých délek  $y$  úseček na stínítku v celém rozsahu měření, naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Pro každou dvojici pak byl vypočten koeficient  $k$  jako  $\xi = y/U_{ef}$ , výsledný koeficient byl určen průměrem:  $\xi = (4,44 \pm 0,08) (\text{mV})^{-1}$  (v nejistotě jsou započteny i přenesené nejistoty z měření  $y$  na stínítku). Respektive můžeme uvést i hodnotu konstanty  $\chi = \sqrt{2}/(2\omega n_2 S \xi)$  přímé úměrnosti mezi  $B_m$  a  $y$  (tedy  $B_m = \chi y$ ) postupně pro všechny kroužky:

$$\chi^I = (4,57 \pm 0,08) \text{ mT},$$

$$\chi^{II} = (4,40 \pm 0,08) \text{ mT},$$

$$\chi^{III} = (4,42 \pm 0,08) \text{ mT}.$$

$U_{ef}/\text{mV}$	$1,11 \pm 0,01$	$2,26 \pm 0,02$	$3,391 \pm 0,03$	$4,94 \pm 0,04$	$5,67 \pm 0,07$	$7,08 \pm 0,7$
$y$	$5 \pm 1$	$10 \pm 1$	$15 \pm 1$	$20 \pm 1$	$25 \pm 1$	$31 \pm 1$

Tabulka 2: Hodnoty  $U_{ef}$  a odpovídající  $y$  pro kalibraci vertikální osy osciloskopu

$\frac{I_{ef}}{\text{mA}}$	$x_m$	$x_c$	$y$	$\frac{H_m}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{B_m}{\text{mT}}$
$5,24 \pm 0,08$	32	0	2	$4,7 \pm 0,3$	0	$9 \pm 5$
$7,9 \pm 0,1$	26	0	3	$7,1 \pm 0,4$	0	$14 \pm 5$
$14,2 \pm 0,2$	22	4	6	$12,8 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,6$	$27 \pm 5$
$22,6 \pm 0,3$	36	10	11	$20,4 \pm 0,6$	$5,7 \pm 0,6$	$48 \pm 5$
$34,9 \pm 0,5$	22	6	17	$31,4 \pm 0,7$	$9 \pm 1$	$77 \pm 5$
$44,8 \pm 0,7$	29	7	20	$40,4 \pm 0,9$	$10 \pm 1$	$91 \pm 5$
$55,9 \pm 0,8$	36	8	23	$50 \pm 1$	$11 \pm 1$	$105 \pm 5$
$67 \pm 1$	42	9	25	$61 \pm 1$	$13 \pm 1$	$114 \pm 5$
$78 \pm 1$	49	9	27	$70 \pm 1$	$13 \pm 1$	$121 \pm 5$
$89 \pm 1$	28	5	28	$80 \pm 1$	$15 \pm 3$	$125 \pm 5$
$100 \pm 2$	31	5	29	$90 \pm 2$	$15 \pm 3$	$130 \pm 5$
$113 \pm 2$	35	5	30	$102 \pm 2$	$15 \pm 3$	$134 \pm 5$
$124 \pm 2$	38	5	30	$112 \pm 2$	$15 \pm 3$	$136 \pm 5$
$134 \pm 2$	42	5	31	$121 \pm 2$	$15 \pm 3$	$139 \pm 5$
$145 \pm 2$	44	5	31	$131 \pm 2$	$15 \pm 3$	$141 \pm 5$

Tabulka 3: Naměřené hodnoty  $I_{ef}$ , počtu dílků  $x_m$  pro  $H_m$ ,  $x_c$  pro  $H_c$  a  $y$  pro  $B_m$  a odpovídající spočtené hodnoty pro proužek I

## 4 Diskuse výsledků

Zdaleka největším zdrojem přenesené nejistoty při výpočtu  $H_c$  a  $B_m$  byl odečet  $x_c$  a  $y$  ze stínítka osciloskopu, kdy pro nízké hodnoty nejistota činila až desítky procent. To se především projevilo u výpočtu hodnoty  $H_c$ , kde relativní chyba byla vždy přinejmenším deset procent.

Byly pozorovány všechny typy hysterezních smyček, přičemž zúžený tvar byl pozorován pouze u kroužku III. To ostatně odpovídá očekávání, neboť poslední kroužek byl vyroben z perminvarového feritu. Zároveň lze porovnáním odhadnutých hodnot  $H_m$  odpovídajících přechodu mezi jednotlivými typy s grafy závislosti  $H_c$  a  $B_m$  spatřit jistou korelaci. Například v grafu 3 lze dobře pozorovat přechod mezi typem (b) a (c) (kolem  $30 \text{ A m}^{-1}$ ), neboť původně odhadem lineární závislost přechází postupně v konstantní hodnotu  $H_c$  (podobný trend lze vysledovat i pro  $B_m$ ). Obdobně i v grafu 5 pro kroužek III, kdy typ (b) se projevuje strmým růstem  $H_c$ , zatímco při typ (d) coby přechodu ke smyčce normálního tvaru se růst zmmírňuje a pro typ (c) opět začíná stagnovat (a opět podobně i pro  $B_m$ ). U druhého kroužku takto výrazné projevy nelze pozorovat.

Kalibrace aparatury (resp. vertikální osy) byla provedena určením koeficientu  $\xi$  s poměrně nízkou nejistotou 2 %, popřípadě určením koeficientů  $\chi^I$ ,  $\chi^{II}$  a  $\chi^{III}$ .

$\frac{I_{ef}}{\text{mA}}$	$x_m$	$x_c$	$y$	$\frac{H_m}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{B_m}{\text{mT}}$
$31,0 \pm 0,5$	46,5	0	2	$26,6 \pm 0,7$	0	$11 \pm 4$
$48,1 \pm 0,7$	29	0	3	$41,2 \pm 0,9$	0	$18 \pm 4$
$70 \pm 1$	42	0	6	$60 \pm 1$	0	$26 \pm 4$
$89 \pm 1$	27	2	11	$77 \pm 1$	$6 \pm 3$	$35 \pm 4$
$106 \pm 2$	32	3	17	$91 \pm 2$	$9 \pm 3$	$44 \pm 4$
$127 \pm 2$	38,5	5	20	$109 \pm 2$	$14 \pm 3$	$55 \pm 4$
$149 \pm 2$	45	6,5	23	$128 \pm 2$	$19 \pm 3$	$66 \pm 5$
$171 \pm 3$	25,5	4,5	25	$147 \pm 2$	$26 \pm 6$	$77 \pm 5$
$194 \pm 3$	29	5,5	27	$166 \pm 3$	$32 \pm 6$	$90 \pm 5$
$214 \pm 3$	28	6,5	28	$184 \pm 3$	$37 \pm 6$	$97 \pm 5$
$232 \pm 3$	35	7	29	$199 \pm 3$	$40 \pm 6$	$105 \pm 5$
$250 \pm 4$	38	8	30	$215 \pm 3$	$45 \pm 6$	$110 \pm 5$

Tabulka 4: Naměřené hodnoty  $I_{ef}$ , počtu dílků  $x_m$  pro  $H_m$ ,  $x_c$  pro  $H_c$  a  $y$  pro  $B_m$  a odpovídající spočtené hodnoty pro proužek II

$\frac{I_{ef}}{\text{mA}}$	$x_m$	$x_c$	$y$	$\frac{H_m}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{H_c}{\text{A m}^{-1}}$	$\frac{B_m}{\text{mT}}$
$306 \pm 5$	46	0	2	$1565 \pm 24$	0	$16 \pm 4$
$401 \pm 6$	24	0	3	$2051 \pm 31$	0	$22 \pm 4$
$453 \pm 7$	27,5	3	6	$2317 \pm 35$	0	$24 \pm 4$
$506 \pm 8$	31	6,5	11	$2588 \pm 39$	$543 \pm 84$	$33 \pm 4$
$604 \pm 9$	37,5	14,5	17	$3090 \pm 46$	$1195 \pm 84$	$69 \pm 5$
$702 \pm 11$	44,5	18	20	$3591 \pm 54$	$1453 \pm 84$	$102 \pm 5$
$801 \pm 12$	25,5	9,5	23	$4097 \pm 62$	$1527 \pm 162$	$115 \pm 5$
$903 \pm 14$	28	10	25	$4619 \pm 69$	$1650 \pm 167$	$122 \pm 5$
$1000 \pm 15$	31,5	10	27	$5115 \pm 77$	$1624 \pm 164$	$126 \pm 5$
$1103 \pm 17$	28	10,5	28	$5642 \pm 85$	$1742 \pm 168$	$131 \pm 5$
$1206 \pm 18$	37,5	10,5	29	$6169 \pm 93$	$1727 \pm 167$	$135 \pm 5$

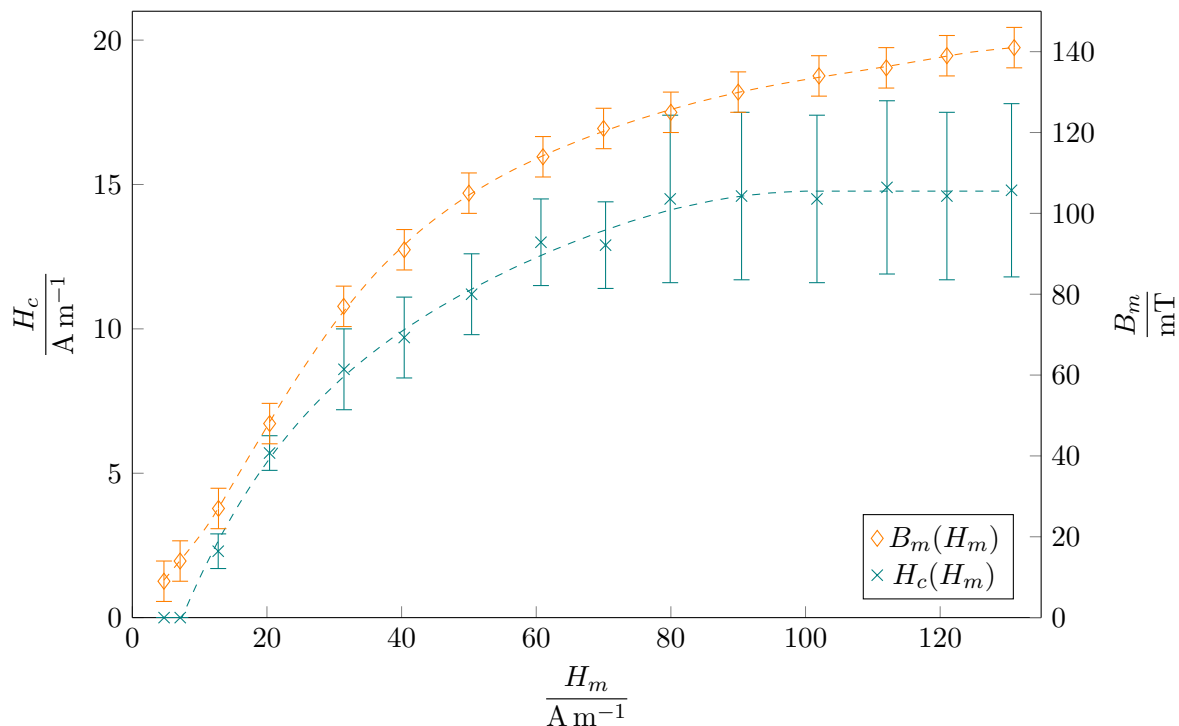
Tabulka 5: Naměřené hodnoty  $I_{ef}$ , počtu dílků  $x_m$  pro  $H_m$ ,  $x_c$  pro  $H_c$  a  $y$  pro  $B_m$  a odpovídající spočtené hodnoty pro proužek III

## 5 Závěr

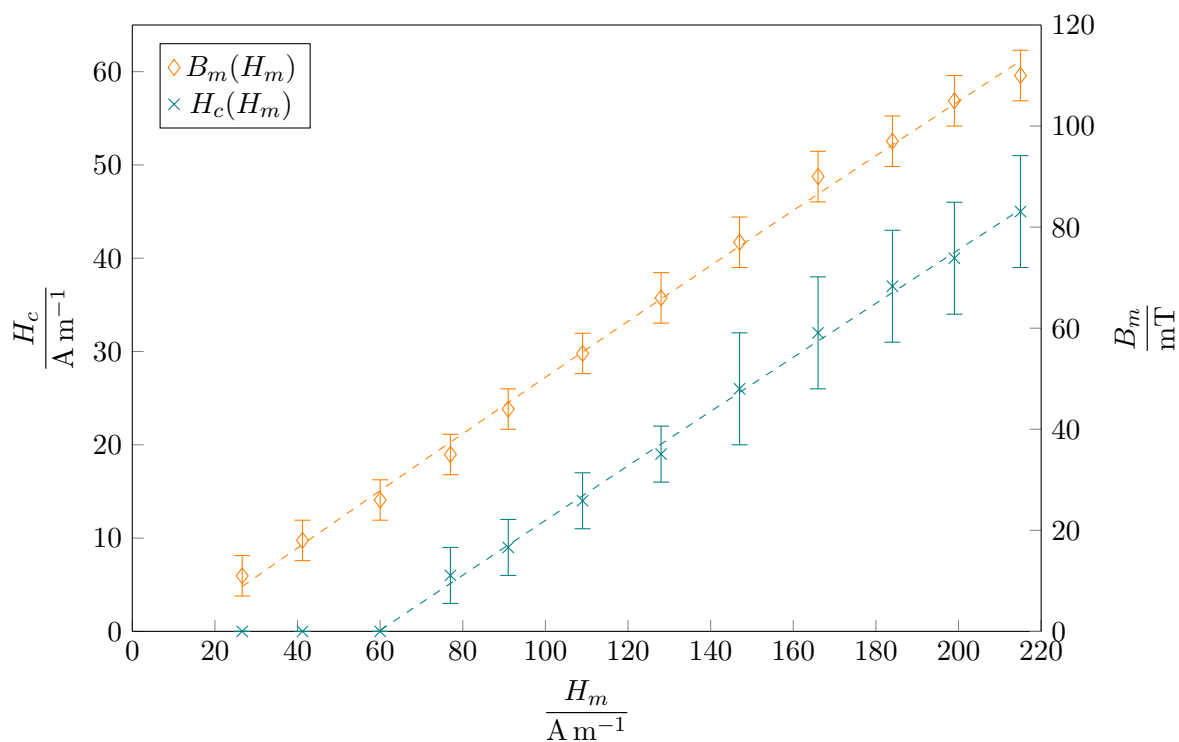
Závislosti  $B_m$  a  $H_c$  na  $H_m$  jsou vyobrazeny v grafech 3–5 a tabulkách 3–5. Byly pozorovány všechny typy hysterezních smyček.

Byly rovněž určeny kalibrační koeficienty, a to konkrétně:

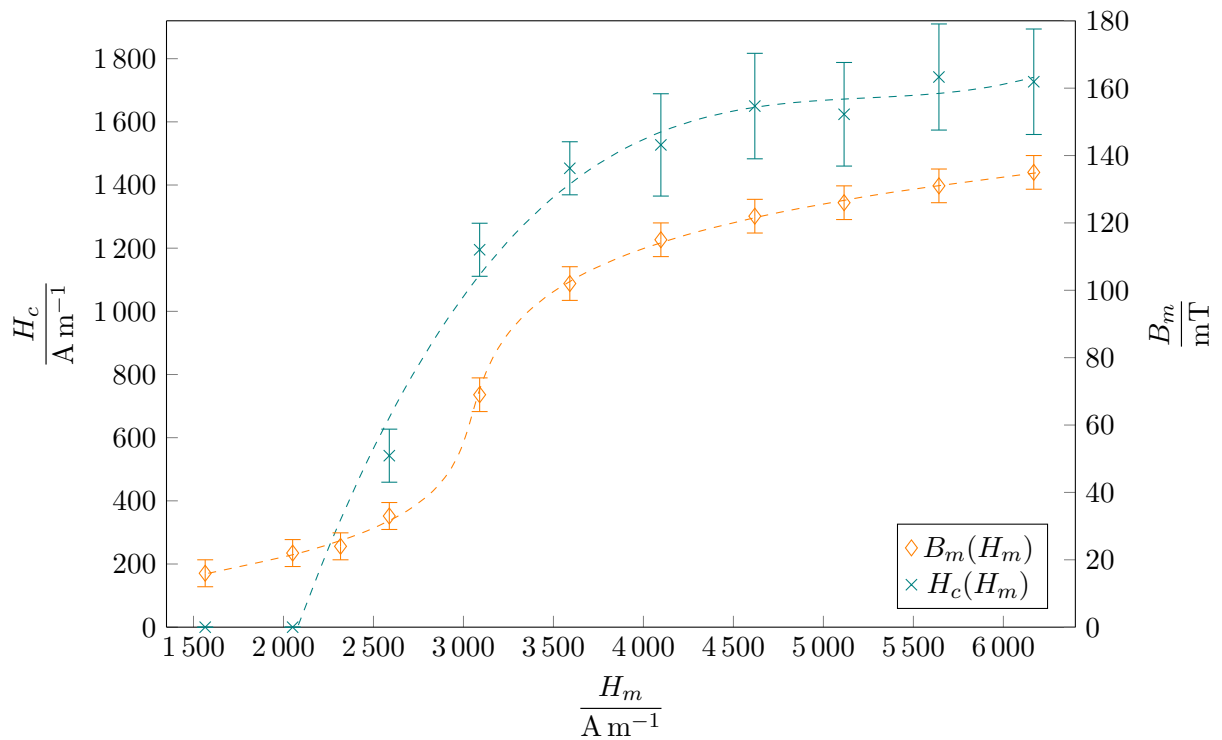
$$\xi = (4,44 \pm 0,08) (\text{mV})^{-1},$$



Graf 3: Závislost koercivní síly  $H_c$  a maximální hodnoty magnetické indukce  $B_m$  na  $H_m$  pro kroužek I (přerušovaně jsou uvedena „vodítka pro oči“)



Graf 4: Závislost koercivní síly  $H_c$  a maximální hodnoty magnetické indukce  $B_m$  na  $H_m$  pro kroužek II (přerušovaně jsou uvedena „vodítka pro oči“)



Graf 5: Závislost koercivní síly  $H_c$  a maximální hodnoty magnetické indukce  $B_m$  na  $H_m$  pro kroužek III (přerušovaně jsou uvedena „vodítka pro oči“)

$$\chi^I = (4,57 \pm 0,08) \text{ mT},$$

$$\chi^{II} = (4,40 \pm 0,08) \text{ mT},$$

$$\chi^{III} = (4,42 \pm 0,08) \text{ mT}.$$

Uvedené hodnoty odpovídají hladině pravděpodobnosti  $\approx 99,7\%$ .

## Literatura

- [1] *Studijní text k základnímu fyzikálnímu praktiku II, úloha 21* [online]. KVOF MFF UK [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_221.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_221.pdf)